

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения»

Кафедра «Подвижной состав железных дорог»

Э.Г. Бабенко

## **КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Рекомендовано  
Методическим советом по качеству  
образовательной деятельности ДВГУПС  
в качестве учебного пособия

Хабаровск  
Издательство ДВГУПС  
2014

УДК [620.22 : 621 : 656.2] (075.8)  
ББК К 43 я73  
Б 124

Рецензенты:

Кафедра «Литейное производство и технология металлов»  
Тихоокеанского государственного университета  
(заведующий кафедрой, доктор технических наук, заслуженный деятель науки  
Российской Федерации, профессор  
*Ри Хосен*)

Доктор технических наук, заслуженный деятель науки  
Российской Федерации, профессор  
*А.Д. Верхотуров*

**Бабенко, Э. Г.**

Конструкционные материалы для деталей технических устройств  
**Б 124** железнодорожного транспорта : учеб. пособие / Э. Г. Бабенко. – Хаба-  
ровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. – 223 с. : ил.

Учебное пособие соответствует ФГОС ВО по специальностям 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», направлению подготовки бакалавров 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Изложены общие сведения о конструкционных материалах, приведены основные положения теории сплавов, показаны основы взаимодействия звеньев системы: «состав материала – структура – свойства – технология».

Рассмотрены классификация, свойства, маркировка, назначение наиболее распространенных в промышленности и на железнодорожном транспорте групп конструкционных материалов. Дана информация о европейской, американской и японской системах обозначения сталей.

Учебное пособие содержит задания и рекомендации по выполнению самостоятельных работ.

Предназначено для студентов 1–3-го курсов всех форм обучения, изучающих дисциплины «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов». Может быть полезно для инженерно-технических работников и аспирантов.

УДК [620.22 : 621 : 656.2] (075.8)  
ББК К 43 я73

© ДВГУПС, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Удельный вес перевозок железнодорожным транспортом в общем объеме перевозок любой страны складывается с учетом экономико-географических и этнографических факторов: размещения природных ресурсов и производительных сил, численности населения, размера территории, топливно-энергетических возможностей и др. Ежегодно в странах мира перевозится свыше 10 трлн тонн грузов и почти 15 трлн пассажиров.

В России железные дороги являются самой массовой отраслью транспорта. В настоящее время – это сложное многоотраслевое хозяйство, вобравшее в себя многие достижения науки и техники. Все его технические устройства прошли сложный путь совершенствования, насыщения результатами множества исследований в области фундаментальных наук, внедрения прогрессивных технологий и материалов. Для стабильного функционирования транспорта требуются самые разнообразные материалы: строительные, лесные химические, текстильные, бумажные, кожаные, электротехнические, смазочные, металлы, топливо и другие. Материалы необходимы для постройки железнодорожного пути, локомотивов, вагонов, устройств связи, мостов, зданий, а также для безотказной эксплуатации технических средств.

Еще в конце XVIII века знаменитый английский физик Джордж Паджет Томсон отмечал: «... в техническом процессе участвуют три элемента: знания, энергия и материалы. От этих трех элементов зависит на сколько цивилизация может господствовать над природой. Знание безусловно является главным из них».

Выбор того или иного материала или замена одного другим должны быть технически или экономически обоснованы. Для успешного решения подобных задач будущий специалист не может оставаться односторонним. Он должен быть человеком широких взглядов, в некоторой степени энциклопедистом, ему следует в какой-то мере владеть данными других наук, отличающихся от избранной им области. Все это возможно только на прочном фундаменте самого точного владения всем, что относится к его специальности. Очень важным является умение правильной трактовки полученных фактов, грамотное применение их в практической деятельности. Но так же, как практической деятельности предшествует умение, необходимыми условиями для появления умения служат знание и понимание.

Истории цивилизации присущи этапы, наиболее полно отражающие прогресс человеческого общества: получение огня, развитие скотоводства, культивирование злаковых растений и, наконец, открытие тайны превращения руды в металл. Появление металлургии в седьмом тыся-

челетию до нашей эры (как свидетельствуют археологические раскопки) обеспечило людей металлами и сплавами, что сыграло решающую роль в последующем развитии производительных сил.

Металлы как основной конструкционный материал с древнейших времен и по сегодняшний день являются самыми надежными помощниками человека. Почти три четверти химических элементов таблицы Менделеева, из которых состоит все существующее во Вселенной, составляют металлы. Многие из них находят широкое применение в технике и в быту. Но еще большее распространение получили сплавы, состоящие из нескольких металлических и неметаллических элементов. Как правило они обладают свойствами, превосходящими свойства чистых металлов. Одни имеют высокую твердость, износостойкость, способность выдерживать огромные давления и температуры. Другие, наоборот, очень пластичны, хорошо куется и штампуются, третьи даже плавятся в горячей воде.

В настоящее время наибольшее распространение получили так называемые «черные сплавы» – стали и чугуны, основой которых является железо. Эти сплавы относительно дешевые, имеют высокое качество.

Стали и чугуны – универсальные материалы. Изменяя их химический состав и структуру, вводя добавки других металлов, можно получать сплавы с очень широким диапазоном физико-химических и эксплуатационных свойств: сверхтвердые, жаростойкие, нержавеющие под действием даже самых сильных кислот, износостойкие, выдерживающие большие ударные нагрузки и др.

Бурное развитие машиностроения, приборостроения, авиационно-космической, энергетической и других важнейших отраслей привело к созданию нового класса высокопрочных, жаропрочных и высокомодульных материалов, называемых композиционными. Наряду с высокими удельными значениями прочности, жесткости, жаропрочности композиты могут обладать заданным комплексом различных специальных свойств – радиопоглощающих, радиопрозрачных, диэлектрических, магнитных и др. Это достигается сочетанием разнородных материалов (металлы, сплавы, керамика, полимеры, карбидов, бориды и т. д.), при котором используются полезные свойства отдельных компонентов, входящих в композицию.

Композиционные материалы сыграли существенную роль в решении многих проблем, связанных с авиацией, морским флотом, освоением космоса. В настоящее время спрос на такие материалы непрерывно возрастает, и в ближайшие годы сфера их использования будет непрерывно расширяться.

В деле создания новых материалов с уникальными свойствами неопределимое значение приобретает использование нанотехнологий.

Много внимания уделяется получению металлов высокой чистоты, в которых на миллиарды атомов основного материала приходится не более одного атома примесей. Дело в том, что многие металлы, практически свободные от примесей, резко отличаются по свойствам от тех же металлов, хотя бы немного загрязненных другими элементами. В этом отношении показателен титан. Еще в начале прошлого века металлургам не удавалось получать его чистым – в нем всегда присутствовали примеси. Всего несколько десятых долей процента делали титан хрупким, непрочным, не поддающимся механической обработке. О нем сложилось мнение, как о бесполезном материале. Но при получении титана высокой чистоты металл в корне преобразился: он оказался настолько пластичным, что легко ковался даже на холоде, его можно было прокатывать в листы, ленту, проволоку и даже в тонкую фольгу.

В последние годы у металлов появился серьезный «конкурент» в виде ряда продуктов современной химии – пластмасс, синтетических волокон, керамики, разных видов стекол и т. д. Ежегодное мировое производство одних только пластмасс измеряется сейчас миллионами тонн. Однако выплавка черных и цветных металлов растет не менее быстрыми темпами.

Каждый день миллиарды людей используют широчайший ассортимент изделий из самых разнообразных материалов. Для придания определенных свойств каждому из них необходимы знания о тех процессах, которые происходят в материалах при их получении, обработке и эксплуатации. Как нельзя точнее сказал об этом еще в XVI веке известный английский философ Ф. Бэкон: «То, что достойно существовать, – достойно быть известно». Потому пока будут цениться конструкционные материалы, будут цениться и знания о них.

Курс «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», являясь одним из основных в цикле технических дисциплин при подготовке инженерных и научных кадров, дает знания о составе, структурах, свойствах конструкционных материалов, технологии их обработки, рациональному использованию в технических устройствах.

Настоящее пособие написано с целью помочь студентам и аспирантам понять сущность процессов, происходящих в конструкционных материалах при воздействии на них внешних факторов. Дать знания об основных группах конструкционных материалов, их свойствах, областях использования. Изучить основы взаимодействия звеньев системы «состав материала – структура – свойства – технология» с последующим наиболее рациональным решением задач по повышению надежной эксплуатации технических устройств, в том числе и на железнодорожном транспорте.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

## 1.1. Определение и классификация металлов

Металл (нем. metall; первоисточник: греч. metallon шахта, руда, металл) в развитии человечества сыграл существенную роль. В 1836 г. датчанин Кристиан Юргенсен Томсен составлял путеводитель к археологической выставке одного из музеев Копенгагена. Перед ним витали вопросы: как расположить экспонаты? какой основной признак развития человеческого общества? Томсен дал четкий ответ: уровень развития общества определяется основным рабочим материалом эпохи. В соответствии с этим он и расположил экспонаты по схеме: каменный век – бронзовый век – железный век. После нескольких десятилетий полемики, такое деление стало общепринятым.

Металлы и сплавы на их основе являются в современном обществе основными конструкционными материалами.

Люди с давних времен пытались понять, что такое металл. Самое известное из ранних определений металла было дано в середине XVII в. Михаилом Васильевичем Ломоносовым: «Металл – суть (есть) светлое тело, которое ковать можно. Таких тел находим только шесть: золото, серебро, медь, олово, железо и свинец». Следовательно, существовала твердая уверенность в том, что металлы обладают особыми свойствами, которые объединяют их между собой и выделяют из всего неорганического мира. Характерный блеск («светлое тело») и пластичность («ковать можно») считалось ранее их фундаментальными отличительными признаками. Но металлическим блеском обладают некоторые неметаллы (например, йод), а мелкие порошки металлов кажутся черными. Ртуть при комнатной температуре представляет собой жидкость и ковать ее невозможно. Впрочем сам же М.В. Ломоносов доказал, что ртуть относится к металлам. В 1759 г. он (совместно с петербургским академиком И.А. Брауном) охладил ртуть в смеси из снега и азотной кислоты до перехода в твердое состояние, при котором она стала ковкой, как свинец.

Отмеченные изъяны определения М.В. Ломоносова вызваны были недостатком в его время знаний ни о протекании электрического тока, ни о роли электронов в металле.

К настоящему времени сформировалось более четкое определение металлов – это вещества, обладающие в обычных условиях характерными металлическими свойствами:

- способностью хорошо отражать световые волны (блеск);
- кристаллическостью;
- высокими значениями тепло- и электропроводимости;
- отрицательным температурным коэффициентом электрической проводимости.

Не все металлы и не при всех условиях обладают полной совокупностью отмеченных свойств. Из всех элементов периодической системы Д.И. Менделеева более 78 % относятся к металлам, и подобрать при таком многообразии абсолютно точное определение – задача почти безнадежная. Поэтому на сегодняшний день важнейшим признаком металла является последнее свойство – отрицательный температурный коэффициент электрической проводимости, т. е. понижение электропроводимости с ростом температуры и наоборот.

В общем случае металлы делятся на две большие группы: черные (железо и сплавы на основе железа) и цветные (алюминий, магний, цинк, никель, медь, титан и др.). Помимо черных и цветных металлов и сплавов различают: легкие (магний, бериллий, алюминий, титан), благородные (серебро, золото, платина, палладий, родий, осмий, рутений), редкоземельные (лантаноиды), щелочноземельные (натрий, калий, цинк), тугоплавкие (вольфрам, молибден, тантал, ниобий), легкоплавкие (цинк, ртуть, олово, свинец, висмут, сурьма, галлий, германий), урановые (актиноиды). Часть элементов Периодической системы Д.И. Менделеева (кремний, теллур, селен, германий) являются промежуточными между металлами и неметаллами.

## **1.2. Строение металлов**

Известно, что атом любого элемента состоит из положительно заряженного ядра и отрицательных электронов. Внешние (валентные) электроны металлов (в отличие от неметаллов) с ядром связаны слабо. Поэтому атомы металлов легко теряют валентные электроны, которые свободно перемещаются в межатомном пространстве, образуя так называемый электронный газ. Атомы, потерявшие валентные электроны превращаются в ионы. Так как электроны электронного газа в одинаковой степени принадлежат всем ионам металла и не связаны с отдельными атомами, то металлическая межатомная связь не имеет направленного характера.

Наличие таких коллективизированных электронов формирует характерные свойства металлов. Высокая пластичность предопределяется тем, что ионы как бы плавают в облаке электронного газа. При смещении отдельных объемов металла связь между ионами не нарушается и разрушение не происходит.

Наличием электронного газа объясняются высокие электро- и теплопроводимость металлов. С увеличением температуры колебания ионов усиливаются, что затрудняет перенос зарядов электронами. И, наоборот, при понижении температуры электропроводимость растет, что в ряде случаев вызывает явление сверхпроводимости.

Характерный металлический блеск является результатом взаимодействия свободных электронов с электромагнитными световыми волнами.

Металлы имеют кристаллическое строение, т. е. определенное расположение ионов (атомов) в пространстве. Для описания такой структуры используется понятие кристаллической решетки – воображаемой пространственной сетки (рис. 1) с ионами в узлах.

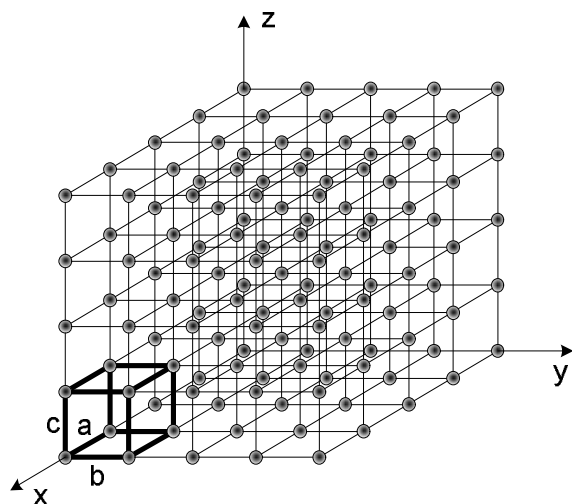


Рис. 1. Схема кристаллической решетки

Атомно-кристаллическая структура может быть представлена элементом объема решетки с минимальным количеством частиц (атомов), многократным переносом которого в пространстве может быть построен весь кристалл. Такой элементарный объем характеризует строение данного типа кристалла и называется элементарной ячейкой. Подавляющее большинство металлов имеют следующие типы кристаллических ячеек: объемно-центрированную кубическую (ОЦК), гранецентрированную кубическую (ГЦК) и гексагональную плотноупакованную (ГПУ) (рис. 2). Менее распространены ромбоэдрическая, тетрагональная и более сложные решетки.

гональную плотноупакованную (ГПУ) (рис. 2). Менее распространены ромбоэдрическая, тетрагональная и более сложные решетки.

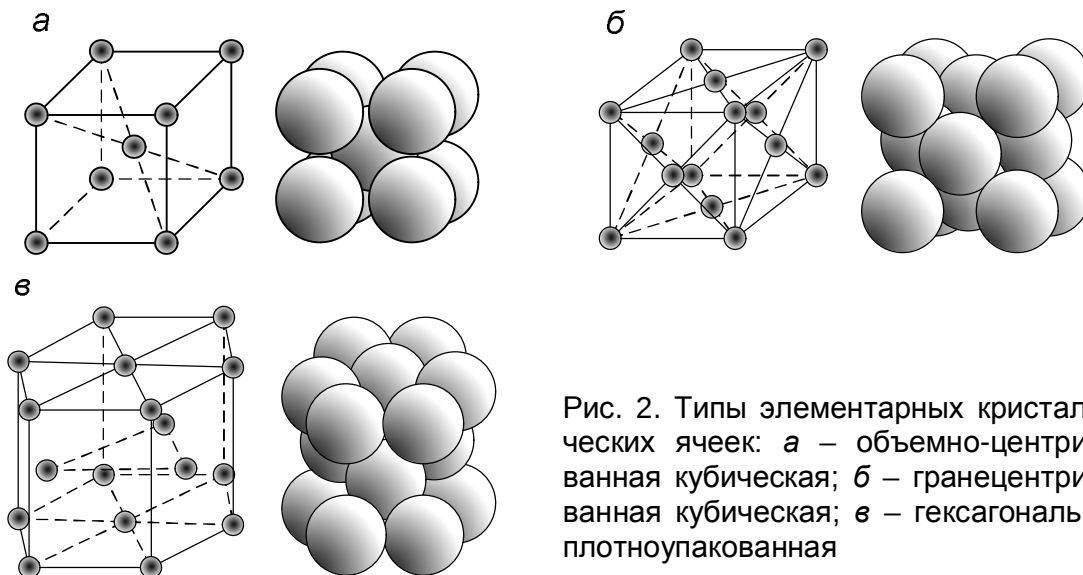


Рис. 2. Типы элементарных кристаллических ячеек: а – объемно-центрированная кубическая; б – гранецентрированная кубическая; в – гексагональная плотноупакованная

Кристаллические решетки характеризуются следующими основными параметрами: периодом решетки, атомным радиусом, базисом, коэффициентом компактности и координационным числом.

Периодом решетки называется расстояние между центрами соседних ионов (атомов). Периоды  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (см. рис. 1) выражаются в нанометрах ( $1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$ ).

Период кубической решетки  $a$  находится в пределах  $0,286...0,607\text{ нм}$ . Для гексагональных решеток  $a = 0,228...0,398\text{ нм}$ ,  $c = 0,357...0,652\text{ нм}$ .

Атомный радиус – половина межатомного расстояния между центрами ближайших атомов в кристаллической решетке при нормальной температуре и атмосферном давлении. Атомный радиус не является неизменной величиной. Он зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются координационное число и тип химической связи между атомами.

Базисом решетки называется количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.

В объемно-центрированной кубической решетке (рис. 2, а) атомы (ионы) расположены в вершинах и в центре объема куба. Каждый угловой атом принадлежит восьми соседним ячейкам. Следовательно, одной ячейке принадлежит  $1/8$  углового атома. Только внутренний атом целиком принадлежит данной ячейке. Значит, на одну ячейку объемно-центрированной кубической решетки приходится  $8 \cdot 1/8 + 1 = 2$  атома.

В гранецентрированной кубической решетке (рис. 2, б) атомы (ионы) находятся в вершинах и в центрах каждой грани куба. Каждый угловой атом входит в восемь элементарных ячеек, а находящийся в центре грани – в две соседние ячейки. В центре куба атома нет. Следовательно, на одну ячейку приходится  $8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$  атома.

У гексагональной плотноупакованной решетки (рис. 2, в) элементарной ячейкой является шестигранная призма, в которой атомы находятся в вершинах, в центрах оснований и внутри. Два атома, лежащие в центрах шестиугольников, принадлежат двум соседним ячейкам:  $2 \cdot 1/2 = 1$  атом. Двенадцать атомов в вершинах призмы относятся к шести соседним ячейкам:  $12 \cdot 1/6 = 2$  атома. Три атома, находящиеся внутри призмы полностью принадлежат данной ячейке:  $3 \cdot 1 = 3$  атома. Значит, на одну ячейку гексагональной плотноупакованной решетки приходится  $1+2+3 = 6$  атомов.

Таким образом, базис объемно-центрированной кубической решетки – 2, гранецентрированной кубической – 4, гексагональной плотноупакованной – 6.

Коэффициентом компактности ( $\eta$ ) решетки называется отношение объема атомов  $V_a$ , входящих в решетку, ко всему объему решетки  $V_p$ :  $\eta = V_a/V_p \cdot 100\%$ .

Для объемно-центрированной кубической решетки коэффициент компактности составляет 68 %, гранецентрированной кубической 74 %, гексагональной плотноупакованной 74 %. Таким образом, решетки ГЦК и ГПУ более компактны, чем ОЦК.

Координационное число ( $K$ ) соответствует числу атомов (ионов), находящихся на наиболее близком равном расстоянии от выбранного атома кристаллической решетки.

В объемно-центрированной кубической решетке атом А (рис. 3, а) находится на наиболее близком равном расстоянии от восьми атомов вершин куба, т. е. координационное число этой решетки равно 8 ( $K_8$ ).

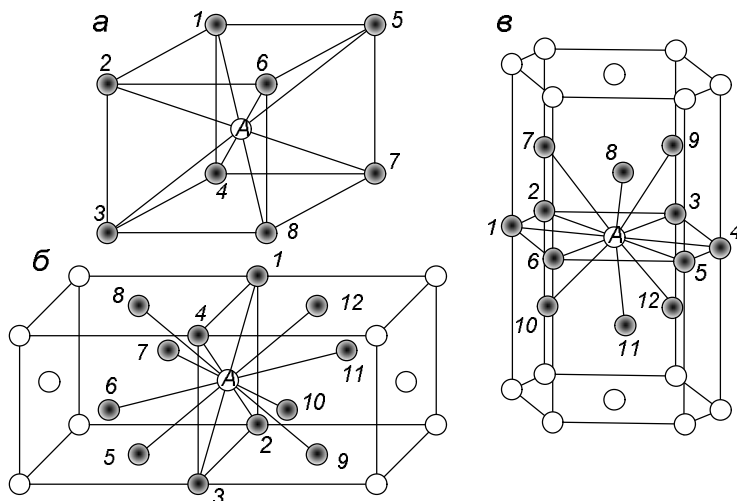


Рис. 3. Координационные числа для различных кристаллических решеток: а – объемно-центрированной кубической ( $K_8$ ); б – гранецентрированной кубической ( $K_{12}$ ); в – гексагональной плотноупакованной ( $K_{12}$ )

В гранецентрированной кубической решетке (см. рис. 3, б), расположенный на грани атом А находится на наиболее близком равном расстоянии от четырех атомов (1,2,3,4) вершин куба; от четырех атомов (5,6,7,8), расположенных на гранях куба и от четырех атомов (9,10,11,12), принадлежащих кристаллической ячейке, расположенной рядом. Следовательно, для решетки ГЦК координационное число равно 12 ( $K_{12}$ ).

В гексагональной плотноупакованной решетке атом А находится на наиболее близком равном расстоянии от шести атомов (1,2,3,4,5,6) вершин шестигранника основания призмы, от трех атомов (7,8,9), расположенных в средней части призмы и от трех атомов (10,11,12), находящихся в средней части соседней кристаллической ячейки. Таким образом, для гексагональной плотноупакованной решетки координационное число равно 12 ( $K_{12}$ ).

Обычно металл представляет собой конгломерат большого числа кристаллов, которые расположены по отношению друг к другу совершенно произвольно, но прочно связанные между собой в единое целое. Такое строение металла называется поликристаллическим. Кристаллы в поликристаллическом теле не обладают правильной геометрической

формой и поэтому они называются зернами или кристаллитами. Зерна в поликристаллическом металле сопрягаются между собой самыми различными кристаллографическими плоскостями. Следовательно, границы между зернами представляют собой участки, в которых кристаллическая решетка искажена. При этом искажения захватывают лишь приграничные области решеток каждого зерна, т. е. практически они распространяются только по поверхности зерен. Поэтому они называются двумерными несовершенствами и существенно влияют на свойства металла.

Встречаются случаи, когда весь объем металла занимает один кристалл. Такой объем называется монокристаллом. На монокристаллах металлов наглядно проявляется анизотропия (неодинаковость) многих свойств по разным направлениям. Разница в прочности и твердости может достигать до 3...5 раз.

Существенное влияние на свойства металлов и сплавов оказывает величина зерна. Наглядным примером являются нанокристаллические материалы. Нанокристаллическими называются материалы со структурой, состоящей из кристаллических зерен размером 1...15 нм. В таких материалах от 2 до 50 % объема приходится на межзеренные границы. Поэтому нанокристаллический материал может быть разделен на два структурных компонента: кристаллический, включающий с себя атомы, расположенные внутри кристаллов и межкристаллитный, состоящий из атомов, расположенных на границе.

Прочность нанокристаллических металлов значительно выше, чем их крупнозернистых аналогов. Так, например, нанокристаллический титан имеет пределы текучести  $\sigma_{0,2} = 654$  МПа и прочности  $\sigma_B = 716$  МПа. В то время как его крупнозернистый аналог –  $\sigma_{0,2} = 360$  МПа и  $\sigma_B = 464$  МПа. Следовательно, можно считать, что нанометровые размеры кристаллов являются основным источником прочности нанокристаллических материалов.

### **1.3. Полиморфные превращения металлов**

Некоторые металлы (железо, титан, кобальт, цирконий и др.) при разных температурах имеют различные кристаллические решетки. Такое явление называется полиморфизмом или аллотропией. Процесс перехода из одного кристаллического строения в другое называется полиморфным (аллотропическим) превращением.

Строение, получающееся в результате полиморфного превращения, называется аллотропической формой. Аллотропическая форма, устойчивая при более низкой температуре, обозначается индексом  $\alpha$ , при более высокой –  $\beta$ ,  $\gamma$  и так далее.

Температура, при которой происходит переход решетки из одного вида в другой, называется температурой полиморфного превращения или температурой перекристаллизации. При этом изменяются свойства металла (плотность, теплопроводность, теплоемкость и др.).

Аллотропические превращения при нагревании происходят с поглощением тепла, а при охлаждении с его выделением. Как при нагревании, так и при охлаждении аллотропические превращения происходят с некоторым запаздыванием. Так, превращение  $\alpha$ -модификации в  $\beta$ -модификацию, происходящее при нагревании, будет всегда выше температуры превращения  $\beta$  в  $\alpha$ , происходящее при охлаждении (рис. 4). Такое явление называется *гистерезисом*.

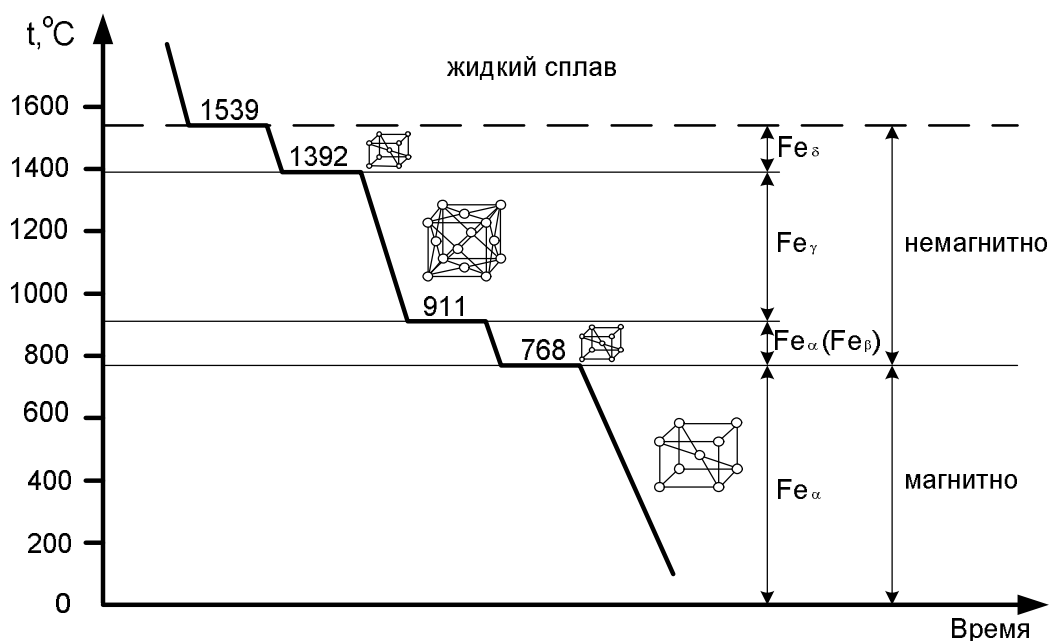


Рис. 4. Кривая охлаждения чистого железа

До температуры 1539 °C происходит охлаждение жидкого железа. При 1539 °C на кривой охлаждения появляется площадка. При этой температуре железо затвердевает и выделяется скрытая теплота кристаллизации. По окончании кристаллизации и до температуры 1392 °C железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку ( $Fe_{\alpha}$ ).

При 1392 °C на кривой появляется вторая площадка, связанная с аллотропическим превращением  $\alpha$ -железа ( $Fe_{\alpha}$ ) в  $\gamma$ -железо ( $Fe_{\gamma}$ ), имеющее гранецентрированную кубическую решетку.

При аллотропическом превращении исчезают старые зерна и появляются новые. Такое превращение аналогично процессу кристаллизации: вначале образуются зародыши, а затем идет рост зерен новой модификации. Такое превращение является перекристаллизацией.

Следующая площадка наблюдается на кривой охлаждения при температуре 911 °С по причине превращения  $Fe_\gamma$  в  $Fe_\alpha$ . Кристаллическая решетка превращается из гранецентрированной опять в объемно-центрированную кубическую, которая сохраняется до самых низких температур.

Площадка на кривой охлаждения, соответствующая температуре 768 °С, связана не с перестройкой кристаллической решетки, а с перестройкой электронных оболочек атомов и изменением магнитных свойств. Ниже 768 °С железо магнитно, а выше – немагнитно.

Иногда немагнитное железо  $Fe_\alpha$  называют  $Fe_\beta$ , а высокотемпературную модификацию  $Fe_\alpha$  (в интервале 1392...1539 °С) –  $Fe_\delta$ .

Полиморфные превращения протекают как в чистых металлах, так и в сплавах.

Металлы, имеющие только один тип кристаллической решетки, называются изоморфными (никель, медь, хром, вольфрам и другие).

## 1.4. Дефекты строения кристаллов

### 1.4.1. Точечные дефекты

Реальные кристаллы, в отличие от идеальных, имеют большое количество дефектов, оказывающих существенное влияние на свойства металлов.

Наиболее распространенными дефектами являются точечные, линейные и поверхностные.

Атомы в узлах решетки колеблются с определенной амплитудой, которая тем больше, чем выше температура. Несмотря на то, что большинство атомов обладают средней энергией и колеблются при данной температуре практически с одинаковой амплитудой, некоторые из них имеют амплитуду не только больше средней, но и могут менять свое положение, т. е. переходить из узла в междоузлие, из поверхностного слоя выходить на поверхность кристалла и т. д.

Атом, вышедший из узла решетки в междоузлие (рис. 5), называется *дислоцированным*, а незаполненное место, где он находился, *вакансией*. Через некоторое время вакансия заполняется одним из атомов из соседнего слоя, а незаполненный узел становится вакансией. Следовательно, вакансия перемещается по объему кристалла.

Атомы других элементов, находящиеся как в узлах, так и в междоузлиях решетки называются *примесными*.

Вакансии и дислоцированные атомы имеются в кристаллах при любой температуре. Каждой температуре выше абсолютного нуля соответствует равновесная концентрация вакансий и дислоцированных атомов, причем она резко повышается при нагреве (особенно вблизи температуры плавления).

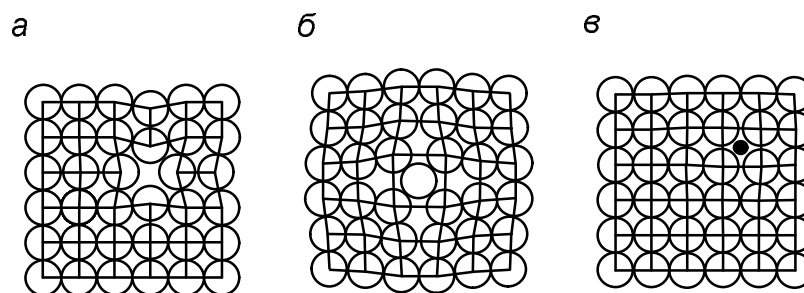


Рис. 5. Точечные дефекты кристаллической решетки:  
 а – вакансия; б – дислоцированный атом; в – примес-  
 ной атом

Точечные дефекты искажают кристаллическую решетку и, тем са-  
 мым, влияют на физические свойства металла.

#### 1.4.2. Линейные дефекты

К линейным дефектам относятся дислокации, которые подразделя-  
 ются на краевые и винтовые.

На рис. 6, а, б показан участок кристаллической решетки, имеющий  
 одну «лишнюю» полуплоскость АВ, называемую экстраплоскостью.

Линия, проходящая через точку А перпендикулярно направлению  
 сдвига, называется краевой дислокацией. Она является краем экстра-  
 плоскости.

Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то дис-  
 локация называется положительной и обозначается знаком  $\perp$ , а если в  
 нижней, то отрицательной и обозначается  $\top$  (рис. 6, в). Такое различие  
 является условным. Если повернуть кристалл на  $180^\circ$  положительная  
 дислокация превращается в отрицательную. Знак дислокации дает воз-  
 можность определить результаты их взаимодействия: дислокации одно-  
 го знака отталкиваются, а противоположного притягиваются.

Помимо краевых, в кристаллах могут образовываться винтовые дис-  
 локации (см. рис. 6, г). Винтовые дислокации получаются частичным  
 сдвигом атомных слоев по плоскости Q. Кристалл как бы закручивается  
 винтом вокруг линии EF, которая является линией дислокации. Выше  
 линии дислокации решетка сжата, а ниже растянута. Винтовая дислока-  
 ция, образованная вращением по часовой стрелке, называется правой,  
 а против часовой – левой. Дислокации притягивают в свою зону атомы  
 примесей, которые осаждаются вдоль края экстраплоскости.

Теория дислокаций дает объяснение большому расхождению между  
 теоретической и фактической прочностью металлов. Теоретическая  
 прочность должна соответствовать произведению сил межатомной свя-  
 зи на число атомов в сечении кристалла. Однако реальное усилие для

смещения одной части кристалла относительно другой оказывается на 2...3 порядка ниже расчетного. Это вызвано тем, что деформация происходит не смещением целых атомных плоскостей, а за счет постепенного перемещения дислокаций в плоскости сдвига. При движении дислокации по направлению сдвига происходит смещение верхней и нижней части кристалла на одно межатомное расстояние, что требует значительно меньших усилий, чем для полного смещения одной части относительно другой. В результате перемещения дислокация выходит на поверхность кристалла и исчезает, а на поверхности остается ступенька скольжения F–E (см. рис. 6, а).

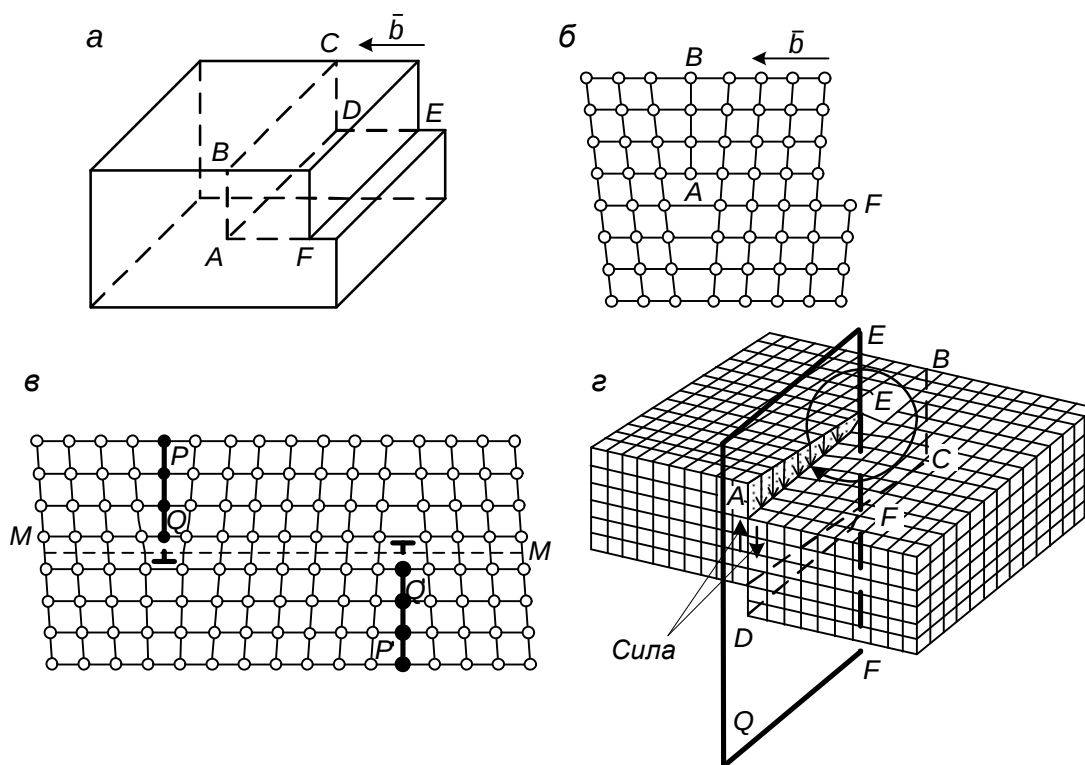


Рис. 6. Дислокации: а, б, в – краевые; г – винтовая

Дислокации и другие дефекты кристалла оказывают существенное влияние на прочность металла. При отсутствии дислокаций прочность кристалла резко возрастает (рис. 7). При ограниченной плотности дислокаций и других дефектов решетки прочность будет тем меньше, чем больше дислокаций находится в данном объеме металла. Плотность дислокаций увеличивается при возрастании приложенных напряжений. Дислокации возникают в разных направлениях, воздействуют друг на друга, взаимно уничтожаются и т. д. Поэтому их движение становится все более затрудненным, что требует большей нагрузки для продолжения деформации.

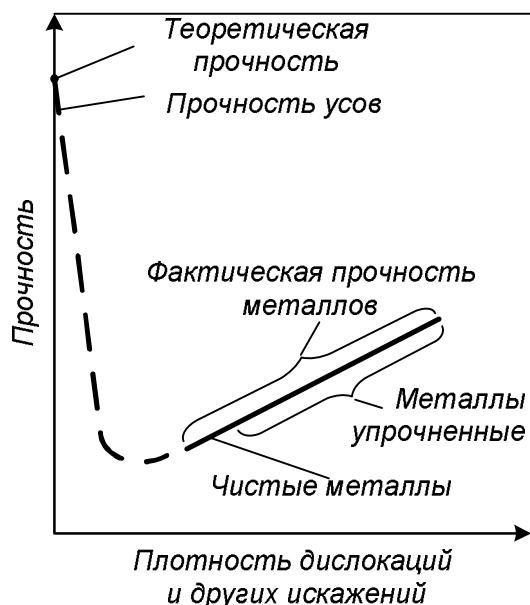


Рис. 7. Влияние искажений кристаллической решетки на прочность металла

В итоге металл упрочняется (см. рис. 7, правая ветвь кривой).

Упрочняют металл атомы растворенных в металле примесей и легирующих элементов, частицы второй фазы, границы зерен и др., которые препятствуют перемещению дислокаций. Свободному перемещению дислокаций способствуют также наклеп, снижение температуры, термообработка.

Следовательно, повысить прочность металла можно либо созданием идеальной кристаллической решетки (в которой отсутствуют дефекты), либо увеличением числа дефектов, препятствующих движению дислокаций.

### 1.4.3. Поверхностные дефекты

Металл состоит из множества мелких кристаллов, т. е. имеет поликристаллическое строение. Границы между зернами представляют собой узкую переходную зону шириной 5...15 атомных расстояний (рис. 8, а).

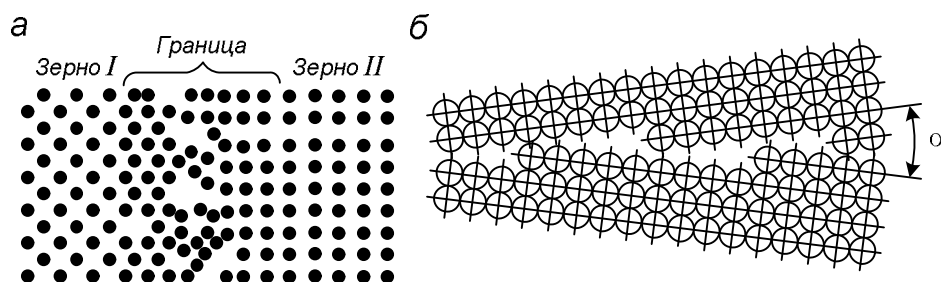


Рис. 8. Схема строения границы между зернами: а – высокоугловая граница; б – граница между блоками (малоугловая граница);  $\alpha$  – угол разориентировки соседних блоков

В свою очередь зерно не является монолитным, а содержит большое количество частей, разориентированных относительно друг друга на небольшие (не более  $5^\circ$ ) углы. Такие части (размером 0,1...1,0 мкм) называются субзернами (см. рис. 8, б), а структура металла – блочной или мозаичной.

На границах зерен и блоков вследствие их разориентировки происходит скопление дислокаций и различных примесей, что оказывает существенное влияние на механические свойства металла.

## 1.5. Диффузия в металлах и сплавах

Как отмечалось ранее, атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, непрерывно колеблются около положения равновесия. Некоторые из них приобретают столь большую энергию, что уходят со своего места в межузельное пространство, меняются местами со своими соседями, занимают находящиеся рядом вакансии и т. д. Такое перемещение атомов носит общее название – диффузия.

Различают самодиффузию и гетеродиффузию. Самодиффузия – это процесс перемещения атомов, не связанный с изменением концентрации компонентов в отдельных объемах. Гетеродиффузия сопровождается изменением концентрации. Как правило, она происходит в сплавах с повышенным содержанием примесей. Имеется несколько механизмов диффузии: обменный, циклический, вакансионный, межузельный и др.

При обменном механизме два соседних атома обмениваются местами (рис. 9, а). При циклическом механизме диффузия протекает совместным перемещением группы атомов (рис. 9, б).

Для металлов наиболее вероятным является вакансионный механизм диффузии (рис. 9, в), при котором вакансии кристаллической решетки занимают расположенными рядом атомами.

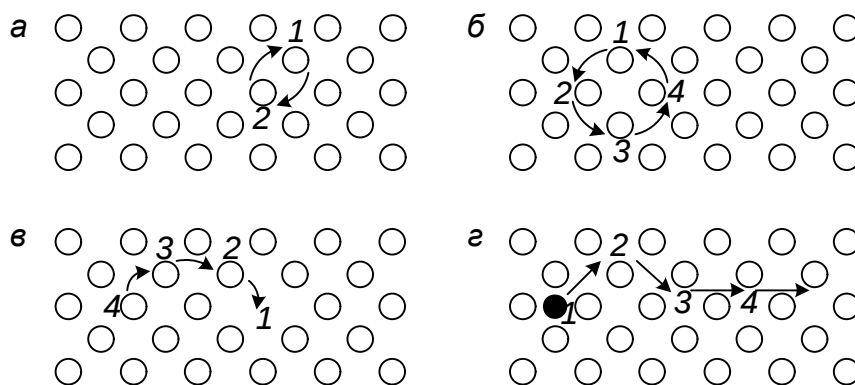


Рис. 9. Механизмы диффузии атомов: а – обменный; б – циклический; в – вакансионный; г – межузельный

При межузельном механизме диффузии (см. рис. 9, г) наблюдается переход атома из одного межузлия в соседнее. Такой механизм характерен для компонентов с малым атомным радиусом. Например, диффузия атомов углерода, азота, водорода в железоуглеродистых сплавах.

Наиболее легко диффузия протекает по границам и на поверхности зерен, где сконцентрированы дефекты кристаллического строения. Существенно увеличивает скорость диффузии повышение температуры. Так при повышении температуры, начиная от комнатной, на каждые 10–15 °С коэффициент диффузии возрастает примерно в два раза.

## 1.6. Деформации и механические свойства металлов

В процессе эксплуатации металлические изделия подвергаются различным видам нагрузок: статическим, динамическим, переменным, растягивающим, сжимающим, изгибающим, скручивающим, срезающим, сосредоточенным, распределенным, сплошным и др.

Под влиянием внешних нагрузок и различных внутренних физико-механических процессов в металле между частицами возникают внутренние силы (силы упругости), которые оказывают сопротивление деформации.

Значения внутренних сил упругости измеряются напряжениями. Последние зависят от значений приложенных к изделию усилий.

Прочность детали будет обеспечена в том случае, когда действительные напряжения будут меньше или равны допускаемым.

Напряжения могут возникать под действием внешней нагрузки и исчезать после ее снятия или же внутренние, возникающие и уравновешивающиеся без действия внешних сил.

Внутренние напряжения оказывают значительное влияние на свойства металлов и протекающие в них превращения.

Появление внутренних напряжений связано, как правило, с неравномерным распределением деформаций по объему изделия. Так при быстром нагреве или охлаждении из-за неодинакового расширения (сжатия) поверхностных и внутренних слоев появляются тепловые напряжения. Фазовые или структурные напряжения возникают в процессе кристаллизации, при термической обработке вследствие структурных превращений и т. д.

Внутренние напряжения подразделяются на напряжения 1-го рода, возникающие в объеме всего изделия; 2-го рода, возникающие в объеме одного зерна (кристаллита); 3-го рода, возникающие в объемах кристаллической ячейки (субмикроскопические).

Силы, приложенные к изделию, вызывают деформацию металла. Деформация – это изменение геометрии изделия под действием внешних сил, при изменении температуры, влажности, фазовых превращений и др.

Существует два основных вида деформаций – упругие (обратимые) и пластические.

Упругие деформации возникают в том случае, когда под действием приложенных сил происходит незначительное (рис. 10, а) смещение атомов (менее межатомного расстояния). При подобном смещении атомов из положения равновесия нарушается баланс сил притяжения или отталкивания.

Поэтому, после снятия нагрузки, смещенные атомы возвращаются в исходное равновесное положение и кристаллы приобретают свою первоначальную форму и размеры, т. е. влияние упругой деформации на

форму, структуру и свойства изделия полностью аннулируется после прекращения действия нагрузки.

Пластическая (остаточная) деформация после снятия нагрузки остается, так как связана с перемещением атомов внутри кристаллов на относительно большие расстояния. Она вызывает остаточные изменения формы, структуры и свойств металла без макроскопических нарушений сплошности. Пластическая деформация может осуществляться скольжением или двойникованием.

При деформации скольжением (см. рис. 10, б) отдельные части кристалла смещаются относительно друг друга под действием касательных напряжений  $\tau$ , достигающих определенной критической величины.

При деформации двойникованием (см. рис. 10, в) происходит перестройка части кристалла в новое положение, зеркально симметричное к недеформируемой части относительно плоскости А–А, называемой плоскостью двойникования.

Пластическая деформация поликристаллического металла протекает аналогично деформации монокристалла, при этом изменение формы изделия происходит в результате пластической деформации каждого зерна. При значительных деформациях, вследствие скольжения, зерна (кристаллы) меняют свою форму из округлой в вытянутую, образуя, так называемую волокнистую структуры. Под воздействием возрастания напряжения до определенного значения, возникает такая остаточная деформация, при которой появляются трещины, а затем и полное разрушение изделия.

От напряжений и способности сопротивляться деформациям в большой степени зависят механические свойства металлов.

К основным механическим свойствам относятся: **прочность** – сопротивляемость металла деформациям и разрушению; **упругость** – способность металла восстанавливать свою форму и объем после прекращения воздействия причин, вызывающих деформацию; **пластичность** – способность металла под действием внешних сил изменять (не разрушаясь) свою форму и размеры и сохранять остаточные деформации после устранения этих сил; **твёрдость** – сопротивление металла проникновению в него более твердого тела; **ударная вязкость** – способность металла сопротивляться действию ударных нагрузок; **износостойкость** – способность металла истираться от действия сил трения.

Наиболее важные механические свойства материалов определяются при статических и динамических нагрузках.

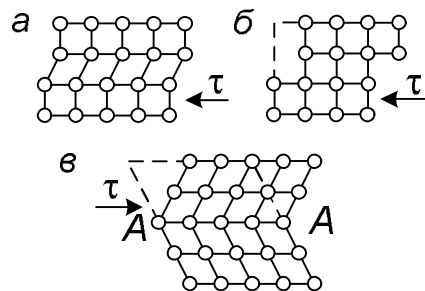


Рис. 10. Схемы деформаций:  
а – упругая; б – скольжением;  
в – двойникованием

### 1.6.1. Механические свойства, определяемые при статических нагрузках

При статических испытаниях предусматривается медленное и плавное нарастание нагрузки, прилагаемой к испытываемому образцу. Наиболее распространены испытания на твердость и растяжение, дающие возможность определения нескольких важных показателей механических свойств.

**Испытания на твердость.** Под твердостью понимается способность материала сопротивляться проникновению в него более твердого тела – индентора. В качестве индентора используется закаленный стальной шарик или алмазный наконечник в виде конуса или пирамиды. На практике наиболее часто используются четыре метода измерения твердости.

**Твердость по Бринеллю.** При этом методе в поверхность испытываемого образца вдавливается закаленный стальной шарик диаметром 10; 5 или 2,5 мм при нагрузке от 5000Н до 30000Н. После снятия нагрузки на поверхности образуется отпечаток в виде сферической лунки диаметром  $d$  (рис. 11, а). Диаметр лунки измеряется мерительной лупой, имеющей на окуляре шкалу с делениями.

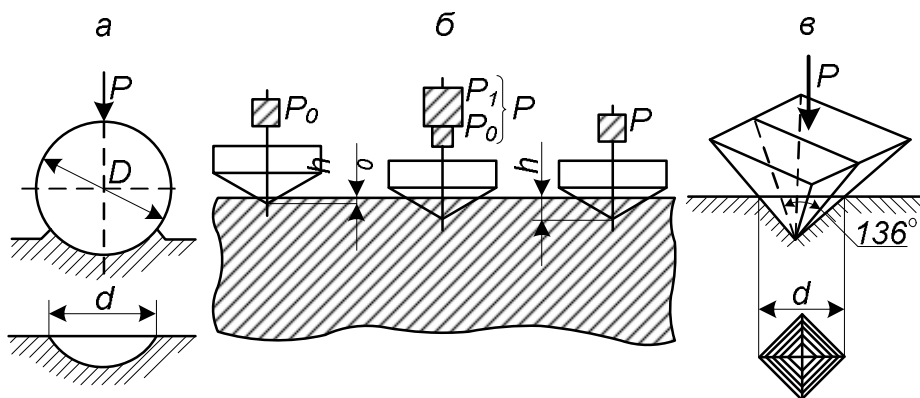


Рис. 11. Схема определения твердости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Число твердости HB определяется делением нагрузки  $P$  на площадь поверхности сферического отпечатка.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где  $D$  – диаметр вдавливаемого шарика.

Число твердости по Бринеллю записывается без единиц измерения (ГОСТ 9012 – 59).

Способ измерения по Бринеллю используется для материалов малой и средней твердости: сталей с твердостью  $\leq 450$  HB, цветных металлов с твердостью  $\leq 200$  HB.

*Твердость по Роквеллу.* При этом методе измерения (ГОСТ 9023 – 59) нет необходимости измерять размеры отпечатка, так как число твердости отчитывается непосредственно по шкале твердомера (рис. 11, б). Число твердости зависит от глубины вдавливания индентора, в качестве которого используется алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм. Прибор Роквелла имеет три измерительные шкалы: А, В, С. Твердость по Роквеллу обозначается цифрами и буквами HR с указанием шкалы твердости, например: 65HRA, 45HRC, 80HRB.

Шкала А используется при нагрузке 600 Н, наконечник – алмазный конус. Она применяется для особо твердых материалов, для тонких листовых материалов или тонких (0,5...1 мм) слоев. Измеренная твердость обозначается HRA. Пределы измерений твердости по этой шкале 70...85.

Шкала В используется при нагрузке 1000 Н, наконечник – стальной шарик. По этой шкале определяется твердость сравнительно мягких материалов. Измеренная твердость обозначается HRB. Пределы измерения 25...100.

Шкала С используется при нагрузке 1500 Н, наконечник – алмазный конус. По этой шкале измеряется твердость, превышающая 450 HB. Твердость обозначается индексом HRC. Пределы измерения 20...67.

*Твердость по Виккерсу.* При этом способе (ГОСТ 2999 – 75) в поверхность образца вдавливается четырехгранная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$ . Отпечаток получается в виде квадрата (рис. 11, в), диагональ которого измеряется после нагрузки. Число твердости рассчитывается по формуле

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2},$$

где  $P$  – нагрузка (10, 30, 50, 100, 200, 500 Н);  $d$  – диагональ квадрата отпечатка, мм.

Метод Виккерса применяется для материалов, имеющих большую твердость, а также для деталей малых сечений или тонких поверхностных слоев.

*Микротвердость.* Этот способ предусматривает вдавливание в поверхность образца алмазной пирамиды с небольшими нагрузками (0,05...5 Н) и измерение диагонали отпечатка. Число твердости  $H$  определяется по той же формуле, что и вычисление числа твердости по Виккерсу. Методом Виккерса оценивается твердость отдельных зерен, структурных составляющих, тонких слоев.

**Испытания на растяжение.** При растяжении стандартных образцов с площадью поперечного сечения  $F_0$  и длиной  $l_0$  строится диаграмма растяжения в координатах нагрузка – удлинение образца (рис. 12), на которой выделяются три участка: упругой деформации до нагрузки  $P_{упр}$ , равномерной пластической деформации (от  $P_{упр}$  до  $P_{max}$ ) и сосредоточенной пластической деформации (от  $P_{max}$  до  $P_k$ ).

Прямолинейный участок сохраняется до нагрузки, соответствующей пределу пропорциональности  $P_{пц}$ . Тангенс угла наклона прямолинейного участка характеризует модуль упругости первого рода.

На участке от  $P_{пц}$  до  $P_{упр}$  линейная зависимость между  $P$  и  $\Delta l$  нарушается из-за упругих несовершенств материала, связанных с дефектами решетки.

Пластическое деформирование выше  $P_{упр}$  идет при возрастающей нагрузке, так как металл в процессе деформирования упрочняется. Такое упрочнение называется наклепом, который увеличивается до разрыва образца, хотя нагрузка при этом уменьшается (рис. 12, а). Это объясняется появлением в испытуемом образце местного уменьшения площади поперечного сечения – шейки.

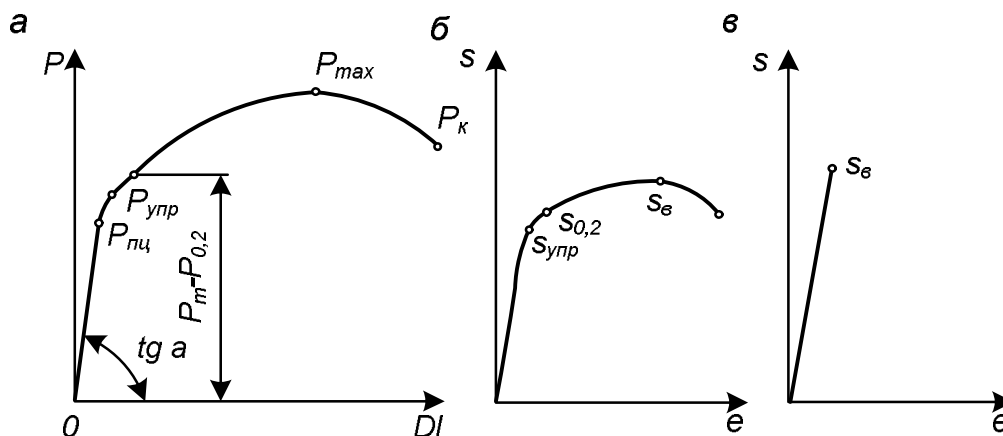


Рис. 12. Диаграмма растяжения пластичного металла (а) и диаграммы условных напряжений пластичного (б) и хрупкого (в) металлов

Истинное напряжение определяется делением действующей в данный момент нагрузки на площадь поперечного сечения образца. Однако на практике истинные напряжения не определяют а используют условные напряжения, считая, что  $F_0$  образца остается постоянным. Напряжения  $\sigma_{упр}$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  (стандартные характеристики прочности) получаются делением  $P_{упр}$ ,  $P_T$  и  $P_{max}$  на  $F_0$  (см. рис. 12, б и в).

Пределом упругости  $\sigma_{упр}$  называется напряжение, при котором пластическая деформация достигает заданного значения. Обычно используются величины пластической деформации, равные 0,005; 0,02 и 0,05 %. Соответственно пределы упругости обозначаются  $\sigma_{0,005}$ ,  $\sigma_{0,02}$ ,  $\sigma_{0,05}$ .

Предел текучести  $\sigma_T$  – это наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки. Условным пределом текучести называется напряжение, при котором пластическая деформация достигает 0,2 %,  $\sigma_{0,2}$ .

Временное сопротивление  $\sigma_B$  – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $P_{max}$ , предшествующей разрушению образца,

$$\sigma_B = P_{max}/F_0.$$

Пластичность характеризуется относительным удлинением  $\delta$  и относительным сужением  $\psi$ :

$$\delta = \frac{\ell_k - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100 \%, \quad \psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \%,$$

где  $\ell_0$  и  $\ell_k$  – начальная и конечная длина образца;  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца;  $F_k$  – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

В качестве характеристики механических свойств качественных сталей часто используются отношения:  $\sigma_T/\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ .

#### 1.6.2. Механические свойства, определяемые при динамических нагрузках

При работе механических устройств (на железнодорожном транспорте в особенности) возможны динамические нагрузки, при которых многие металлы проявляют склонность к хрупкому разрушению. Для его оценки проводятся динамические испытания на ударный изгиб на маятниковых копрах (рис. 13, а). Ударная вязкость определяется работой  $K$ , необходимой для излома образца, отнесенного к рабочей площади его поперечного сечения  $F$ .

Образец устанавливается на двух опорах и затем наносится удар по его середине (рис. 13, б) со стороны противоположной надрезу. Работа, затраченная на разрушение образца,

$$K = Ph(\cos\beta - \cos\alpha),$$

где  $P$  – масса маятника, кг;  $h$  – высота подъема маятника, м;  $\alpha$  – угол подъема маятника перед ударом;  $\beta$  – угол подъема маятника после разрушения образца.

На практике работа  $K$  не рассчитывается, а определяется по шкале копра.

В соответствии с ГОСТ 9454-78 предусматриваются испытания образцов с концентраторами напряжений трех видов: U-образным (радиус надреза  $r = 1 \pm 0,07$  мм); V-образным ( $r = 0,25 \pm 0,025$  мм) и Т-образным (трещина). Соответственно ударная вязкость обозначается: КСU, КСV, КСТ. Единица измерений МДж/м<sup>2</sup>.

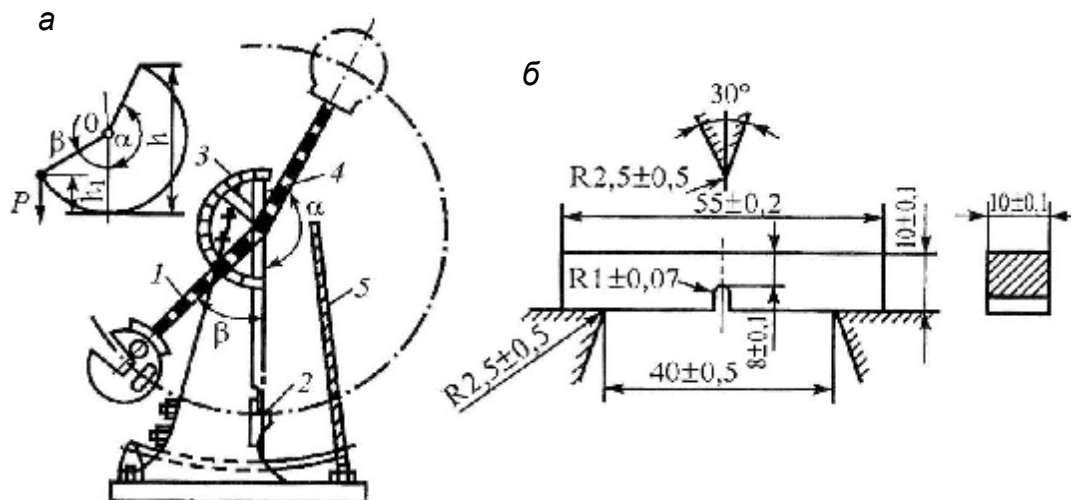


Рис. 13. Схема маятникового копра (а) и образца (б):  
1 – маятник; 2 – образец; 3 – шкала; 4 – стрела; 5 – тормоз

Из всех характеристик механических свойств ударная вязкость дает наиболее полное представление о чувствительности металла к снижению температуры. Поэтому испытания на ударную вязкость при пониженных температурах используются для определения порога хладомокости – температуры или интервала температур, в котором происходит снижение ударной вязкости.

### 1.7. Кристаллизация металлов

В кристаллах металла ионы располагаются правильными рядами и имеют определенную амплитуду колебаний. При повышении температуры амплитуда увеличивается настолько, что правильность рядов нарушается и в жидком металле сохраняется только у ближайших соседей на протяжении нескольких параметров решетки. Одновременно увеличивается число вакансий и смещений.

При охлаждении жидкого металла наблюдается обратная картина. С понижением температуры подвижность ионов падает, и вблизи температуры плавления образуются скопления атомов, в которых они расположены, как в кристаллах, правильными рядами. Такие скопления являются центрами кристаллизации (зародышами). По достижению температуры затвердевания, вновь образуется кристаллическая решетка, и металл переходит в твердое состояние.

Переход металла при определенной температуре из жидкого состояния в твердое называется кристаллизацией. Рассмотрим энергетические условия этого процесса.

Энергетическое состояние любой системы характеризуется определенным запасом внутренней энергии, которая складывается из энергии движения молекул, атомов, электронов, энергии упругих искажений кристаллической решетки и др. Та часть энергии, которая в изотермических условиях может быть превращена в работу называется свободной:  $E = U - TS$ , где  $E$  – свободная энергия,  $U$  – полная внутренняя энергия системы,  $T$  – температура,  $S$  – энтропия. Чем больше свободная энергия системы, тем система менее устойчива.

Согласно второму закону термодинамики всякая система стремится к более устойчивому состоянию, т. е. к минимальному значению свободной энергии. Любой самопроизвольно текущий процесс идет только в том случае, если новое состояние более устойчиво. Например, шарик, поднятый на высоту  $H$ , стремится скатиться вниз по наклонной плоскости, уменьшив при этом свою свободную энергию (рис. 14).

Кристаллизация металлов также подчиняется этому закону: если меньшей свободной энергией обладает твердое тело, то идет процесс кристаллизации и наоборот, при меньшей свободной энергии жидкого состояния – плавление.

Зависимость изменения свободной энергии металла в жидком и твердом состояниях от температуры приведена на рис. 15. С увеличением температуры величина свободной энергии как жидкой, так и твердой фаз уменьшаются, но закон изменения различный.

При температуре  $T_s$  свободные энергии твердой и жидкой фаз равны, что дает возможность их одновременного существования. Такая температура называется равновесной. Чтобы начался процесс кристаллизации необходима разность свободных энергий  $\Delta E_1$  фаз. В соответствии с этим температура  $T_1$ , соответствует температуре кристаллизации.

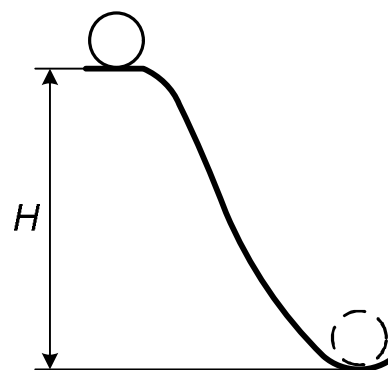


Рис. 14. Изменение свободной энергии

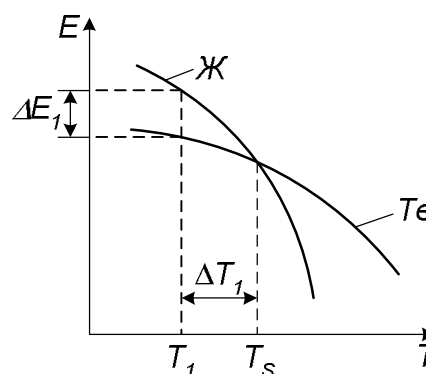


Рис. 15. Изменение свободной энергии  $E$  жидкого  $Ж$  и твердого  $Тв$  металла в зависимости от температуры  $T$  °С

Разность по абсолютной величине между равновесной и температурой кристаллизации называется степенью переохлаждения:  $\Delta T = |T_s - T_1|$ . Чем больше степень переохлаждения  $\Delta T$ , тем больше разность свободных энергий  $\Delta E$ , тем интенсивнее будет идти процесс кристаллизации.

Для исследования процесса кристаллизации пользуются кривыми охлаждения. Металл помещается в тигель из огнеупорного материала и нагревается до жидкого состояния. Потом печь выключается, металл помещается в необходимую охлаждающую среду и записываются кривые охлаждения. В качестве датчика температуры используются термопары.

Сначала происходит охлаждение жидкого металла. Затем в нем появляются первые кристаллы, после чего снижение температуры на некоторое время приостанавливается, несмотря на то, что тигель продолжает терять тепло в окружающую среду. Это тепло компенсируется скрытой теплотой кристаллизации. На кривой охлаждения это соответствует горизонтальной площадке.

Когда кристаллизация заканчивается, температура опять начинает снижаться, твердый металл остывает.

На рис. 16 приведены кривые охлаждения металла при различных степенях переохлаждения. При незначительной степени переохлаждения  $\Delta T_3$  скорость охлаждения  $V_3$  сравнительно мала, и кристаллизация протекает при температуре, близкой к равновесной.

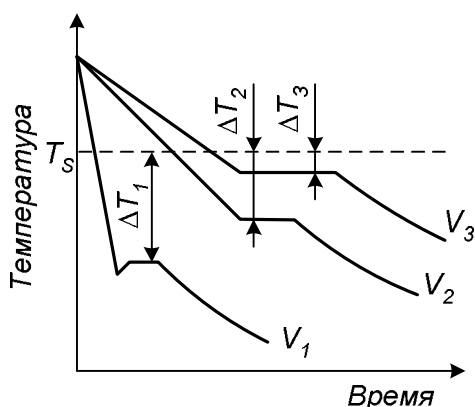


Рис. 16. Зависимости скорости охлаждения металлов  $V$  от степени переохлаждения  $\Delta T$

При увеличении степени переохлаждения кривые  $V_2$  и  $V_1$  скорости охлаждения увеличиваются. Кристаллизация происходит при более низкой температуре и в течение более короткого времени. Следует отметить, что чем чище металл, тем степень переохлаждения выше.

Впервые глубокие исследования процесса кристаллизации были проведены русским инженером-металлургом Д.К. Черновым в 1878 г. Он показал, что процесс кристаллизации складывается из двух этапов: образования центров и роста кристаллов из этих центров.

При снижении температуры жидкого металла до температуры кристаллизации группы атомов с упорядоченным расположением становятся устойчивыми и начинают обрастать новыми слоями, т. е. они становятся центрами кристаллизации. Кристаллы свободно растут до тех пор, пока со всех сторон их окружает жидкий металл. Когда кристаллов становится много, они мешают взаимному росту. Поэтому кристаллы в металле имеют неправильную форму.

Предположим, что за первую секунду на площади квадрата возникли пять зародышей (рис. 17). К концу второй секунды эти зародыши выросли и одновременно возникли еще пять, уже на четвертой секунде кристаллы начинают мешать взаимному росту.

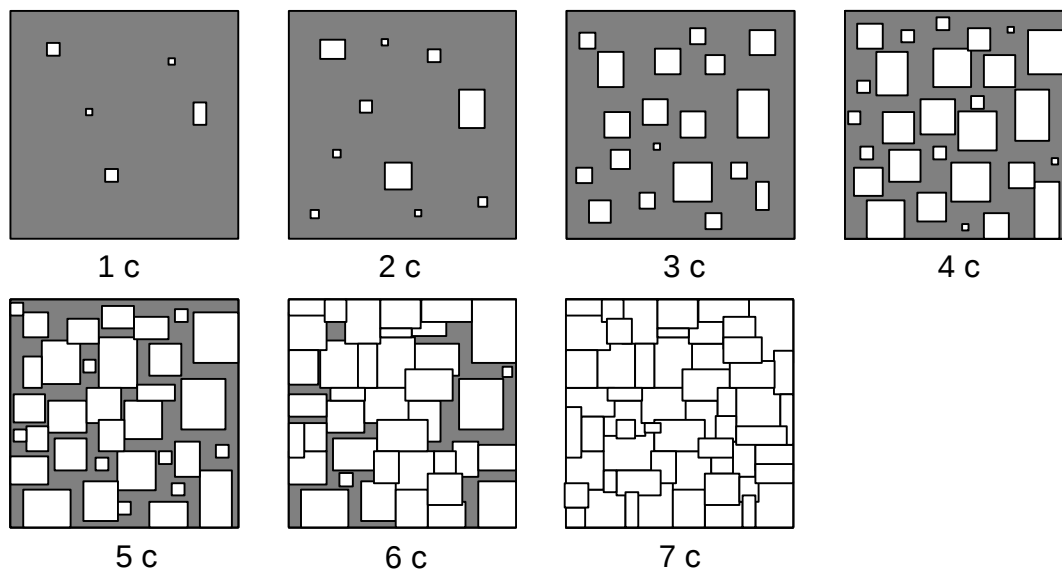


Рис. 17. Схема процесса кристаллизации (И.А. Миркин)

На седьмой секунде процесс кристаллизации заканчивается. Как видно из схемы, по мере развития процесса в нем участвует все большее число кристаллов. Поэтому в начальный момент кристаллизация идет более интенсивно. После того, как половина жидкой фазы перейдет в твердую взаимное препятствие росту кристаллов замедляет процесс кристаллизации. Этому же способствует и небольшое количество оставшегося жидкого металла.

Скорость процесса кристаллизации количественно характеризуется скоростью зарождения центров и скоростью роста кристаллов. Число зарождающихся в единицу времени центров кристаллизации (Ч.Ц.) имеет размерность  $1/\text{мм}^3\text{с}$  (число центров, возникающих в  $1 \text{ мм}^3$  за секунду). Скорость роста кристаллов (С.Р.) — это увеличение линейных размеров кристалла в единицу времени (м/ч). Число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов зависят от степени переохлаждения (рис. 18).

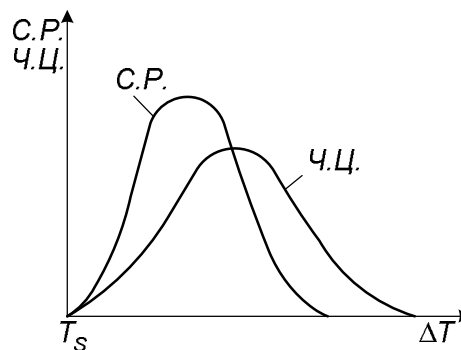


Рис. 18. Зависимость числа центров кристаллизации (Ч.Ц.) и скорости роста кристаллов (С.Р.) от степени переохлаждения ( $\Delta T$ )

При равновесной температуре ( $\Delta T = 0$ ) значения С.Р. и Ч.Ц. равны нулю. Поэтому процесс кристаллизации идти не может. При увеличении степени переохлаждения увеличивается разность свободных энергий твердой и жидкой фаз (см. рис. 15), что ведет к увеличению Ч.Ц. и С.Р.

Когда степень переохлаждения достигает больших значений (при низких температурах) подвижность атомов уменьшается, а это снижает Ч.Ц. и С.Р., т. е. способность системы к превращению уменьшается. От соотношения величин С.Р. и Ч.Ц. при определенной степени переохлаждения зависят размеры кристаллов. При большом значении С.Р. и малом Ч.Ц. (малая степень переохлаждения) образуются немногочисленные крупные кристаллы. И, наоборот, при больших величинах  $\Delta T$  число центров велико, а скорость роста мала. Поэтому образуется большое число мелких кристаллов. При очень большой степени переохлаждения (при Ч.Ц. и С.Р. равным нулю) образуется аморфный металл. Диаметр зерна ( $d_3$ ) можно определить из следующей зависимости  $d_3 = 1,1 (С.Р./Ч.Ц.)^{3/4}$ .

Большую роль в количестве центров кристаллизации технических металлов и сплавов играют различные включения, попадающие при плавке или вводимые специально. Такой метод является наиболее рациональным для регулирования размеров зерен, их формы, а, следовательно, и свойств. Процесс искусственного регулирования размеров и форм зерен за счет введения дополнительных элементов называется модифицированием, а вводимые компоненты – модификаторами. Наиболее часто в качестве модификаторов для стали используются алюминий, титан, ванадий; для чугунов – магний, церий.

Кристаллизация в формах и отливках идет в стороны противоположные отводу тепла, т. е. перпендикулярно стенкам и дну. Вначале в этих направлениях образуется как бы ствол будущего кристалла, называемый осью первого порядка. Одновременно на их ребрах происходит рост осей второго порядка, перпендикулярных первым. Затем зарождаются и развиваются оси третьего порядка и т. д. В итоге образуется древовидный кристалл, называемый дендритом (рис. 19).

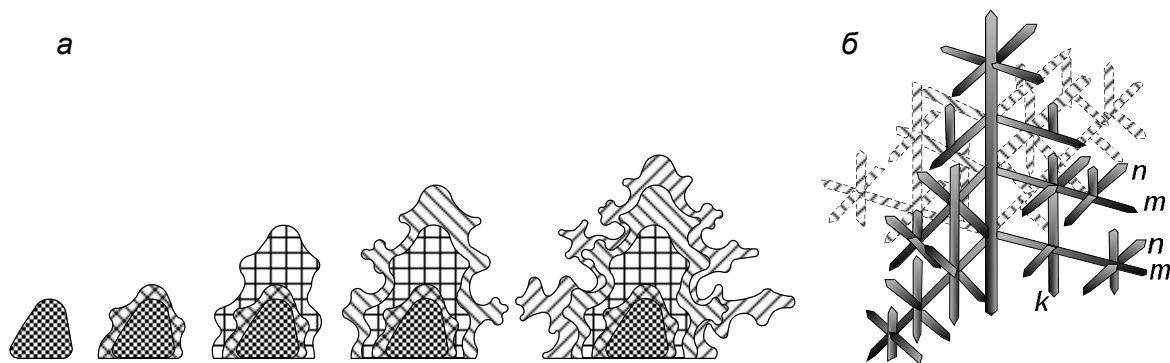


Рис. 19. Схемы образования дендрита: а – по А.А. Бочвару; б – по Д.К. Чернову

Рассмотрим процесс кристаллизации жидкой стали при разливке ее в формы, называемые изложницами.

К концу процесса производства стали из нее обязательно удаляется кислород, который находится в виде закиси железа  $\text{FeO}$ , т. е. сталь раскисляется. Иначе сплав будет иметь низкие механические и эксплуатационные свойства. Высокий конечный результат достигается тогда, когда сталь вначале раскисляется ферромарганцем, затем ферросилицием и заканчивается алюминием. В этом случае при кристаллизации слитка бурного выделения газов не происходит, сталь получается плотной, высокого качества и называется спокойной (СП).

Кристаллизация начинается при значительной степени переохлаждения, особенно у наружных стенок и дна. В этой зоне образуется большое число центров кристаллизации, и сплав приобретает большое количество мелких произвольно ориентированных кристаллов (рис. 20, зона I).

На слое из мелких кристаллов растет второй слой (зона II), имеющий древовидную форму и направление, перпендикулярное стенкам изложницы. Это оси первого порядка. На них под определенными углами разрабатываются поперечные оси второго порядка. На них в свою очередь оси третьего порядка и т. д. В итоге в закристаллизовавшемся слитке дендриты превращаются в столбчатые кристаллы. Средняя часть дендрита, которая образуется из жидкого металла раньше его периферийных областей, содержит меньше примесей. В оси

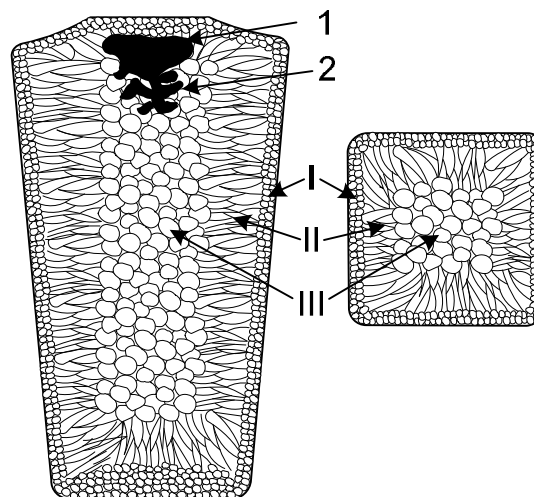


Рис. 20. Схема слитка спокойной стали

первого порядка при кристаллизации переходят, прежде всего, тугоплавкие компоненты, а жидкая часть обогащается легкоплавкими. Поэтому внешние области дендрита содержат подобные компоненты в большом количестве. Вследствие такой неравномерной кристаллизации дендритов химический состав в разных местах одного и того же кристалла получается неоднородным. Такая неоднородность называется внутрикристаллической или дендритной ликвацией, а неоднородность, вызываемая кристаллизацией сплава по зонам, называется зональной или макроскопической. В средней части слитка (зона III) отвод тепла происходит сравнительно равномерно во все стороны с небольшими степенями переохлаждения. Поэтому образуются крупные кристаллы с произвольной ориентацией.

В начале кристаллизации на поверхности жидкого металла образуется тонкая корочка. При переходе из жидкого состояния в твердое сплав уменьшается в объеме, корочка на поверхности прогибается, и под ней

образуется усадочная раковина 1, заполненная газами. Под усадочной раковиной переплетение кристаллов образует усадочную рыхлоту 2 в связи с тем, что последние порции жидкой фазы прошли вниз для заполнения промежутков между кристаллами.

После кристаллизации верхняя часть слитка спокойной стали отрезается и отправляется в переплав. В зависимости от состава стали и формы слитка отходы составляют до 25 %, что делает ее существенно дороже.

Для уменьшения отходов производится кипящая сталь (КП). Такая сталь до разливки раскисляется только ферромарганцем и по химическому составу отличается от спокойной: она практически не содержит кремния (менее 0,05 %). В то время как спокойная сталь содержит кремния нормальное количество (0,12...0,30 %).

После разливки кипящей стали в изложницы, еще в жидком состоянии протекает реакция самораскисления:  $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ . Выделяющаяся окись углерода перемешивает жидкий металл, он бурлит, в процессе кристаллизации, чем создается впечатление его кипения. В результате в слитке усадочная раковина отсутствует и резко возрастает выход годного (практически до 100 %). Однако после кристаллизации в металле имеются многочисленные газовые пузыри. В процессе дальнейшей обработки слитка давлением (прокатка, ковка, штамповка и др.) газовые пузыри завариваются, но места сварки краев пузырей уступают по прочности целому металлу. Поэтому кипящая сталь, как правило, используется для массовых неответственных изделий (проволока, метизы, листы общего назначения). Применение такой стали для ответственных деталей и конструкций не допускается.

Промежуточное положение по качеству занимают полуспокойные стали (ПС), которые раскисляются марганцем и алюминием.

Многие дефекты слитка, сформированного при разливке в изложницы, исключаются при непрерывной разливке заключающейся в том, что жидкая сталь из ковша 1 через промежуточное разливочное устройство 2 непрерывно подается в водоохлаждаемую изложницу без дна – кристаллизатор 3, из нижней части которого вытягивается затвердевающий слиток 4 (рис. 21). Перед заливкой металла в кристаллизатор вводится затравка, образующая его дно. Жидкий металл, попадая в кристаллизатор и на затравку, охлаждается, затвердевает и соединяется с затравкой. Последняя тянущими валками 5 вытягивается из кристаллизатора вместе с затвердевающим слитком, сердцевина которого еще жидкая.

На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается водой в зоне вторичного охлаждения. Затем затвердевший слиток попадает в зону 7 резки, где раскраивается на куски заданной длины.

Непрерывное литье имеет следующие основные преимущества: сокращаются отходы до 5 % из-за отсутствия усадочных раковин; на 20 % повышается выход годного металла; сокращается потребность в рабо-

чей силе, облегчается труд, повышается производительность труда; ускоренное затвердевание слитка устраняет внеосевую ликвацию и обеспечивает большую однородность заготовки, повышается качество металла; процесс разливки легко поддается механизации и автоматизации.

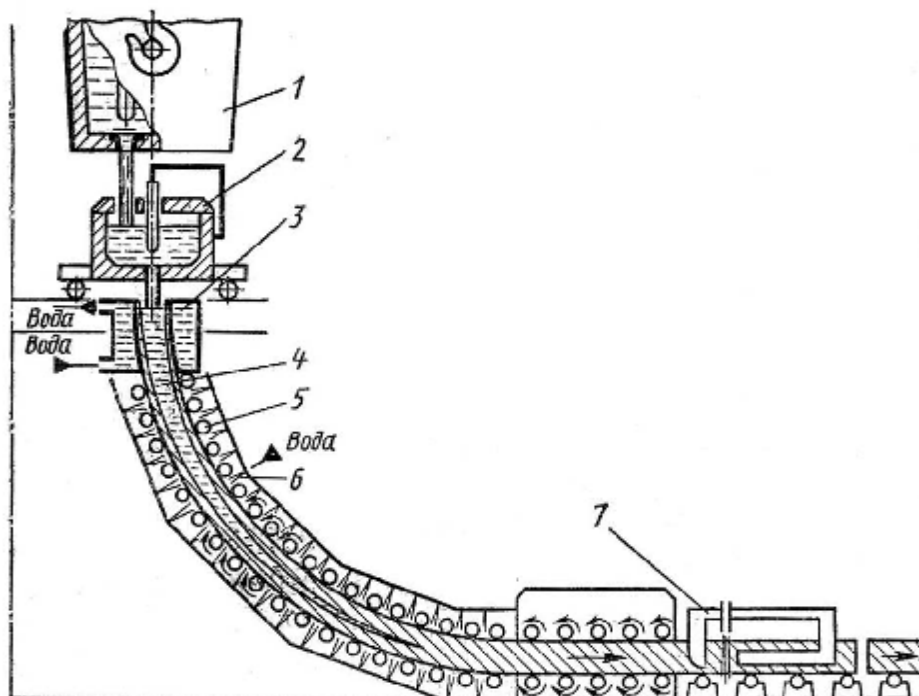


Рис. 21. Схема машины непрерывного литья заготовок

Для повышения качества металла используются такие технологии как обработка синтетическим шлаком, вакуумная дегазация, плавка в вакуумных печах, плавка в плазменно-дуговых печах и др.

При обработке синтетическим шлаком (основа – 55 % CaO и 40 %  $Al_2O_3$ ) его расплавляют и заливают в ковш. В этот же ковш следом заливается жидкая сталь. При перемещении стали и шлака поверхность их взаимодействия резко возрастает и реакции между ними протекают гораздо быстрее. Благодаря этому сталь содержит меньше серы, кислорода и неметаллических включений, улучшается ее пластичность и прочность.

Вакуумная дегазация стали проводится для уменьшения содержания в металле газов и неметаллических включений. Вакуумирование стали производится в ковше, при переливке из ковша в ковш, при заливке в изложницу и т. д. При вакуумировании в ковше он с жидкой сталью помещается в камеру, закрываемую герметичной крышкой. Вакуумными насосами в камере создается разрежение. При пониженном давлении из жидкой стали выделяются водород и азот. Всплывающие пузырьки газа захватывают неметаллические включения, в результате чего их содержание в стали снижается. Все это улучшает прочность и пластичность стали.

Плавка стали в плазменно-дуговых печах применяется для получения высококачественных сталей и других сплавов. Источником тепла в этих печах является низкотемпературная плазма (30000 °С). В этих печах можно создавать нейтрализующую среду заданного состава (аргон, гелий). Плазменно-дуговая печь дает возможность быстро расплавить шихту, а нейтральная газовая среда способствует дегазации выплавляемого металла. Легкоиспаряемые элементы, входящие в его состав, не испаряются.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой материал называется металлом? Каковы его отличительные свойства?
2. Что называется элементарной кристаллической ячейкой? Назовите основные типы кристаллических ячеек.
3. Какие превращения металлов называются полиморфными? Каково практическое значение полиморфизма?
4. Назовите наиболее распространенные дефекты металлов.
5. Каковы основные механические свойства металлов?
6. Что называется твердостью?
7. Что принимается за единицу твердости по Бринеллю?
8. Что принимается за единицу твердости по Роквеллу?
9. Что называется степенью переохлаждения металлов? Какое практическое значение она имеет?
10. Что называется раскислением стали? Какова его основная цель?
11. Какие стали называются спокойными, полуспокойными, кипящими?
12. В чем сущность непрерывной разливки?

## **2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ СПЛАВОВ**

### **2.1. Виды сплавов**

С незапамятных времен люди, совершенствуясь в обращении с металлами, сделали очень важное открытие: если расплавить два металла (или их руды) вместе и дать жидкой массе застыть, то получится новый сплав со свойствами, отличными от свойств исходного материала. Так были открыты древние бронзы – сплавы меди с оловом, свинцом, мышьяком. Орудия из бронзы намного превосходили медные и долго удерживали за собой пальму первенства. Но в третьем тысячелетии до нашей эры началось постепенное вытеснение бронз железом, которое было еще практичнее. Вначале его распространение сдерживалось исключительной дороговизной – железо ценилось буквально на вес золота. Открытие дешевых способов выплавки положило начало триумфальному шествию железа и особенно его сплавов, которое продолжается и по сей день.

Чистые металлы в технических устройствах используются крайне редко по причине их низких свойств. Последние можно существенно изменять в широком диапазоне с помощью добавки в них других элементов, т. е. путем создания сплавов. Такие добавки, иногда даже в незначительном количестве, кардинально изменяют свойства металлов. Например, чистый цирконий легко пропускает нейтроны. Поэтому из него изготавливают оболочки урановых стержней для реакторов. Однако, присутствие в цирконии гафния в количестве всего 0,02 % снижает нейтронную прозрачность в 6...7 раз. Добавки того же циркония в стали и бронзы повышает их тепло- и электропроводность до уровня меди.

**Сплавом** (в упрощенном понятии этого термина) называется *вещество, полученное сплавлением двух или более элементов*. В настоящее время он имеет более широкое значение. Раньше материалы, содержащие несколько элементов, получали преимущественно путем сплавления. В настоящее время для этого используется много различных технологических способов: порошковая металлургия (прессование твердых частиц с последующим их спеканием при высоких температурах), диффузионный метод (проникновение одного вещества в другое твердое вещество при высоких температурах), плазменное напыление и др. Преимущественное использование в промышленности находят сплавы металлов с металлами или неметаллами. В сплавах элементы могут по-разному взаимодействовать между собой с образованием различных по химическому составу и строению кристаллических фаз.

Следовательно, фаза – это однородная часть сплава, имеющая определенный состав, свойства, тип кристаллической решетки и границу раздела, при переходе которой свойства скачкообразно изменяются (рис. 22).

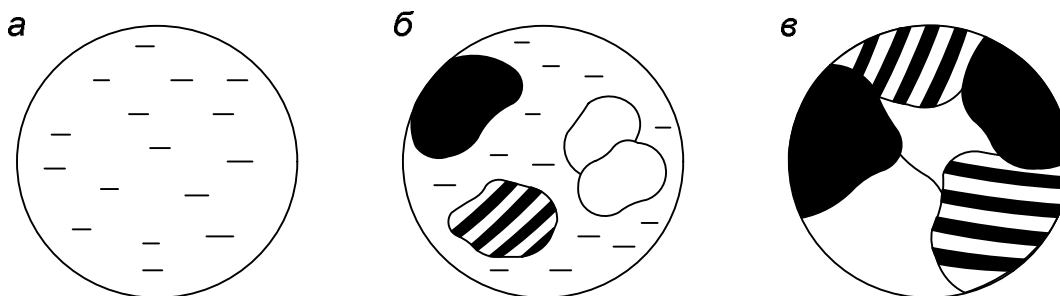


Рис. 22. Виды систем сплавов: а – однофазная; б – трехфазная; в – двухфазная; – жидкий расплав; – кристаллы компонента А; – кристаллы компонента Б

Диффузия компонентов может происходить в жидком, твердом или газообразном состоянии. Как правило, металлические сплавы получают путем расплавления двух или нескольких компонентов с последующей кристаллизацией.

В зависимости от числа компонентов, сплавы могут быть двух-, трех- или многокомпонентными. Компоненты в сплаве, находящиеся в жидком виде, пребывают обычно в атомарном состоянии, образуя неограниченный раствор с одинаковыми химическими свойствами по всему объему (однофазная система).

В процессе кристаллизации атомы образуют твердый сплав, при этом взаимодействие между ними может быть различным (рис. 23).

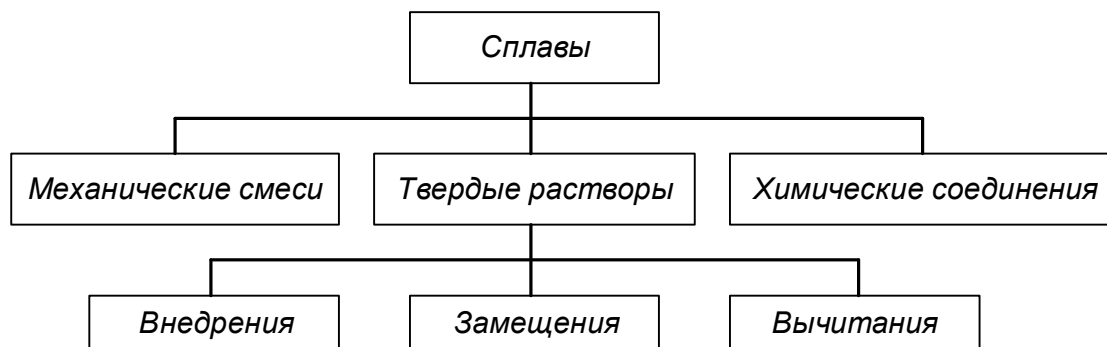


Рис. 23. Виды сплавов

При образовании сплавов в виде механической смеси атомы каждого компонента формируют свои кристаллические решетки и образуют смесь кристаллов двух или нескольких чистых компонентов (рис. 24).

Свойства механических смесей зависят от количественного соотношения компонентов, размера и формы зерен.

Твердые растворы являются системами однородными, имеют кристаллическую решетку элемента растворителя, то есть компонента, на основе которого формируется сплав, а атомы компонента растворимого или внедряются в решетку растворителя, или частично замещают его места. В первом случае образуется твердый раствор внедрения, а во втором – твердый раствор замещения.

Рис. 24. Схема микроструктуры механической смеси: ■ – кристаллы компонента А; □ – кристаллы компонента Б

Образование общей кристаллической решетки из атомов разных элементов, имеющих различные диаметры, ведет к искажению решетки, изменению энергетического состояния атомов. В этой связи свойства сплавов отличаются от свойств элементов, из которых они состоят.

В твердых растворах внедрения атомы растворенного элемента распределяются в решетке растворителя (рис. 25). Это возможно, если внедряемые атомы имеют малые размеры. Все твердые растворы внедрения обладают ограниченной растворимостью.

В твердых растворах замещения атомы компонента растворимого занимают часть узлов в кристаллической решетке компонента растворителя. При образовании таких твердых растворов размеры решетки изменяются в зависимости от диаметров растворителя и растворенного элемента. Если атом растворенного элемента меньше атома растворителя (рис. 26, а) элементарная ячейка решетки уменьшается, если больше (рис. 26, б), то увеличивается.

Твердые растворы замещения могут быть неограниченными и ограниченными. В первом случае любое количество атомов одного элемента может быть замещено атомами другого, и если увеличивать его концентрацию все больше, то плавно совершится переход от одного элемента к другому через ряд сплавов. Такое явление возможно в том случае, когда оба металла имеют одинаковую кристаллическую решетку, несущественно отличающиеся радиусы атомов и свойства растворителя и растворимого.

Если у металлов с одинаковыми кристаллическими решетками атомные радиусы отличаются существенно, то это ведет к большому искажению решетки и накоплению в ней упругой энергии. Когда искажения достигают очень большой величины, решетка становится неустойчивой и наступает предел растворимости.

Твердые растворы вычитания образуются на основе химических соединений. В этом случае при кристаллизации формируется решетка химического соединения  $A_mB_n$ , а избыточное количество атомов одного из компонентов (например А) заменяет в решетке какое-то количество атомов компонента В. Возможно растворение в химическом соединении и третьего элемента С. В этом случае атомы компонента С заменяют в узлах решетки атомы компонентов А или В.

Иногда твердые растворы на основе химического соединения получаются путем образования пустых мест в узлах кристаллической решетки. Такие растворы называются твердыми растворами вычитания.

Твердые растворы внедрения и замещения обозначаются символами  $A(B)$ , где А – компонент растворитель, а В – компонент растворимое. Например, ограниченный твердый раствор углерода в железе обозначается  $Fe(C)$ . При кристаллизации такого раствора формируется решетка железа, а атомы углерода внедряются в эту решетку.

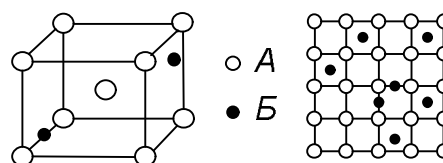


Рис. 25. Схема решетки твердого раствора внедрения: А – атом компонента растворителя; Б – атом компонента растворимого

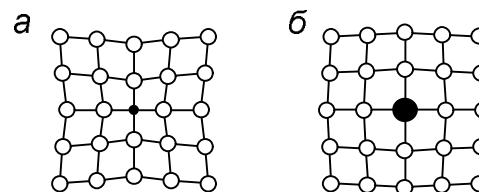


Рис. 26. Схема искажений кристаллических решеток твердых растворов замещения: а – атом элемента растворимого меньше атомов элемента растворителя; б – атом элемента растворимого больше атомов растворителя

Химическое соединение – это однородная система, у которой кристаллическая решетка отличается от решеток формирующих ее компонентов.

При образовании химического соединения соотношение атомов элементов, его составляющих соответствует стехиометрической (от греч. Stoicheion элемент и ...метрия) пропорции, то есть имеет место количественное соотношение между массами веществ, вступающих в химическую реакцию. В общем виде химическое соединение двух элементов можно обозначить простой формулой  $A_nB_m$ .

Химическое соединение имеет определенную температуру плавления. Его свойства (изменяющиеся скачкообразно) резко отличаются от свойств входящих в него элементов.

В случае образования химического соединения только металлическими элементами образуется металлическая связь, а при образовании соединения металла с неметаллом – ионная.

## 2.2. Диаграммы состояния двойных сплавов

### 2.2.1. Общие положения

При установлении режимов горячей обработки сплавов (прокатка,ковка,штамповка,прессование и др.), термической обработки (отжиг,закалка,нормализация и др.) необходимы сведения о превращениях структуры, ее количественных и качественных изменениях при изменении температуры. Для оценки свойств сплава важно знать не только структуру фаз, но и доли массы, которую они занимают.

Если в твердом состоянии при изменении температуры не происходит изменений в строении сплава, то термическая обработка в большинстве случаев теряет смысл. Графическую зависимость состояния сплавов определенной системы от концентрации компонентов (химического состава) и температуры устанавливают диаграммы состояний. По диаграмме можно определить, при какой температуре происходит затвердевание сплава, какие превращения происходят при нагреве и охлаждении, количественный и качественный состав фаз и др.

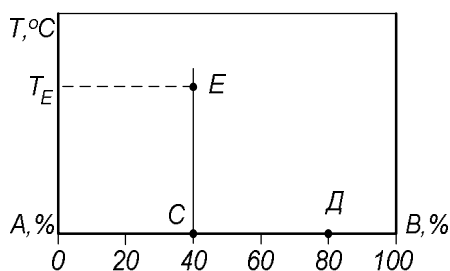


Рис. 27. Координаты для изображения состояний двухкомпонентной системы

Диаграмма двухкомпонентного сплава строится в двух измерениях: температура – концентрация (рис. 27). По оси ординат откладывается температура, а по оси абсцисс – концентрация. Общее содержание компонентов в любом сплаве составляет 100 %. Левая крайняя точка А по оси концентраций соответствует 100 %-му содержанию компонента А. Процентное содержание второго компонента откладывается по этой оси слева направо. Правая крайняя

точка В соответствует 100 %-му содержанию второго компонента В. Каждая промежуточная точка на оси абсцисс соответствует определенному содержанию сплава. Например, в точке С сплав состоит из 40 % компонента В и 60 % компонента А. В точке Д – 80 % компонента В и 20 % компонента А, и т. д. Следовательно, по мере удаления от точки А увеличивается количество компонента В и наоборот.

Ось ординат показывает изменение температуры, и каждая точка на оси (например точка Е) соответствует определенному фазовому состоянию рассматриваемого сплава при определенной температуре  $T_E$ .

### 2.2.2. Порядок построения диаграмм

Диаграммы состояния обычно строятся по экспериментальным данным термического анализа и исследованию структур сплавов в твердом состоянии.

Из исследуемых компонентов изготавливается серия сплавов разного химического состава, и для каждого из них строится кривая охлаждения. Температура измеряется обычно термопарой (рис. 28). В нагревательное устройство 1 помещается тигель 2, в котором находится исследуемый сплав. После его расплавления в тигель погружается горячий спай термопары 3 и производится медленное охлаждение. Через определенные промежутки времени производится фиксация температуры и строится кривая охлаждения (рис. 29). Из рисунка видно, что на кривой имеется две характерные точки  $t_1$  и  $t_2$ . При  $t_1$  падение температуры сплава замедляется. Это свидетельствует о том, что начался процесс с выделением такого количества тепла, которое частично компенсирует тепло, отводимое в окружающую среду. При температуре  $t_2$  выделение тепла идет настолько интенсивно, что компенсирует потери в окружающее пространство полностью. В данном случае при температуре  $t_1$  начинается кристаллизация сплава, а при температуре  $t_2$  заканчивается. Эти температуры называются критическими температурами или критическими точками.

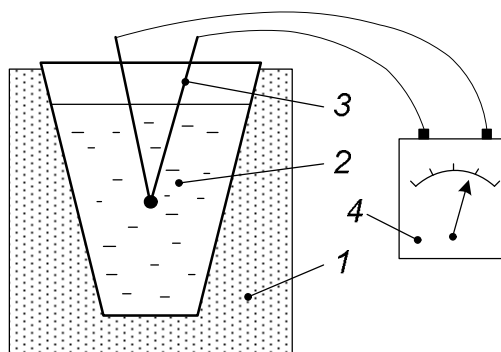


Рис. 28. Схема установки для построения кривых охлаждения: 1 – нагревательное устройство; 2 – тигель; 3 – термопара; 4 – гальванометр

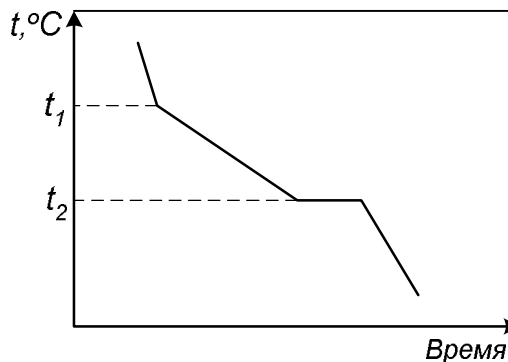


Рис. 29. Кривая охлаждения сплава

Рассмотрим построение диаграммы на конкретном примере. Пусть имеется сплав состоящий из двух компонентов А и В, которые неограниченно растворимы в жидком состоянии, но в твердом взаимно не растворимы и не образуют друг с другом химических соединений. Из этих двух компонентов создана серия сплавов различного химического состава, и для них получены критические температуры начала  $t_1$  и конца  $t_2$  кристаллизации (табл. 1).

Таблица 1

**Температуры начала и конца кристаллизации сплавов**

| Номер сплава | Состав сплава   | Температура кристаллизации |                  |
|--------------|-----------------|----------------------------|------------------|
|              |                 | Начала $t_1$ , °С          | Конца $t_2$ , °С |
| I            | 100 % А         | 350                        | 350              |
| II           | 90 % А + 10 % В | 325                        | 170              |
| III          | 70 % А + 30 % В | 240                        | 170              |
| IV           | 60 % А + 40 % В | 170                        | 170              |
| V            | 40 % А + 60 % В | 300                        | 170              |
| VI           | 10 % А + 90 % В | 420                        | 170              |
| VII          | 100 % В         | 450                        | 450              |

По данным табл. 1 строятся кривые охлаждения каждого сплава (рис. 30, а). Верхние точки кривых (1,1') соответствуют *температурам начала затвердевания сплавов* и называются *температурами ликвидуса*. Нижние точки (2,2') соответствуют *температурам конца затвердевания* и носят название *температур солидуса*.

При построении диаграммы состояния сплавов на планшет в координатах «температура – концентрация» наносятся значения критических температур для каждого исследуемого сплава (рис. 30, б). Затем соединяя точки начала кристаллизации получают линию ликвидус (СДЕ), а при соединении точек конца кристаллизации – линию солидус (ФДК). Таким образом, линии ликвидус и солидус представляют собой семейство точек соответствующих началу и концу кристаллизации многочисленных сплавов с различным содержанием компонентов. Выше температур, образующих линию ликвидус все сплавы данной системы находятся в жидком состоянии, а ниже линии солидус – в твердом. При температурах между этими линиями сплавы находятся в полужидком состоянии, т. е. в жидком расплаве находятся твердые фазы.

Следовательно, диаграмма показывает состояние сплава при любом соотношении содержания компонентов А и В и при любой температуре.

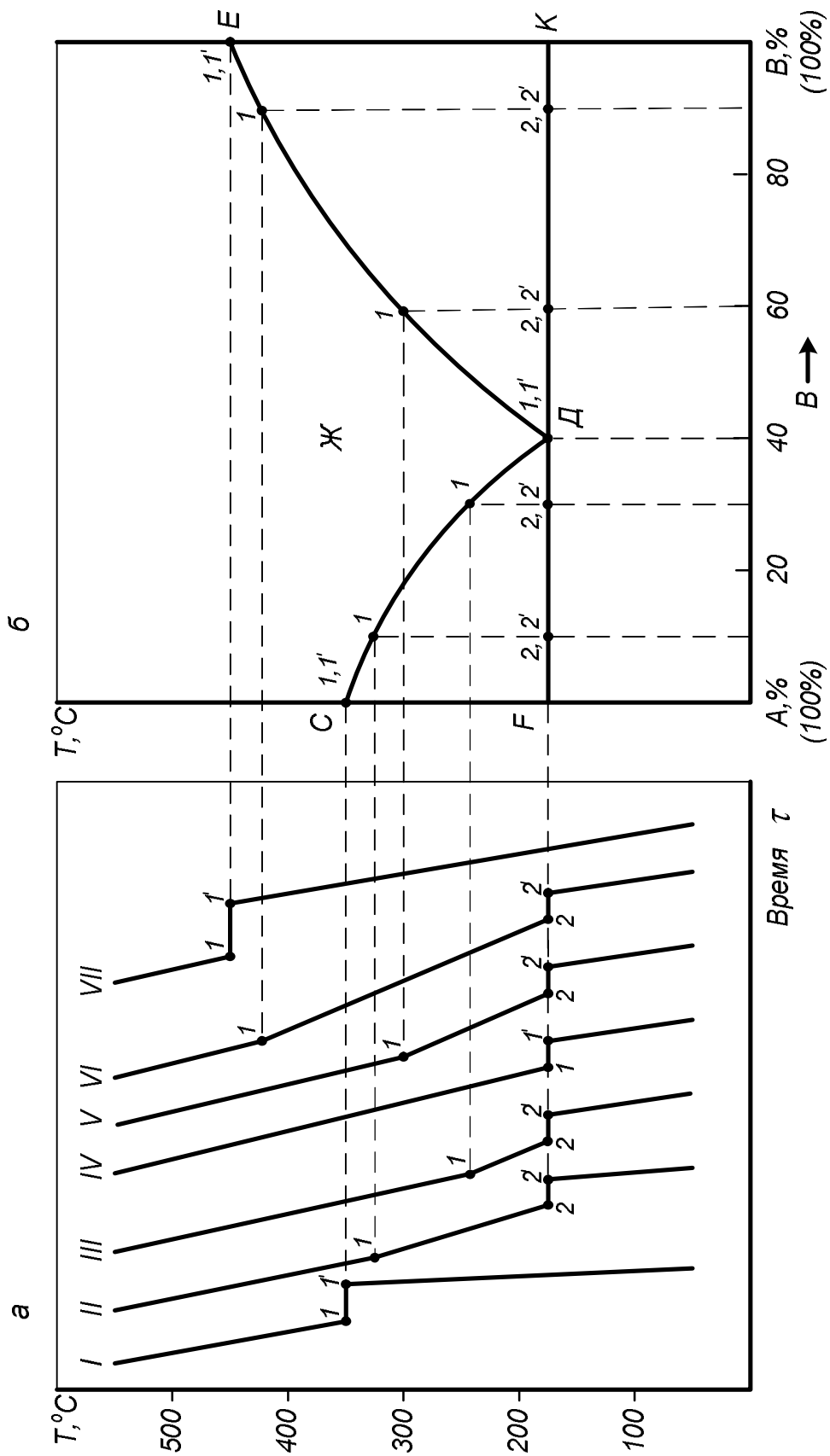


Рис. 30. Порядок построения диаграммы состояния: а - кривые охлаждения сплавов; б - диаграмма состояния двухкомпонентного сплава

Диаграммы дают возможность определять, какую структуру будут иметь медленно охлажденные сплавы, а также решать вопросы термической обработки, выясняя возможно ли при ее выполнении изменение микроструктуры. А поскольку технологические и эксплуатационные свойства сплавов тесно связаны с их микроструктурой, то для практического металловедения диаграммы играют очень большую роль.

### 2.2.3. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой образуют механические смеси (I рода)

Диаграмма состояния сплавов (рис. 31) строится на основании компонентов А и Б, фаз: жидкости Ж, кристаллов компонента А и кристаллов компонента В.

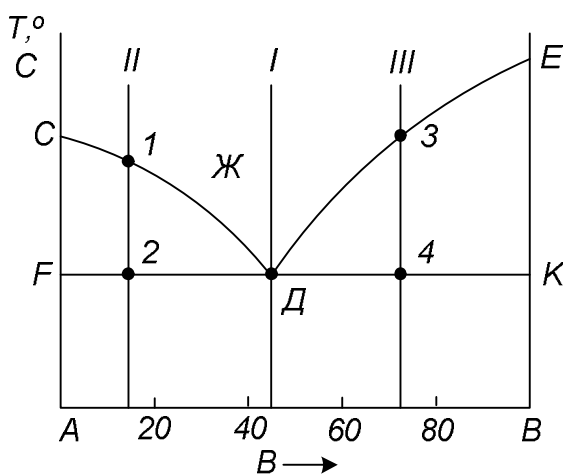


Рис. 31. Диаграмма состояния сплавов

Линия СДЕ – линия ликвидус, линия ФДК – линия солидус.

Наиболее характерным на диаграмме является сплав, кристаллизующийся в точке Д с одновременным выделением кристаллов компонента А и компонента В. Такая механическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкой фазы, называется эвтектикой, т. е. легкоплавящейся (от греч. eutektos). Эвтектика образуется при строго

определенном количественном соотношении компонентов (в данном случае соответствующем точке Д). Следовательно, сплав I при охлаждении до температуры, соответствующей точке Д, имеет жидкую фазу, а в точке Д кристаллизуется в эвтектику, которая обозначается Эвт [А+В] (рис. 32, а). Сплавы диаграммы, находящиеся левее эвтектического, называются доэвтектическими, а правее – заэвтектическими.

В доэвтектическом сплаве II (рис. 31) при охлаждении до температуры, соответствующей точке 1, начинают выделяться кристаллы компонента А. Следовательно, концентрация этого компонента в остающейся жидкой фазе понижается.

При достижении температуры солидуса (линия ФДК) концентрация компонентов жидкой составляющей будет соответствовать эвтектической, в результате чего по окончании кристаллизации сплав образует эвтектику с находящимися в ней кристаллами чистого компонента А (рис. 32, б).

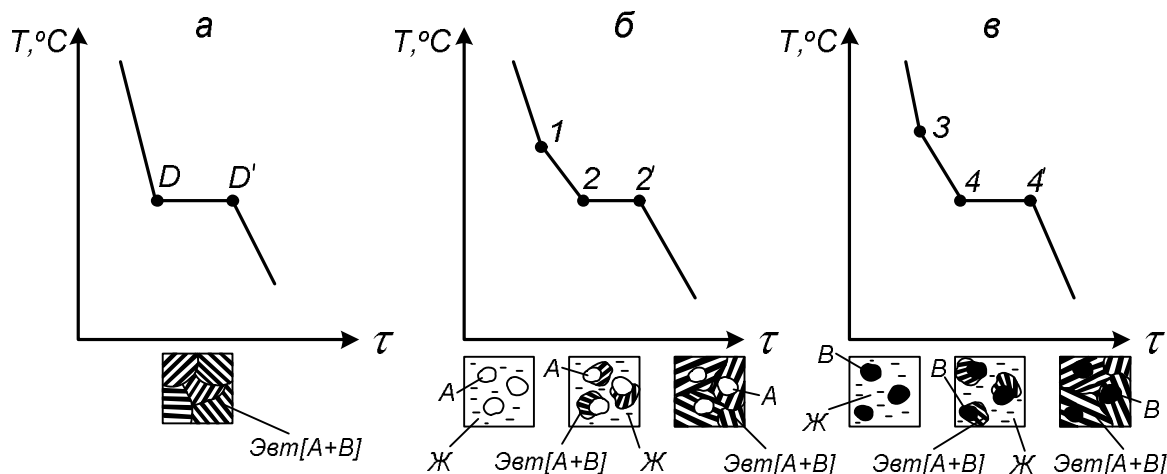


Рис. 32. Кривые охлаждения сплавов: а – эвтектического; б – доэвтектического; в – заэвтектического

Процесс кристаллизации заэвтектического сплава III протекает аналогично сплаву II. Разница состоит лишь в том, что при температуре ликвидус (точка 3) из жидкой фазы выделяются кристаллы чистого компонента В. По окончании кристаллизации сплав состоит из эвтектики Эвт [А+В] с расположенными в ней кристаллами компонента В (рис. 32, в).

#### 2.2.4. Правило отрезков

В процессе кристаллизации при понижении температуры количество и концентрация фаз постоянно изменяются. Так, сплав Н (рис. 33) при температуре выше  $t_1$  находится в однофазном жидком состоянии. При температуре ниже  $t_1$  из жидкого расплава начинают выделяться твердые кристаллы компонента А, и сплав переходит в двухфазное состояние. При дальнейшем понижении температуры количество твердой фазы увеличивается, в результате чего концентрация компонента А в жидкой фазе уменьшается, а компонента В повышается. При температуре  $t_0$  концентрация компонента А в жидкой фазе определяется проекцией точки в, т. е. отрезок  $Вв'$  показывает максимальное количество компонента А в жидкой фазе при температуре  $t_0$ .

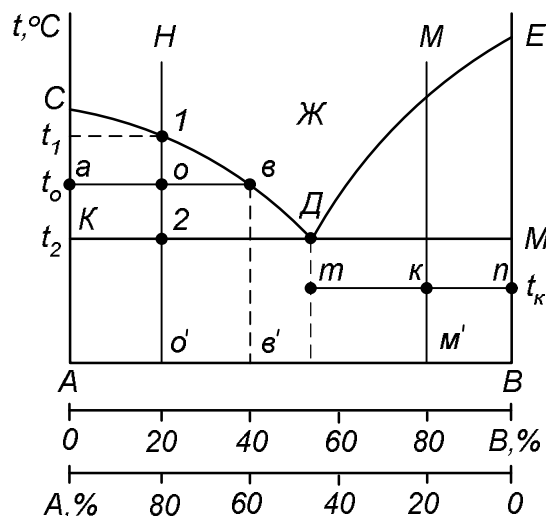


Рис. 33. Диаграмма состояний двухкомпонентного сплава

При понижении температуры до  $t_2$  (точка 2) оставшийся жидкий сплав достигает эвтектической концентрации. Таким образом, при охлаждении сплава Н жидкая фаза изменяет свою концентрацию по линии 1вД, а выделяющиеся кристаллы компонента А имеют постоянный состав с концентрацией соответствующей вертикальной оси АС.

Для характеристики сплава чаще всего требуется не только качественное определение, но и количество его структурных составляющих. Для решения подобных задач используется правило отрезков коноды. Конодой называется горизонтальная линия ае (см.рис. 33) параллельная оси концентраций, проведенная внутри исследуемой двухфазной области СДК до пересечения ее границ (точки а и е). Точка е граничит с областью жидкой фазы Ж, а точка а находится на вертикальной оси АС, соответствующей чистому компоненту А. Следовательно, рассматриваемая двухфазная система включает жидкую фазу, состоящую из атомов компонентов А и В, в которой находятся кристаллы компонента А. Спроектировав точку е на ось концентраций, можно определить состав жидкой фазы при данной температуре. Так, в сплаве Н при  $t_0$  в жидкой составляющей имеется в наличии 60 % компонента А и 40 % компонента В.

Определение количества фаз при определенной температуре проводится по следующей схеме.

Пусть требуется установить количество жидкой и твердой фаз сплава Н при температуре  $t_0$  (см. рис. 33).

Примем общее количество сплава за единицу, а количество твердой фазы (кристаллы компонента А) за  $x$ . Тогда количество жидкой составляющей будет  $(1-x)$ . В сплаве компонент А распределяется при  $t_0$  между твердой и жидкой фазами.

Количество компонента А в жидкой фазе соответствует отрезку  $В\epsilon'$ , а в твердой фазе единице, т. е. отрезку ВА.

Составим уравнение относительно компонента А, общее количество которого в сплаве соответствует отрезку  $Bo'$ . Его количество в твердой фазе будет равно  $BA \cdot x$ , а в жидкой -  $В\epsilon' \cdot (1-x)$ . Тогда:

$$BA \cdot x + В\epsilon' \cdot (1 - x) = Bo'$$

$$x(BA - В\epsilon') = Bo' - В\epsilon'$$

$$x = \frac{Bo' - В\epsilon'}{BA - В\epsilon'} ,$$

но  $Bo' - В\epsilon' = о\epsilon$ ;  $BA - В\epsilon' = а\epsilon$ .

Следовательно, количество твердой фазы составит  $A = x = \frac{о\epsilon}{а\epsilon}$ , а количество жидкой фазы  $Ж = 1 - x = \frac{ао}{а\epsilon}$ .

Таким образом, для определения количества твердой фазы необходимо взять отношение части коноды, примыкающей к области жидкой фазы, к длине всей коноды, а для определения количества жидкой части сплава – отношение отрезка коноды, примыкающей к твердой фазе, к длине всей коноды.

Правило отрезков применимо для любых температур и любых двухфазных областей диаграмм состояний. Например, сплав М, содержащий (точка  $m'$ ) 20 % компонента А и 80 % компонента В при температуре  $t_k$  состоит из эвтектики (точка  $m$ ) и кристаллов компонента В (точка  $n$ ). Количество эвтектики находится из выражения:

Эвт [А+В] =  $\frac{kn}{mn} \cdot 100$  %, а количество компонента В из отношения:

$$B = \frac{mk}{mn} \cdot 100 \%$$

#### 2.2.5. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях (II рода)

Компоненты сплавов: компонент А и компонент В; фазы: жидкий раствор Ж и кристаллы твердого раствора  $\alpha$ .

Общий вид диаграммы приведен на рис. 34. Линия С1Д – линия ликвидус, линия С2Д – линия солидус.

Подобные диаграммы характерны для сплавов, состоящих из компонентов с неограниченной растворимостью в жидком и твердом состояниях. Компоненты таких сплавов имеют одинаковые по типу с близкими параметрами кристаллические решетки.

Рассмотрим кристаллизацию сплава I. При температуре  $t_1$  образуются первые кристаллы твердого раствора состава точки  $m$ , т. е. содержащие  $Bm'$  компонента А и  $A m'$  компонента В. Ввиду того, что в образовавшемся твердом растворе компонента В больше, он является растворителем. Значит в начале кристаллизации выделяются кристаллы В(А) – твердого раствора компонента А в компоненте В. С понижением температуры кристаллы твердого раствора продолжают выделяться. При

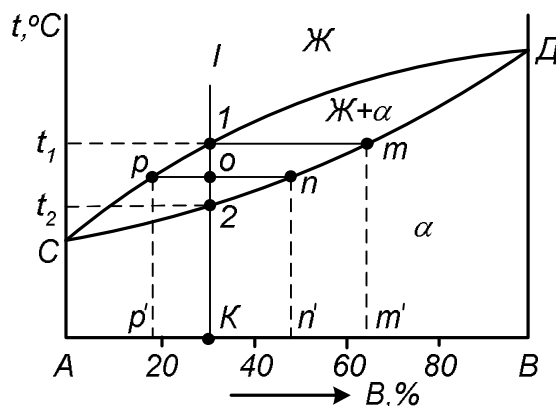


Рис. 34. Диаграмма состояний с неограниченной растворимостью компонентов (II рода)

этом их состав меняется по линии солидуса. Одновременно с изменением состава твердого раствора изменяется и состав жидкой фазы по линии ликвидуса. Следовательно происходит перераспределение атомов компонентов А и В между жидкой составляющей и кристаллами твердого раствора. Так, при температуре, соответствующей точке О, состав твердого раствора определяется точкой п, а жидкой фазы – точкой р.

К концу кристаллизации (в условиях равновесия) все кристаллы становятся однородными и имеют состав, соответствующий точке К. Выравнивание состава кристаллов происходит за счет диффузии, т. е. перемещения атомов компонента А из жидкого расплава (в котором концентрация А более высокая) в имеющиеся кристаллы В(А).

Однако диффузионные процессы протекают сравнительно медленно. Поэтому в реальных условиях быстрого охлаждения составы различных частей кристаллов полностью выровняться не успевают. Такое различие составов в одних и тех же кристаллах называется внутрикристаллической, или дендритной ликвацией. Дендритную ликвацию можно существенно понизить путем нагрева сплава в твердом состоянии до высоких температур, при которых диффузия протекает более интенсивно, и состав зерен выравнивается.

#### 2.2.6. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой неограниченно растворимы в жидком состоянии и ограничено в твердом (III рода)

Компоненты сплавов: компонент А и компонент В; фазы: жидкий раствор Ж, ограниченный твердый раствор А(В), кристаллы компонента А и кристаллы компонента В. Твердый раствор А(В) обозначим через  $\alpha$ . В зависимости от вида реакций, в условиях существования фаз может быть два вида диаграмм: диаграмма с эвтектикой и диаграмма с перитектикой.

##### ***Диаграмма с эвтектикой***

Сплавы с ограниченной растворимостью компонентов в практике встречаются чаще, чем с неограниченной. Ограниченная растворимость состоит в том, что один компонент растворяется в другом до определенного предела. Если растворяемого компонента в сплаве будет больше предела растворимости, то он в твердый раствор не войдет и образуется механическая смесь насыщенного твердого раствора и кристаллов избыточного компонента. Диаграмма состояния с ограниченной растворимостью компонента В в компоненте А и отсутствием растворимости А в В приведена на рис. 35.

На этой диаграмме линия РДЕ – линия ликвидуса, линия РМДН – линия солидуса. Линия МДН – линия эвтектики  $[\alpha + В]$ . Линия КМ показывает растворимость компонента В в компоненте А. Следовательно, концен-

трация сплава, соответствующая точке К, показывает растворимость В в А при температуре  $t_A$ , а точка М соответствует максимальной растворимости компонента В в компоненте А.

Значит, сплавы левее КМ состоят из кристаллов насыщенного твердого раствора А(В); на самой линии КМ насыщенные кристаллы А(В); правее линии КМ в сплавах кроме насыщенных кристаллов А(В), будут еще кристаллы избыточного компонента В, которые обозначаются  $B_{II}$ .

Рассмотрим процесс кристаллизации некоторых сплавов этой системы.

Сплав I начинает кристаллизоваться при понижении температуры ниже соответствующей точки 1 (ликвидус) с выделением кристаллов твердого раствора  $\alpha$ . При температуре 2 (солидус) кристаллизация заканчивается, и сплав в равновесных условиях состоит только из кристаллов твердого раствора  $\alpha$ . От температуры 2 до полного охлаждения в сплаве никаких структурных изменений не происходит.

В сплаве II в начале кристаллизации (точка 3) из жидкого расплава начинают выделяться кристаллы твердого раствора  $\alpha$ . Кристаллизация заканчивается при температуре 4. В интервале температур 4–5 сплав состоит только из твердого раствора  $\alpha$ . Ниже точки 5, ввиду ограниченной растворимости, в компоненте А не может раствориться столько компонента В, сколько его содержится в сплаве. Поэтому избыточный компонент В будет выделяться из  $\alpha$  в виде вторичных кристаллов  $B_{II}$ . Этот процесс происходит до полного охлаждения сплава и называется вторичной кристаллизацией. В результате после охлаждения сплав состоит из твердого раствора А(В) и очень мелких вторичных кристаллов компонента В, т. е.  $\alpha + B_{II}$ .

Кристаллизация сплава III начинается при температуре ниже точки 6 с выделением кристаллов  $\alpha$ . При дальнейшем понижении температуры (между точками 6–7) количество твердого раствора увеличивается, и его состав меняется по линии солидус (линия РМ). Состав жидкого раствора также изменяется, но по линии ликвидуса (РД). Так, например, при  $t_{6a}$  состав твердого раствора соответствует точке  $c'$ , а состав

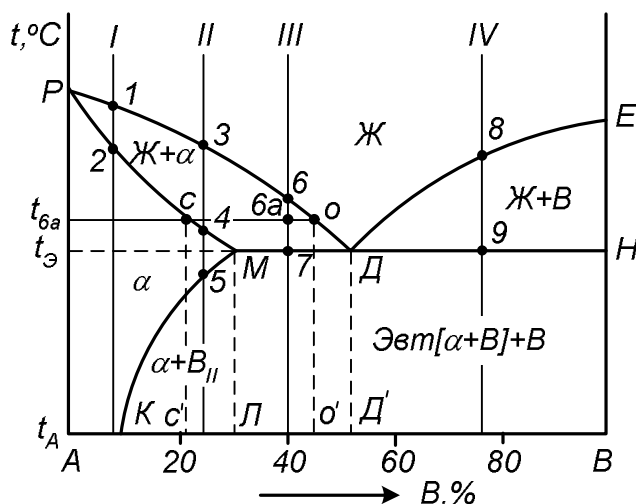


Рис. 35. Диаграмма состояний с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (III рода)

жидкой фазы – точке  $o'$ . При достижении эвтектической температуры  $t_3$  (точка 7) состав кристаллов  $\alpha$  соответствует максимальной растворимости В в А (точка М), а жидкий – точке Д. Последний, закристаллизовавшись, образует эвтектику, состоящую из кристаллов  $\alpha$  состава точки М и кристаллов чистого компонента В: Эвт [ $\alpha + В$ ]. В итоге после окончания кристаллизации, сплав будет иметь следующий состав:  $\alpha + \text{Эвт} [\alpha + В]$ .

При дальнейшем понижении температуры наступает ограничение растворимости В в А. Из твердого раствора  $\alpha$  (как в самостоятельной фазе, так и в составе эвтектики) начинают выделяться кристаллы  $V_{II}$ , что ведет к уменьшению компонента В в твердом растворе по линии МК:  $\alpha + V_{II} + \text{Эвт} [\alpha + V_{II} + В]$ . В связи с тем, что очень мелкие кристаллы  $V_{II}$  внутри эвтектики объединяются с кристаллами В в однородные зерна и обычно не обнаруживаются при микроскопических исследованиях окончательный состав сплава III записывается таким образом:  $\alpha + V_{II} + \text{Эвт} [\alpha + В]$ .

Сплав IV на первом этапе кристаллизации выделяет чистый компонент В, количество которого при понижении температуры увеличивается. Состав жидкого раствора изменяется по линии ДЕ и при достижении эвтектической температуры (точка 9) имеет концентрацию компонентов А и В определяемой точкой Д (эвтектическая смесь). В результате по окончании кристаллизации сплав IV имеет состав: Эвт [ $\alpha + В$ ] + В.

При дальнейшем охлаждении из-за ограниченной растворимости твердого раствора в составе эвтектики из  $\alpha$  выделяются кристаллы  $V_{II}$ , которые объединяются с кристаллами В в однородные зерна. В результате до окончательного охлаждения сплав IV структурно не изменяется.

### ***Диаграмма с перитектикой***

Твердые растворы могут образоваться не только из жидкой фазы, но и при ее взаимодействии с твердой. Процесс образования новой фазы за счет растворения существующей твердой фазы в жидкости называется перитектическим (рис. 36).

Компоненты диаграммы: компонент А и компонент В. Фазы: жидкая – Ж, ограниченный твердый раствор компонента В в компоненте А –  $\alpha$  и кристаллы компонента В. Линия СКД – линия ликвидуса, СРМ – линия солидуса, РН – линия растворимости компонента В в компоненте А, КРМ – линия перитектического превращения, которое происходит при температуре  $t_{\Pi}$ .

Сплав I (перитектический) начинает кристаллизоваться при температуре, соответствующей точке 1 с выделением кристаллов компонента В. При понижении температуры количество кристаллов В увеличивается, а его концентрация в жидкой фазе уменьшается.

Состав жидкой составляющей изменяется по линии 1К и при температуре  $t_n$  достигает концентрации компонентов соответствующей точке К, т. е. достигаются условия, при которых происходит перитектическая реакция: жидкий расплав состава К взаимодействует с кристаллами компонента В и образует твердый раствор  $\alpha$ , состав которого соответствует точке Р. Следовательно, для образования  $\alpha$  перитектического состава (в соответствии с правилом отрезков) необходимо, чтобы количество жидкой фазы состава К соответствовало отрезку РМ, а количество кристаллов В – отрезку КР.

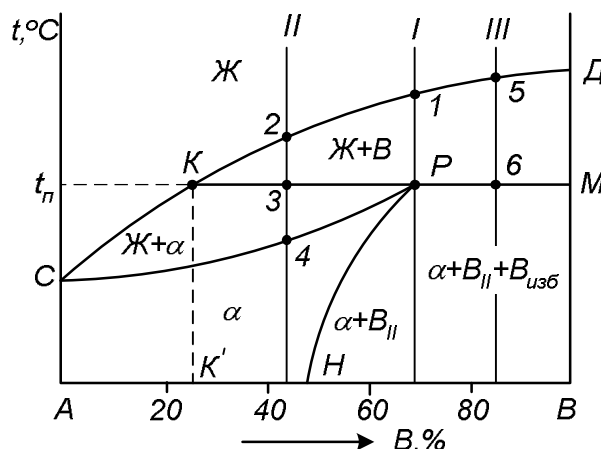


Рис. 36. Диаграмма состояний сплавов с перитектикой

При дальнейшем охлаждении сплава, ввиду ограниченной растворимости компонента В в компоненте А (линия РН), из твердого раствора  $\alpha$  перитектического состава будут выделяться кристаллы  $B_{II}$ . В итоге после полного охлаждения перитектический сплав I состоит из твердого раствора  $\alpha$  и вторичных кристаллов компонента В:  $\alpha + B_{II}$ .

Кристаллизация сплава II начинается при температуре, соответствующей точке 2 с выделением первичных кристаллов В. При достижении температуры  $t_n$  (точка 3) состав жидкого раствора соответствует точке К. При этой температуре происходит перитектическая реакция, для которой требуется количество жидкой фазы соответствующее отрезку РМ. В рассматриваемом случае количество жидкой фазы соответствует отрезку 3М, что больше необходимого для перитектической реакции. В связи с этим, часть жидкого расплава в перитектическом превращении принимать участия не будет, и сплав II в точке 3 состоит из кристаллов твердого раствора  $\alpha$  (состав Р) и жидкой фазы (состава К). При дальнейшем охлаждении до точки 4 оставшаяся жидкость затвердевает с образованием  $\alpha$ . После окончательного охлаждения сплав состоит только из зерен твердого раствора  $\alpha$ .

В сплаве III кристаллизация начинается также с выделения первичных кристаллов компонента В. При понижении температуры (между точками 5 и 6) количество жидкого расплава уменьшается, его состав изменяется по линии 5К и к точке 6 достигает соответствующей точки К. По окончании кристаллизации (точка 6) происходит перитектическая реакция от взаимодействия жидкой фазы состава точки К и первичных кристаллов В. В связи с тем, что для этой реакции требуется количество

кристаллов В, соответствующее отрезку КР, а имеется больше (отрезок К6), часть кристаллов В в перитектическом превращении принимать участия не будет, и сплав после кристаллизации состоит из твердого раствора  $\alpha$  состава Р и первичных кристаллов компонента В, которые называются избыточными ( $V_{изб}$ ). При дальнейшем охлаждении, ввиду ограниченной растворимости компонента В в А, из твердого раствора  $\alpha$  будут выделяться вторичные кристаллы компонента В. Окончательно структура сплава III будет:  $\alpha + V_{II} + V_{изб}$ .

#### 2.2.7. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой в твердом виде образуют устойчивые химические соединения (IV рода)

В металлических сплавах могут образовываться различные химические соединения как между двумя или несколькими металлами (интерметаллиды), так и между металлами и неметаллами (карбиды, оксиды, нитриды и др.). Обычно химическое соединение имеет свою кристаллическую решетку, отличную от кристаллических решеток составляющих его компонентов.

Поэтому свойства химического соединения всегда резко отличаются от свойств этих компонентов. Химическое соединение, как правило, имеет высокую твердость, малую пластичность, большое электросопротивление, относительно низкую теплопроводность. Следовательно, если какие-либо металлы А и В образуют химическое соединение, то оно может быть обозначено простой формулой  $A_nB_m$ , которая показывает, что между собой соединяются  $n$  атомов компонента А и  $m$  атомов компонента В, образующие одну кристаллическую решетку. На диаграмме состояний этому соединению будет соответствовать определенная ордината.

Химические соединения могут быть устойчивыми или неустойчивыми. В первом случае они сохраняются до температуры плавления, во втором – распадаются ниже температуры плавления.

Если в химическом соединении возможна замена какой-то части атомов одного из элементов атомами другого, то образуется твердый раствор на основе химического соединения.

Основными данными диаграммы состояния двух компонентов, образующих одно химическое соединение, в котором оба компонента не растворяются (рис. 37) являются компоненты диаграммы: компонент А и компонент В; фазы: жидкая ж, кристаллы компонента А, кристаллы компонента В, кристаллы химического соединения  $A_nB_m$ ; линия СДЕМН – линия ликвидуса, ОДРКМЛ – линия солидуса; линии ОДР и КМЛ – линии эвтектических превращений. Точка Е соответствует температуре плавления химического соединения  $A_nB_m$ .

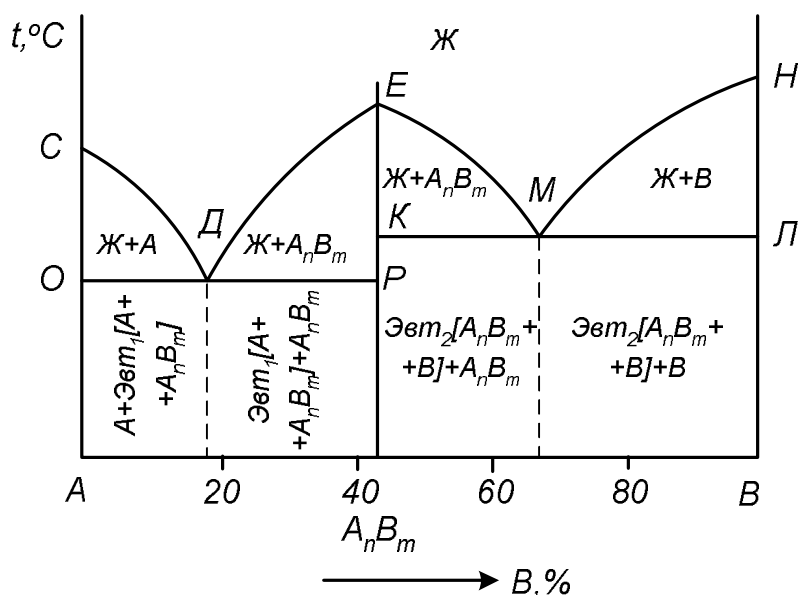


Рис. 37. Диаграмма состояния сплавов, образующих устойчивое химическое соединение (IV рода)

Приведенную диаграмму, можно рассматривать как две простые диаграммы первого рода: диаграмму состояния сплавов компонента А и химического соединения  $A_nB_m$  и диаграмму состояния того же химического соединения и компонента В. Следовательно, диаграмма состояния сплавов в случае образования химического соединения раскладывается на две, в каждой из которых химическое соединение играет роль самостоятельного компонента.

Сплав, кристаллизующийся в точке Д, состоит из механической смеси кристаллов компонентов А и  $A_nB_m$ . Эта эвтектика на диаграмме обозначена:  $\text{Эвт}_1 [A + A_nB_m]$ . Кристаллизация сплавов, расположенных левее точки Д, начинается с выделения кристаллов компонента А. При дальнейшем понижении температуры жидкая фаза изменяет концентрацию компонентов по линии СД (ликвидус) и при достижении температуры солидуса (линия ОР) претерпевает эвтектическую реакцию. В результате, до полного охлаждения эти сплавы состоят:  $A + \text{Эвт}_1 [A + A_nB_m]$ .

Кристаллизация сплавов, расположенных правее точки Д, начинается с выделения кристаллов  $A_nB_m$ , а заканчивается на линии ОР образованием  $\text{Эвт}_1 [A + A_nB_m]$ . В итоге после полного охлаждения сплавы имеют:  $A_nB_m + \text{Эвт}_1 [A + A_nB_m]$ .

Сплав, кристаллизующийся в точке М, образует эвтектику:  $\text{Эвт}_2 [A_nB_m + B]$ . Кристаллизация сплавов, расположенных левее точки М начинается с выделения химического соединения  $A_nB_m$ , а расположенных правее – с образования кристаллов компонента В. Заканчивается кристаллизация обеих групп сплавов образованием  $\text{Эвт}_2 [A_nB_m + B]$ .

Поэтому сплавы между точками К и М после окончательного охлаждения имеют состав:  $A_nB_m + \text{Эвт}_2 [A_nB_m + B]$ , а сплавы между точками М и Л –  $B + \text{Эвт}_2 [A_nB_m + B]$ .

#### 2.2.8. Связь между диаграммами состояний и свойствами двухкомпонентных сплавов

Рассмотренные диаграммы состояний дают характеристику строения сплавов различного состава при различных температурах. Вместе с тем состав и строение сплавов оказывают влияние на их свойства. Исследованиям такой связи посвящены работы академика Н.С. Курнакова – одного из основоположников физико-химического анализа сплавов.

На рис. 38 приведены зависимости свойств (в частности твердости, HB) от состава сплава.

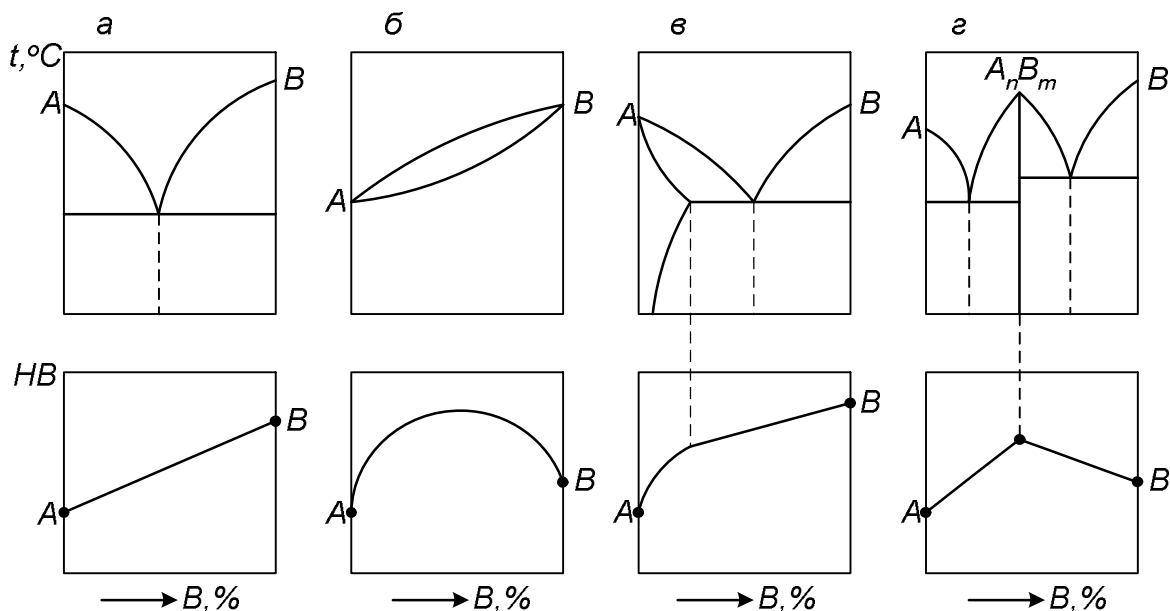


Рис. 38. Зависимость твердости сплавов от вида диаграммы состояний

В сплавах, имеющих структуру механических смесей (рис. 38, а), кристаллы компонентов А и В полностью сохраняют свои свойства. Поэтому свойства всех сплавов будут изменяться по прямолинейному закону от компонента А до компонента В.

Сплавы с неограниченной растворимостью в твердом состоянии изменяют свои свойства по криволинейному закону в зависимости от химического состава (см. рис. 38, б). Кривая на диаграмме «состав – свойства», как правило, имеет максимум. Например, твердость у твердых растворов может быть выше, чем у чистых компонентов.

Если сплавы образуют ограниченные твердые растворы (см. рис. 38, в), то свойства в области однофазных твердых растворов изменяются по криволинейному закону, а в области механических смесей – по прямолинейному.

При образовании химического соединения  $A_nB_m$  (см. рис. 38, г), в котором не растворяются ни компонент А ни компонент В, свойства изменяются по ломаной линии с максимальным значением у химического соединения.

Зная характер взаимодействия между типом диаграммы и свойствами, можно определять состав сплава, который формирует заранее заданные свойства.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте характеристику основных видов сплавов.
2. Что называется диаграммой состояния сплавов? Основные виды диаграмм двухкомпонентных сплавов.
3. Для чего необходимо правило отрезков? Какова связь между диаграммами состояний и свойствами двухкомпонентных сплавов?
4. В чем состоит отличие твердых растворов внедрения и твердых растворов замещения?
5. Какова структура сплавов в виде механических смесей?
6. Что называется линией ликвидус?
7. Что называется линией солидус?
8. На основании каких данных строятся диаграммы состояния сплавов?
9. Какова структура эвтектического сплава?
10. Что называется вторичной кристаллизацией?

## **3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ**

### **3.1. Диаграмма состояния железо-цементит ( $Fe-Fe_3C$ )**

#### **3.1.1. Общие положения**

Железоуглеродистые сплавы являются основными конструкционными материалами практически всех стран мира. Масштабы их производства в значительной мере характеризуют технико-экономический уровень эволюции государства и служат материальной основой развития различных отраслей техники.

В общем случае железоуглеродистые сплавы подразделяются на две основные группы: стали и чугуны.

Получение сплавов с заданными свойствами базируется, прежде всего на анализе системы «состав–структура–свойства» и ее изменении

при воздействии внешних условий таких, как температура, давление, механические нагрузки и др. Впервые зависимость «состав–свойства» в виде диаграммы построил в 1819 г. Гей-Люссак, изучая растворимость солей в воде. С тех пор получены тысячи диаграмм «состав–свойства» с основной зависимостью температуры плавления (кристаллизации) от химического состава сплавов. Однако наиболее значимые для практики диаграммы состояний были разработаны гораздо позже.

Быстро расширяющееся производство чугунов и сталей во второй половине XIX в. поставило перед наукой и практикой ряд важных задач, связанных не только с проблемой получения металлов, но и с необходимостью обеспечить максимально высокое их качество. Для этого потребовалось глубоко изучить внутренние процессы, происходящие в литой стали при ее механической и тепловой (термической) обработке. Начало было положено трудами русских металлургов (П.П. Аносова, А.С. Лаврова, Н.В. Калакуцкого и др.) и ряда крупных зарубежных ученых. Их деятельность продолжил великий металлург Дмитрий Константинович Чернов, который явился основоположником новой отрасли науки – металлографии, учения о строении металлов и сплавов. Научные открытия, сделанные Д.К. Черновым, легли в основу ряда важнейших процессов получения и последующей обработки чугуна и особенно стали. Он графически представил закономерность в изменении структуры стали при нагревании (рис. 39). На прямой линии (термометрической шкале) он отметил несколько точек, соответствующих определенным температурам, при которых в структуре стали наблюдались изменения. Точки характеризуют превращения, происходящие в стали при определенных температурах во время нагревания или охлаждения. Эти превращения существенно изменяют структуру, а соответственно и свойства металла.

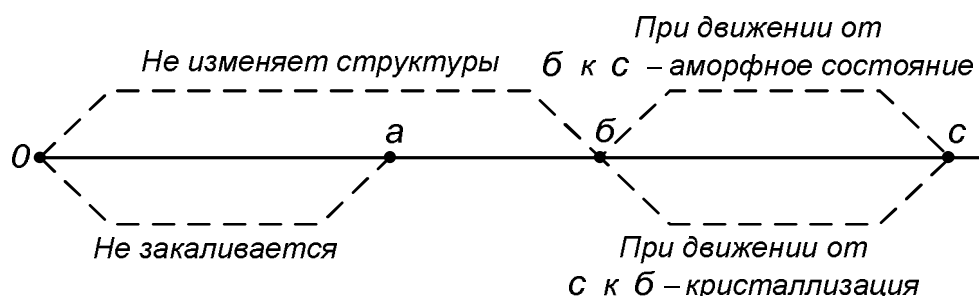


Рис. 39. Точки Д.К. Чернова

Открытые Д.К. Черновым точки дали возможность Х. Розенбому в 1900 г. разработать диаграмму состояний железоуглеродистых сплавов (диаграмма «железо–углерод»). Эта классическая диаграмма (уточненная немецким ученым П. Геренсом) и по сей день имеет решающее значение при получении и обработке (особенно термической) сталей и чугунов.

Без этой диаграммы практически невозможно разобраться в тех процессах, которые происходят в железоуглеродистых сплавах при различных видах теплового воздействия. На ее основе устанавливаются наиболее рациональные режимы литья деталей, обработки давлением (ковки, штамповки, прокатки), сварки и наплавки с последующей термической обработкой изделий.

Углерод в сплавах с железом образует карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$  (цементит). Однако при определенных условиях (очень медленное охлаждение, длительная выдержка при высоких температурах, наличие специальных модификаторов и др.) он может выделяться в свободном состоянии в виде графита. Образование графита возможно также при распаде карбида железа. Таким образом, железоуглеродистые сплавы могут находиться в двух системах: система  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  (железо–цементит) и система  $\text{Fe}-\text{C}$  (железо–углерод). В первой системе компонентами сплавов являются железо и карбид железа, а во второй – железо и графит.

Распад цементита, сопровождающийся выделением свободного углерода в виде графита, является процессом необратимым, так как при последующем нагреве цементит вновь не образуется. Следовательно, система  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ , в которой возможен необратимый распад цементита, не является полностью равновесной. Такая система называется метастабильной. Система  $\text{Fe}-\text{C}$ , в которой нет необратимых процессов, называется равновесной или стабильной. Однако во многих железоуглеродистых сплавах карбид железа очень устойчив не только в обычных условиях эксплуатации, но и при весьма значительном и длительном нагреве. Поэтому практически систему  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  в большинстве случаев можно считать условно равновесной. Такая диаграмма используется при изучении сталей и белых чугунов, т. е. таких сплавов, в которых нет свободного углерода.

При изучении структур железоуглеродистых сплавов, в которых углерод находится в виде графита (серые, ковкие, высокопрочные чугуны), используется диаграмма  $\text{Fe}-\text{C}$ .

Рассмотрим диаграмму  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  (железо–цементит) (рис. 40). Особенностью такой диаграммы является то, что концентрация углерода взята только до 6,67 %, что соответствует его содержанию в цементите ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Применяемые в практике железоуглеродистые сплавы содержат углерода не более 4...5 %, что меньше 6,67 %. Поэтому рассматривать диаграмму при содержании углерода более 6,67 % не имеет смысла.

Сплавы, содержащие углерода до 2,14 %, называются сталями, а более 2,14 % – чугунами.

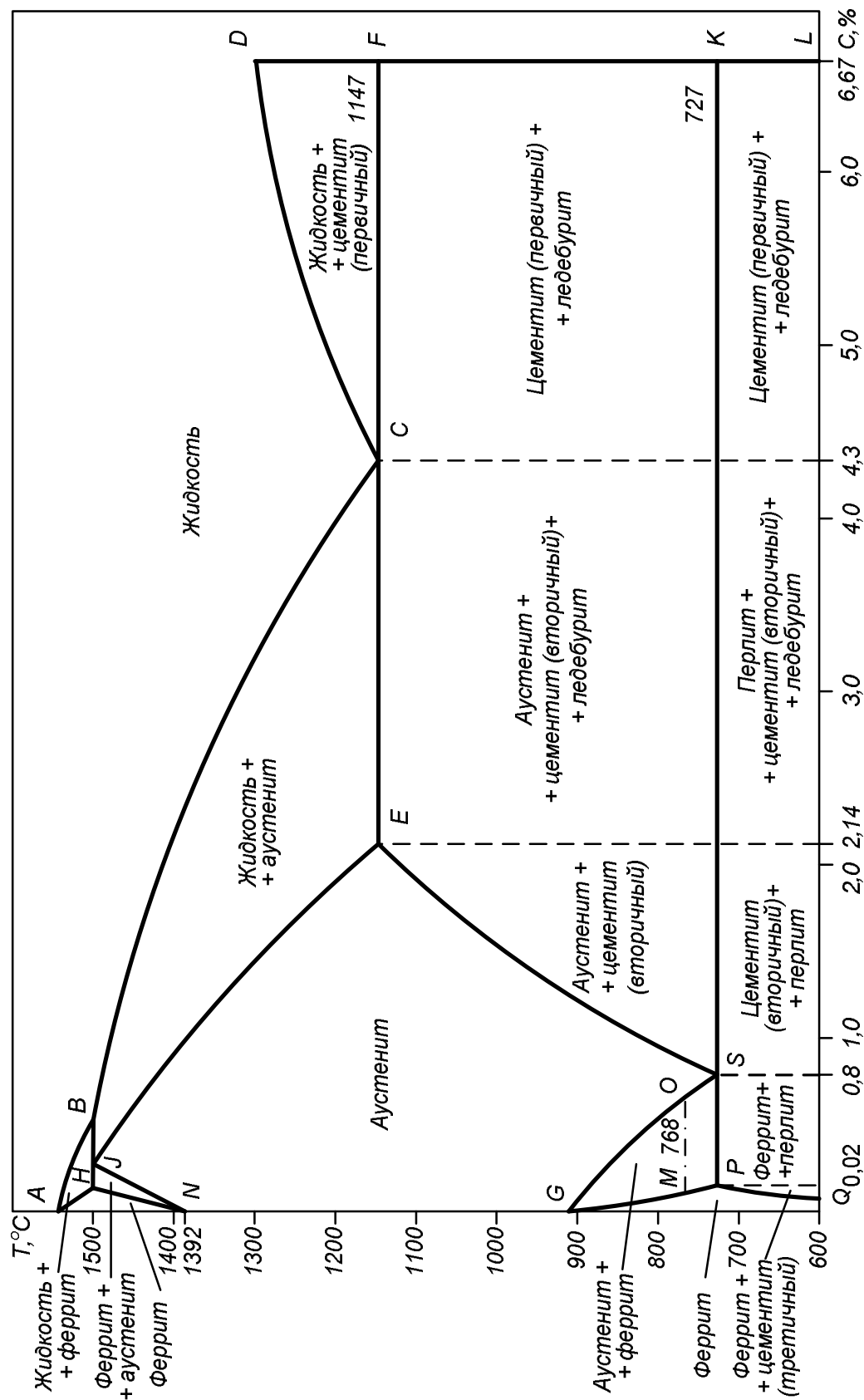


Рис. 40. Диаграмма состояния железо – цементит (Fe-Fe<sub>3</sub>C)

### 3.1.2. Компоненты, фазы, линии и точки диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C

**Компоненты сплавов.** Основными компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо и углерод.

**Железо** (лат. Ferrum) открыто в III тысячелетии до н.э., это химический элемент VIII группы периодической системы Менделеева, атомный номер 26, атомный радиус 0,127 нм, атомная масса 55,8; плотность 7,83 г/см<sup>3</sup>. Блестящий серебристо-белый металл с температурой плавления 1539 °С. Широко распространено в природе, занимая второе место (после алюминия) среди металлов.

Железо имеет аллотропные модификации (рис. 40), которые различаются по кристаллической структуре или по магнитным свойствам. При температуре ниже 768 °С устойчиво ферромагнитное α-железо с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК). При 768 °С (точка Кюри) железо становится парамагнитным, решетка остается той же. Между 911 °С и 1392 °С устойчиво γ-железо с гранецентрированной кубической решеткой. Выше 1392 °С вновь образуется ОЦК-решетка.

Железо является важнейшим металлом современной техники, хотя в чистом виде практически не используется по причине низких прочностных характеристик. Оно необходимо для жизнедеятельности многих живых организмов, в том числе и человека (входит в состав гемоглобина).

Способность железа растворять углерод и другие элементы служит основой для получения разнообразных сплавов, способных выдерживать воздействие высоких и низких температур, вакуума и высоких давлений, агрессивных сред, больших переменных напряжений, ядерных излучений и др. На долю таких сплавов приходится около 95 % всей металлургической продукции (стали, чугуны, ферросплавы).

**Углерод** (лат. Carboneum) химический элемент IV группы периодической системы Менделеева, атомный номер 6, атомный радиус 0,077 нм, атомная масса 12,011, плотность 2,5 г/см<sup>3</sup>, температура плавления  $\cong 3500$  °С.

Основные кристаллические модификации углерода – алмаз и графит. В решетке алмаза все атомы углерода соединены между собой очень прочными связями и образуют в пространстве непрерывный трехмерный каркас (рис. 41, а). В графите атомы углерода располагаются параллельными слоями, причем атомы внутри слоя связаны между собой сильнее, чем один слой с другим (рис. 41, б).

В соединениях с железом углерод приобретает металлические свойства. Он может растворяться в решетке железа по механизму внедрения, т. е. внедряться в межузельные пространства (поскольку атомный радиус углерода почти в два раза меньше, чем у железа), а также образовывать химические соединения Fe<sub>3</sub>C; Fe<sub>2</sub>C и др.

Алмаз – диэлектрик, графит – хороший проводник электрического тока. Алмаз химически весьма стоек, графит при обычных условиях химически инертен, а при высоких температурах соединяется со многими элементами, является сильным восстановителем.

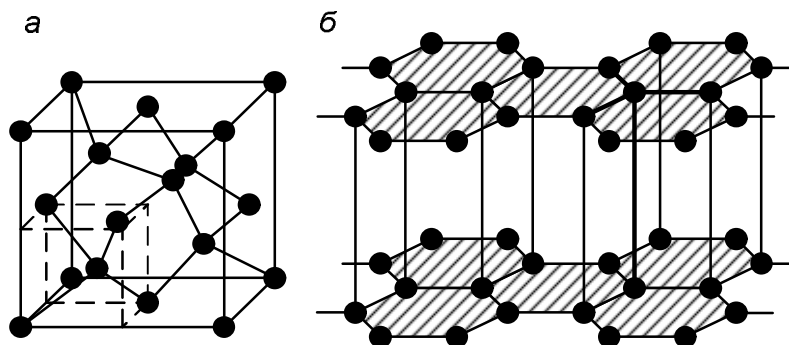


Рис. 41. Кристаллические решетки: а – алмаза; б – графита

Содержание углерода в земной коре  $6,5 \cdot 10^{16}$  т. Значительное количество (около  $10^{13}$  т) входит в состав горючих ископаемых (уголь, природный газ, нефть и др.), а также в состав углекислого газа атмосферы ( $6 \cdot 10^{11}$  т) и гидросферы ( $10^{14}$  т). Простейшие соединения углерода (диоксид углерода, метан) обнаружены в атмосфере почти всех планет Солнечной системы. Так, атмосфера Марса состоит в основном из диоксида углерода. Все организмы растений и животных построены из соединений углерода (средняя массовая доля углерода – 18 %).

**Фазы системы Fe–Fe<sub>3</sub>C.** Компоненты сплавов системы Fe–Fe<sub>3</sub>C образуют следующие фазы: жидкий раствор углерода в железе (ж), феррит (ф), аустенит (А) и цементит (ц).

**Феррит** (от лат. Ferrum железо) – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе, имеющего ОЦК решетку. В ОЦК решетке имеются свободные места (так называемые поры) размерами 0,062 нм. Работы исследователей предполагают, что меньшая часть атомов углерода в кристаллической решетке Fe <sub>$\alpha$</sub>  находится в порах, а большая – на дефектах решетки (вакансиях, дислокациях). Максимальная растворимость углерода в низкотемпературном феррите составляет 0,02 % при 727 °С, а в высокотемпературном  $\delta$ -феррите 0,1 % при 1499 °С. При комнатной температуре феррит содержит 0,006 % углерода.

В феррите могут быть растворены кремний, марганец, фосфор и другие элементы. При  $t = 911 \dots 768$  °С феррит парамагнитен, а от 768 °С до абсолютного нуля – ферромагнитен.

Феррит мягок, пластичен, имеет следующие свойства:  $\sigma_b = 250$  МПа;  $\delta = 50$  %;  $\psi = 80$  %;  $KCU = 2,5$  МДж/м<sup>2</sup>; НВ 80.

Микроструктура феррита представляет собой однородные зерна (рис. 42).

Аустенит (от имени английского ученого Робертса-Аустена) – твердый раствор углерода и других элементов в  $\gamma$ -железе, имеющего ГЦК решетку. Эта решетка в центре имеет пору диаметром 0,102 нм в которой атом углерода с несколько большим размером (0,154 нм) может поместиться, вызывая увеличение параметров  $\gamma$ -решетки. При этом сам атом уменьшается в размерах, отдавая валентные электроны. Искажение решетки ведет к уменьшению остальных ее пор, которые становятся недоступными для других атомов углерода. На рис. 43 показана схема строения элементарной ячейки аустенита, в которой растворен один атом углерода. Углерод в аустените находится в виде атомов, ионизированных дважды. В то же время атомы железа ионизированы однократно.



Рис. 42. Микроструктура феррита,  $\times 500$

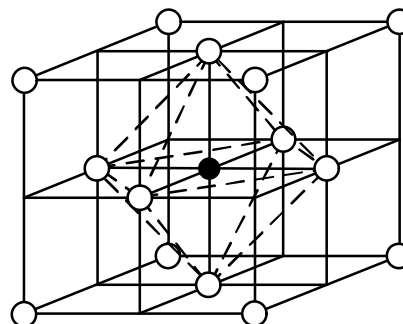


Рис. 43. Кристаллическая решетка аустенита:  $\circ$  – атомы железа;  $\bullet$  – атом углерода

Максимальная растворимость углерода в аустените при  $t = 1147^\circ\text{C}$  равна 2,14 %. При снижении температуры растворимость уменьшается и при  $t = 727^\circ\text{C}$  составляет 0,8 %.

При  $t = 727^\circ\text{C}$  вследствие аллотропического превращения  $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$  и очень малой растворимости углерода в  $\alpha$ -железе аустенит распадается с образованием механической смеси феррита и цементита.

Аустенит немагнитен, обладает по сравнению с ферритом меньшим удельным объемом, пластичен ( $\delta = 40 \dots 50\%$ ), имеет твердость HB 160...200. Микроструктура аустенита приведена на рис. 44.

Цементит – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ ), содержит углерода 6,67 %, плотность 7,82 г/см<sup>3</sup>.

Кристаллическая решетка цементита очень сложная и состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу (рис. 45). В вершинах октаэдров находятся атомы железа, каждый из которых принадлежит двум октаэдрам. Атом углерода находится в центре октаэдра.



Рис. 44. Микроструктура аустенита,  $\times 500$

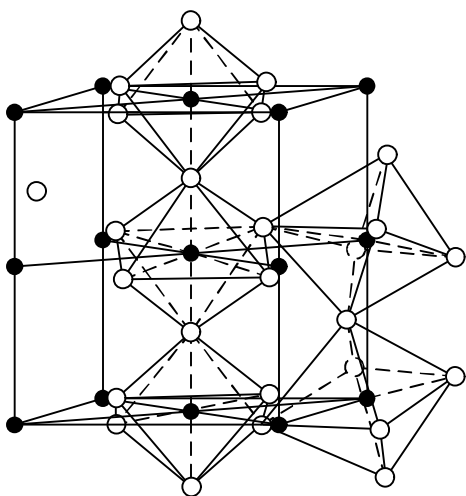


Рис. 45. Кристаллическая решетка цементита: ○ – атомы железа; ● – атомы углерода

Характер связи между атомами железа и углерода не установлен. Однако в кристаллах цементита железо и углерод положительно ионизированны, благодаря чему  $\text{Fe}_3\text{C}$  характеризуется некоторыми металлическими свойствами (электропроводность, металлический блеск).

Температура плавления цементита (около  $1250^\circ\text{C}$ ) точно не установлена, так как в процессе нагрева он разлагается, что и искажает результаты измерений.

Аллотропических превращений цементит не претерпевает, но при низких температурах он слабо ферромагнитен.

Магнитные свойства теряются при  $t = 727^\circ\text{C}$ .

Цементит имеет высокую твердость ( $\text{HB} > 800$ , царапает стекло), но очень низкую (практически нулевую) пластичность.

Он способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы железа могут замещаться атомами других металлов (хрома, марганца, вольфрама, молибдена и др.), а атомы углерода – неметаллами (азотом, кислородом), то есть образуется легированный цементит. Углерод в решетке цементита практически не растворяется.

Цементит неустойчив и при определенных условиях распадается на железо и углерод в виде графита, что имеет очень важное практическое значение.

В железоуглеродистых сплавах цементит может выделяться из жидкого раствора (в виде крупных равноосных зерен), из аустенита (в виде сетки по границам зерен) и из феррита (в виде очень мелких кристаллов по границам зерен). В первом случае цементит называется первичным (Ц<sub>I</sub>), во втором – вторичным (Ц<sub>II</sub>), в третьем – третичным (Ц<sub>III</sub>). Химические и физико-механические свойства всех трех типов цементита абсолютно одинаковы.

**Основные точки и линии диаграммы  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ .** Приводимые на диаграмме буквенные обозначения точек являются общепринятыми в международной практике (см. рис. 40).

Точка А ( $1539^\circ\text{C}$ ) соответствует температуре плавления чистого железа, а точка D ( $\approx 1250^\circ\text{C}$  – приблизительной температуре плавления цементита). При температуре  $1392^\circ\text{C}$  (точка N) происходят полиморфные превращения  $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma$ , а при  $t = 911^\circ\text{C}$  (точка G) – полиморфные превращения  $\text{Fe}_\gamma \leftrightarrow \text{Fe}_\alpha$ .

Точка Р (727 °С) соответствует максимальному содержанию углерода в  $\alpha$ -железе, а точка Е (1147 °С) – максимальному содержанию углерода в  $\gamma$ -железе.

При охлаждении аустенита с содержанием углерода 0,8 % в точке S (727 °С) происходит его распад на механическую смесь феррита (имеющего 0,02 % углерода) и цементита вторичного. Такая смесь называется перлитом (франц. perlite, от Perle жемчуг) и обозначается символом  $P: A_{0,8} \leftrightarrow P (\Phi_{0,02} + C_{II})$

Следовательно, основными условиями образования перлита в железоуглеродистых сплавах являются содержание углерода в аустените 0,8 % и температура 727 °С.

Перлит чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей:  $\sigma_B = 800 \dots 900$  МПа,  $\delta \leq 16$  %, HB 180...220.

При охлаждении жидкого расплава с содержанием углерода 4,3 % в точке С (1147 °С) образуется механическая смесь аустенита с содержанием углерода 2,14 % и цементита первичного. Эта смесь называется ледебуритом (от имени немецкого металлурга А. Ледебура) и обозначается индексом Л:  $L [A_{2,14} + C_I]$ .

При  $t = 20 \dots 25$  °С ледебурит представляет собой смесь цементита и перлита. В этой структурной составляющей цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости (HB > 600) и хрупкости.

**Линии диаграммы** представляют собой семейство критических точек, в которых происходят какие-либо превращения в железоуглеродистых сплавах.

Линии ABCD и NJECF – соответственно линия ликвидус и линия солидус, показывают температуры начала и конца кристаллизации жидких сплавов. При температурах, соответствующих линии HJB, происходит перитектическое превращение. Линия MO (768 °С) указывает на температуру перехода феррита из магнитного состояния в немагнитное при нагреве и наоборот при охлаждении. Это превращение не относится к разряду фазовой перекристаллизации. Линии GS и PG соответствуют температурам начала и конца полиморфного превращения феррита в аустенит при нагреве и аустенита в феррит при охлаждении. Линии QR и SE указывают на предельную растворимость углерода в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе. Линия ECF (1147 °С) – семейство точек, при которых протекает эвтектическое превращение в сплавах. Эвтектика (от греч. eutektos – легко плавящийся) – тонкая механическая смесь твердых фаз, одновременно закристаллизовавшихся из расплава. При охлаждении сплава с содержанием углерода 4,3 % в точке С образуется чистая эвтектика – ледебурит. Этот сплав называют эвтектическим чугуном. Чугуны с содержанием углерода менее 4,3 % называются доэвтектическими, а при содержании более 4,3 % – заэвтектическими.

Линия PSK (727 °C) – линия эвтектоидного превращения. Эвтектоид (от эвтектика и греч. eidos – вид) аналогичная эвтектике структурная составляющая металлических сплавов, но в отличие от нее образующаяся не из жидкой, а из твердой фазы и потому имеющая более тонкое дисперсное строение. Так при охлаждении аустенита с содержанием углерода 0,8 % в точке S образуется эвтектоид – тонкодисперсная механическая смесь феррита и цементита вторичного, называемая перлитом. Такой сплав именуется эвтектоидной сталью. Стали, имеющие углерода менее 0,8 % называются доэвтектоидными, а более 0,8 % – заэвтектоидными.

Таким образом, в системе «железо – цементит» происходят три изотермических превращения:

– перитектическое превращение на линии HJB (1499 °C)



– эвтектическое превращение на линии ECF (1147 °C)



– эвтектоидное превращение на линии PSK (727 °C)



Рассмотрим превращения в железоуглеродистых сплавах, которые происходят при медленном охлаждении от температуры плавления.

### 3.1.3. Перитектическое превращение

Этот участок (левая верхняя часть диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C) представлен отдельно на рис. 46.

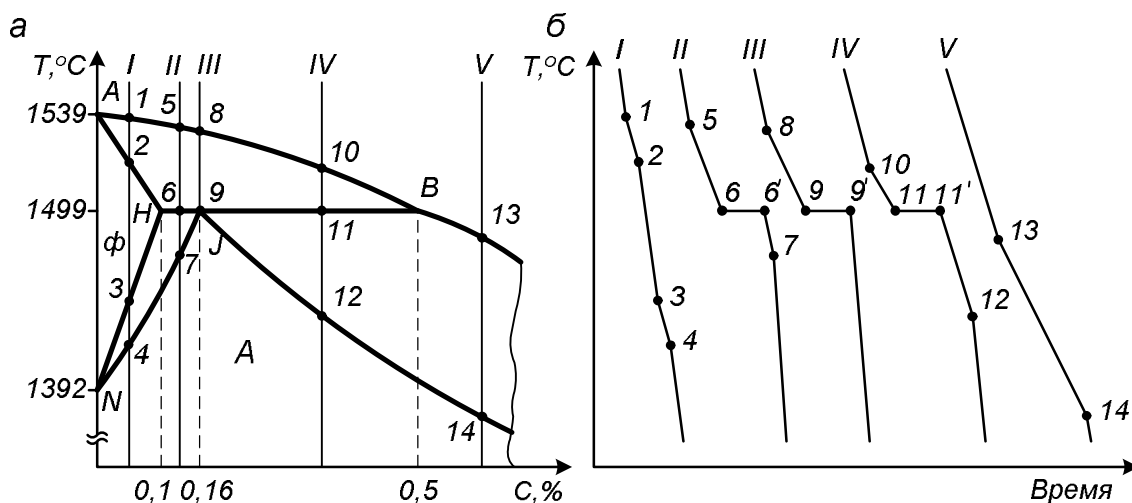
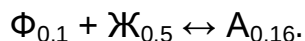


Рис. 46. Перитектическое превращение в железоуглеродистых сплавах: а – часть диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C; б – схемы кривых охлаждения сплавов

Из диаграммы видно, что кристаллизация сплавов с содержанием углерода до 0,5 % начинается по линии АВ (ликвидус). На перитектической горизонтали HJB происходит перитектическое превращение между жидкой фазой состава точки В ( $Ж_{0,5}$ ) и ферритом точки Н ( $Ф_{0,1}$ ). В результате образуется аустенит состава точки J ( $А_{0,16}$ ). Это превращение наглядно демонстрирует сплав III (содержание углерода 0,16 %) кристаллизация которого начинается в точке 8. При температуре ниже этой точки из жидкого расплава выделяются кристаллы высокотемпературного феррита. По мере понижения температуры, концентрация углерода в феррите изменяется по линии АН, а в жидкой фазе – по линии 8В, в чем можно убедиться, используя правило отрезков.

Кристаллизация заканчивается при температуре 1499 °С (точка 9). При данной температуре феррит достигает концентрации углерода 0,1 %, а жидкость – 0,5 %. В результате происходит перитектическая реакция, при которой обе фазы полностью израсходуются и образуется аустенит с содержанием углерода 0,16 %.



С п л а в II с содержанием углерода более 0,1 % и менее 0,16 % начинает кристаллизоваться в точке 5 с выделением кристаллов феррита. При достижении температуры 1499 °С (точка 6) сплав состоит из высокотемпературного феррита с концентрацией углерода 0,1 % и жидкой фазы с концентрацией углерода 0,5 %. Между этими фазами происходит перитектическая реакция с образованием аустенита состава точки J (0,16 % С). Но в связи с тем, что на перитектическую реакцию требуется количество феррита равное JB/НВ (согласно правилу отрезков), а в сплаве содержится его больше (6В/НВ), то часть феррита сохранится и по окончании перитектического превращения сплав будет состоять из аустенита и избыточного феррита, который при дальнейшем понижении температуры до точки 7 перекристаллизуется в аустенит. Ниже точки 7 сплав будет состоять только из аустенита.

С п л а в IV с содержанием углерода более 0,16 % и менее 0,5 % начинает кристаллизоваться при температуре, соответствующей точке 10. Из жидкого сплава выделяются кристаллы высокотемпературного феррита. При температуре 1499 °С (точка 11) в результате перитектической реакции образуется аустенит. Но так как на его образование требуется HJ/НВ жидкой фазы, а последней в сплаве содержится больше (Н11/НВ), то часть жидкой составляющей оказывается избыточной. В результате после перитектического превращения (точка 11) рассматриваемый сплав будет состоять из кристаллов аустенита и жидкой фазы, из которой при дальнейшем охлаждении до окончания кристаллизации (точка 12) выделяются кристаллы аустенита. В твердом состоянии сплав IV имеет структуру аустенита.

С п л а в I перитектического превращения не претерпевает, так как содержание углерода в нем менее 0,1 %. В начале кристаллизации (точка 1) из расплава выделяются кристаллы высокотемпературного феррита. Кристаллизация заканчивается в точке 2. В интервале температур между точками 2 и 3 феррит охлаждается не претерпевая никаких превращений. Между температурами 3 и 4 происходит перекристаллизация по причине полиморфного превращения феррита в аустенит. Ниже температуры, соответствующей точке 4, сплав состоит только из аустенита.

С п л а в V с содержанием углерода более 0,5 %. Такие сплавы перитектического превращения не претерпевают. В начале кристаллизации (точка 13) из расплава начинают выделяться кристаллы аустенита. Кристаллизация происходит в интервале температур, соответствующих точкам 13 и 14. При этом кристаллы аустенита имеют различную концентрацию углерода (изменяющуюся по линии J14). Ниже температуры окончания кристаллизации (точка 14) структура рассматриваемого сплава состоит только из аустенита.

Таким образом, все сплавы с содержанием углерода до 2,14 % (стали) после первичной кристаллизации имеют однофазную структуру – аустенит.

#### 3.1.4. Эвтектоидное превращение

Рассмотрим превращения, происходящие в сталях при медленном охлаждении. Часть диаграммы, относящаяся к этим сплавам, приведена на рис. 47. Перитектическая часть не показана, так как была рассмотрена ранее.

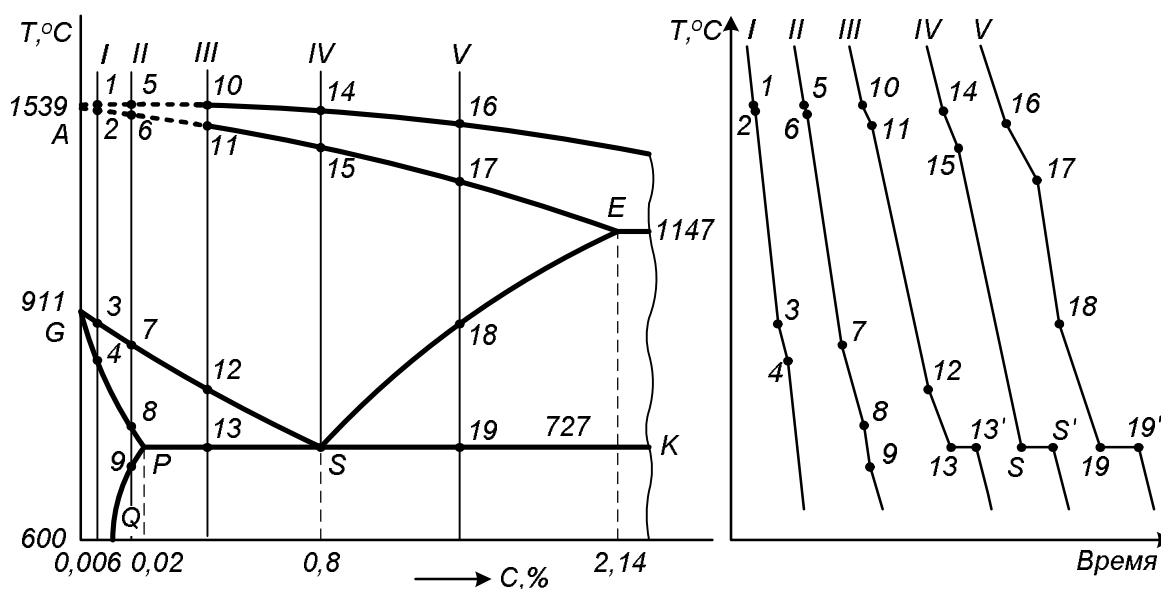


Рис. 47. Часть диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C до 2,14% C (стали) и кривые охлаждения сплавов

С п л а в I с содержанием углерода менее 0,006 %. Сплавы с содержанием углерода менее 0,025 % называются технически чистым железом.

Кристаллизация сплава I начинается при температуре, соответствующей точке 1 и заканчивается в точке 2 образованием аустенита. В процессе кристаллизации состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус, а твердой (аустенит) по линии солидус. Поэтому кристаллы аустенита, образовавшиеся в начале процесса кристаллизации имеют концентрацию углерода меньшую по сравнению с кристаллами, образующимися при более низкой температуре, т. е. аустенит формируется с переменным составом по углероду.

При очень медленном охлаждении в интервале температур между точками 2 и 3 происходит некоторое выравнивание состава за счет диффузии углерода. Однако этот процесс до температуры, соответствующей точке 3 (находящейся на линии GS) завершиться не успевает.

Как отмечалось ранее, линия GS соответствует семейству критических точек в которых происходит смена решеток  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо. Если в железе углерод отсутствует, то переход  $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$  совершается при температуре 911 °C (точка G). При наличии в железе углерода температура полиморфного превращения понижается по линии GS, а при концентрации 0,8 % (точка S) и более – по линии SK (727 °C). Ниже этой температуры в углеродистых сталях  $Fe_\gamma$  не существует.

Следовательно, в рассматриваемом сплаве I в точке 3 начинается выделение кристаллов феррита в составе аустенита, причем первыми полиморфное превращение претерпевают решетки аустенита с меньшим содержанием углерода. Так как растворимость углерода в феррита очень мала (при температуре точки 3 менее 0,006 % – линия PG), то его излишки вытесняются из решетки  $Fe_\alpha$  и за счет диффузии перераспределяются в оставшемся аустените, который при этой температуре может растворить углерода около 2 % (линия SE). Таким образом, переход аустенита в феррит происходит во всем объеме не сразу, а в интервале температур 3–4. Поскольку к окончанию перекристаллизации (точка 4) феррит не достигает предельной концентрации, то до полного охлаждения никаких фазовых превращений в нем происходить не будет.

С п л а в II с содержанием углерода более 0,006 % и менее 0,02 %. От температуры начала кристаллизации (точка 5) и до температуры, соответствующей точке 8 в сплаве происходят процессы, аналогичные процессам, происходящим в сплаве I до линии PG. В результате структура состоит из чистого феррита. При охлаждении сплава до температуры 9 фазовых превращений в нем не происходит, но размеры решетки  $Fe_\alpha$  уменьшаются. Поэтому при температуре, соответствующей точке 9 наступает предельная растворимость углерода в  $Fe_\alpha$  (линия QP). По этой причине при дальнейшем понижении температуры, углерод из ре-

шетки феррита вытесняется и идет на образование мелких кристаллов цементита третичного ( $\text{Ц}_{III}$ ), который выделяется по границам зерен феррита. Этот цементит понижает пластичность низкоуглеродистой стали, что отрицательно сказывается при холодной штамповке.

При ускоренном охлаждении выделение третичного цементита задерживается и он может не выделиться совсем.

**Сплавы с содержанием углерода более 0,02 %.** Стали с указанным содержанием углерода характерны тем, что в них происходит эвтектоидное превращение (линия PSK, 727 °C). Эвтектоидное превращение состоит в распаде аустенита, содержащего 0,8 % C (точка S) на смесь феррита состава точки P (0,02 % C) и цементита вторичного (6,67 % C):  $A_{0,8} \leftrightarrow F_{0,02} + Fe_3C$ .

Точка S называется эвтектоидной точкой, а сталь с содержанием углерода 0,8 % – эвтектоидной сталью или перлитом (П). Стали с содержанием углерода до 0,8 % относятся к группе доэвтектоидных, а содержанием углерода более 0,8 % – к группе заэвтектоидных.

Рассмотрим подробнее эвтектоидное превращение при образовании перлита в эвтектоидной стали.

С п л а в IV – эвтектоидная сталь (C = 0,8 %).

Кристаллизация сплава начинается при температуре соответствующей точке 14 и заканчивается в точке 15 с образованием аустенита. До температуры критической точки S (727 °C) сталь не претерпевает никаких фазовых превращений.

При температуре 727 °C (точка S) во всем объеме аустенита начинается эвтектоидное превращение, которое подчиняется общим законам кристаллизации и происходит путем образования центров кристаллизации феррита и цементита с последующим ростом кристаллов этих фаз.

В связи с тем, что углерод в аустените распределен неравномерно (наличие флуктуаций) появление центров кристаллизации существенно облегчается. При этом ведущей фазой при превращении является цементит, зародыши которого возникают по границам зерен аустенита. Зародыши зерен цементита растут в форме тонких пластин, направленных вглубь зерен аустенита. Для роста пластинки цементита необходимо, чтобы к ней диффундировал углерод из соседних участков. В результате аустенит, расположенный около пластинки обедняется углеродом, перестраивается решетка ( $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$ ), и в результате этого создаются условия для образования феррита. Следовательно, по обе стороны пластинки цементита растут пластинки феррита (рис. 48, а).

Рост пластинки феррита, ввиду малой растворимости в ней углерода, приводит к вытеснению излишков последнего в соседние участки аустенита, где образуется новая пластинка цементита. Семейство пластинок феррита и цементита составляет зерно перлита. Граница зерна

перлита сама становится поверхностью, от которой начинается формирование второго зерна (см. рис. 48, б). Значит, в пределах одного аустенитного зерна могут образовываться несколько перлитных зерен.

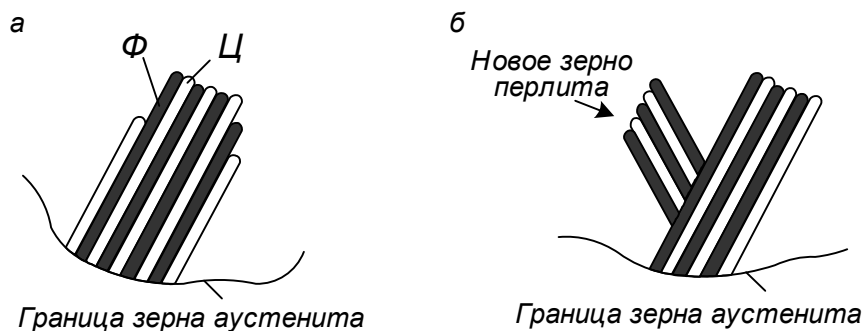


Рис. 48. Схема образования перлита: а – образование первого зерна; б – образование следующего зерна

В результате превращения аустенита в перлит, образовавшийся феррит содержит углерода 0,02 % (соответствующее точки Р, см. рис. 47). При дальнейшем охлаждении эвтектоидной стали, такое количество углерода в феррите содержаться не может из-за ограниченной растворимости (линия QР). Поэтому излишки углерода, выделяясь из феррита, способствуют образованию цементита третичного. Этот цементит в структуре стали виден не будет, так как он присоединяется к цементиту, входящему в состав перлита. Таким образом, после полного охлаждения структура эвтектоидной стали ( $C = 0,8 \%$ ) будет состоять только из перлита:  $P(Ф+Ц_{II})$ , структура которого имеет пластинчатое строение смеси феррита и цементита (рис. 49).

Толщина пластинок феррита и цементита не одинакова. Пластины феррита толще пластинок цементита в среднем

в 7,5 раз. Очень важной характеристикой перлита служит межпластинчатое расстояние, которое равно суммарной толщине соседних пластин феррита и цементита или расстоянию между ближайшими пластинками одной фазы. При медленном охлаждении образуется крупнопластинчатый перлит с межпластинчатым расстоянием 0,5...1,0 мкм. При увеличении скорости охлаждения образуется более тонкопластинчатый перлит.

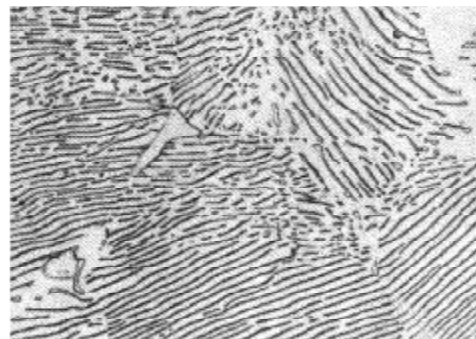


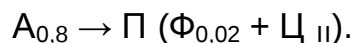
Рис. 49. Структура перлита,  $\times 1000$

С уменьшением толщины пластин феррита и цементита увеличиваются твердость и прочность стали. Изменяя скорость охлаждения, можно получать перлит разной дисперсности, регулируя свойства стали в широком диапазоне.

С п л а в III – доэвтектоидная сталь.

Кристаллизация сплава происходит в интервале температур, соответствующих точкам 10 и 11 (см. рис. 47). Образовавшийся аустенит, с переменным составом по углероду, до критической точки 12 никаких фазовых превращений не претерпевает. В интервале температур 12–13 происходит превращение аустенита в феррит, вызываемое сменой решеток  $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$ , причем первыми такое превращение претерпевают решетки с более низким содержанием углерода. Так как феррит содержит очень мало углерода, его излишки диффундируют в остающийся аустенит. Увеличение концентрации углерода в аустените можно проследить по линии GS, используя правило отрезков.

По достижении сплавом температуры 727 °С (точка 13) оставшийся аустенит насыщается углеродом до 0,8 % (точка S), то есть создаются условия для образования перлита. В результате аустенит распадается с образованием эвтектоида:



После эвтектоидного превращения структура доэвтектоидной стали состоит из феррита и перлита. При дальнейшем охлаждении ввиду ограниченной растворимости углерода в феррите (линия QP) из него выделяется цементит третичный. После окончательного охлаждения структура сплава состоит из феррита, перлита и цементита третичного:  $Ф + Ц_{III} + П (Ф + Ц_{II} + Ц_{III})$ . В связи с тем, что количество третичного цементита незначительно, в структуре стали он не виден, так как присоединяется к цементиту, входящему в перлит. Структура доэвтектоидной стали приведена на рис. 50. Как видно из диаграммы, аналогичные превращения происходят и в любой другой доэвтектоидной стали при ее охлаждении. С увеличением содержания углерода в сплаве уменьшается количество ферритной фазы, а количество перлита увеличивается, что повышает такие механические свойства, как твердость, прочность и др.

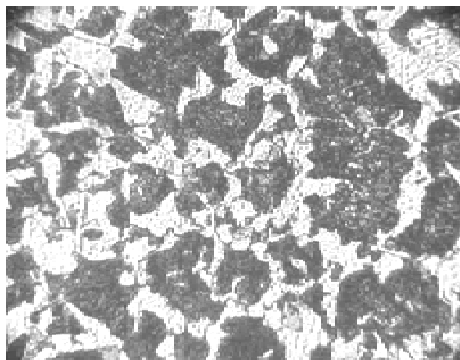


Рис. 50. Структура доэвтектоидной стали (0,4 % С). Светлые зерна – феррит; темные – перлит,  $\times 250$

С п л а в V – заэвтектоидная сталь.

Образовавшийся в результате кристаллизации (между точками 16 и 17) аустенит до температуры, соответствующей точке 18 никаких фазовых превращений не претерпевает. При достижении критической точки 18 наступает предельная растворимость углерода (линия SE). При дальнейшем охлаждении сплава содержание углерода в аустените понижается, так как уменьшаются параметры всех решеток  $Fe_\gamma$ .

Поэтому в интервале температур 18–19 из аустенита выделяется углерод, который образует вторичный цементит, располагающийся по границам зерен. К температуре 727 °С (точка 19) аустенит обедняется углеродом до концентрации 0,8 % (соответствующей точке S), чем создаются условия для эвтектоидного превращения:  $A_{0,8} \rightarrow П (Ф_{0,02} + Ц_{II})$ . По окончании этого превращения структура заэвтектоидной стали состоит из перлита и расположенного по границам зерен цементита вторичного. При дальнейшем охлаждении из-за ограниченной растворимости углерода в феррите (входящего в состав перлита) из него выделяется цементит третичный, который структурно не выявляется, сливаясь с цементитом вторичным в составе перлита. После окончательного охлаждения, структура заэвтектоидной стали состоит из перлита и цементита вторичного, расположенного в виде сетки по границам зерен перлита (рис. 51).

Такую структуру будет иметь любая заэвтектоидная сталь. С увеличением содержания углерода количество вторичного цементита в стали увеличивается. Максимальное количество вторичного цементита в заэвтектоидной стали с содержанием углерода 2,14 % составляет примерно 20 %.

Таким образом, после полного охлаждения в равновесных условиях стали будут иметь следующие структуры:

- доэвтектоидные –  $Ф + П (Ф + Ц_{II})$ ;
- эвтектоидные –  $П (Ф + Ц_{II})$ ;
- заэвтектоидные –  $П (Ф + Ц_{II}) + Ц_{II}$ .

С увеличением в стали содержания углерода растет количество цементитной составляющей как в составе перлита, так и в свободном состоянии. Это ведет к повышению твердости и прочности, но понижаются пластичность и вязкость.

Углерод также влияет на технологические свойства стали. Увеличение содержания углерода приводит к снижению способности стали деформироваться в горячем и, особенно в холодном состоянии, ухудшает свариваемость.

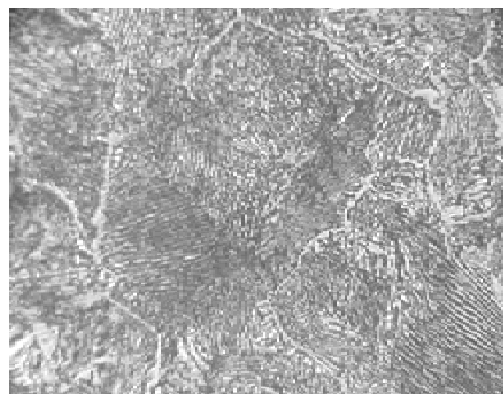


Рис. 51. Структура заэвтектоидной стали (C = 1,2 %), × 200

### 3.1.5. Эвтектическое превращение

Сплавы претерпевающие эвтектическую кристаллизацию с образованием ледебурита при температуре 1147 °С содержат углерода более 2,14 % и относятся к белым чугунам. Белыми чугуны называются потому, что весь углерод в них находится в связанном состоянии (в виде цементита), и их излом светлый блестящий.

Рассмотрим какие превращения происходят в белых чугунах при их охлаждении от температуры в жидком состоянии до комнатной. На рис. 52 приведена правая часть диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C, соответствующая таким сплавам.

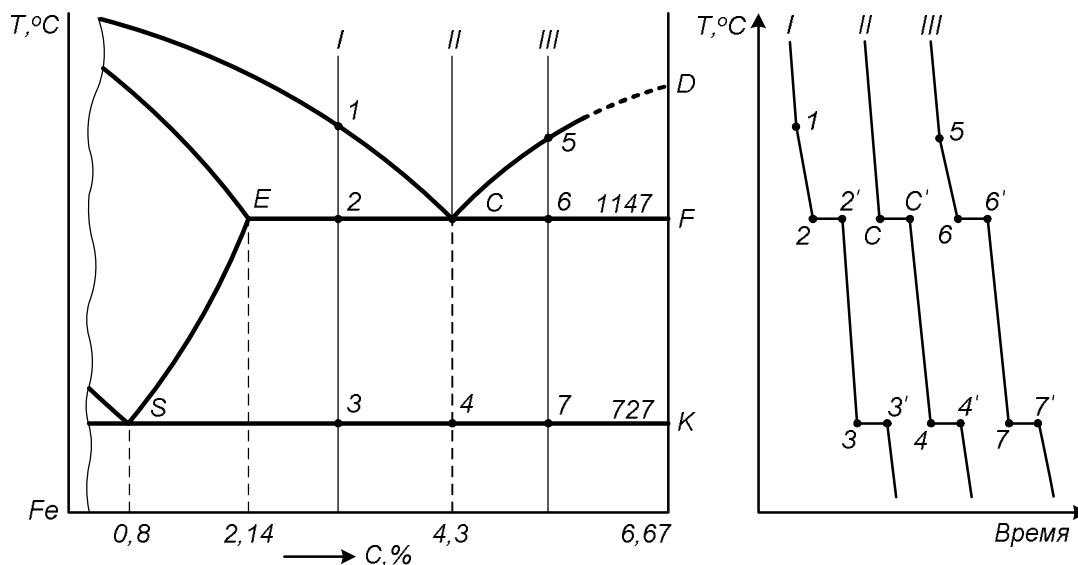


Рис. 52. Часть диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C (C > 2,14 %) и кривые охлаждения сплавов

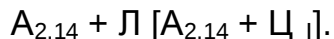
**С п л а в II** – эвтектический белый чугун (C = 4,3 %)

Сплав кристаллизуется при температуре 1147 °C (точка C) с образованием эвтектики – ледебурита: Ж<sub>4,3</sub> → Л [А<sub>2,14</sub> + Ц<sub>I</sub>]. Ледеburит представляет собой механическую смесь кристаллов аустенита с содержанием углерода 2,14 % и кристаллов цементита первичного (т. е. выделяющегося из жидкой фазы).

При дальнейшем охлаждении чугуна в интервале температур 1147 °C (точка C) и 727 °C (точка 4) ограниченная растворимость углерода в аустените (линия SE) приводит к диффузии его излишков из решетки Fe<sub>γ</sub> и образованию цементита вторичного. Структура ледебурита изменяется и приобретает вид: Л [А + Ц<sub>I</sub> + Ц<sub>II</sub>]. При достижении температуры 727 °C (точка 4) аустенит обедняется углеродом до 0,8 % (точка S), и этим самым создаются условия для его эвтектоидного превращения. В результате аустенит, находящийся в составе ледебурита, распадается на эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного, и чугун приобретает следующую структуру: Л [П (Ф<sub>0,02</sub> + Ц<sub>II</sub>) + Ц<sub>I</sub> + Ц<sub>II</sub>]. При дальнейшем охлаждении сплава, из-за ограниченной растворимости углерода в феррите из него выделяется цементит третичный, который структурно не выявляется. При окончательном охлаждении структура эвтектического белого чугуна состоит из ледебурита состава: перлит + цементит первичный + цементит вторичный.

С п л а в I – доэвтектический белый чугун ( $2,14 \% < C < 4,3 \%$ ).

Кристаллизация сплава начинается при температуре, соответствующей точке 1 с выделения из жидкой фазы кристаллов аустенита. При понижении температуры концентрация углерода в расплаве изменяется по линии ликвидус и к моменту окончания кристаллизации ( $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ , точка 2) достигает эвтектического состава (точка C). В результате оставшаяся жидкая фаза претерпевает эвтектическое превращение с образованием ледебурита. Окончательно закристаллизовавшийся сплав будет иметь следующую структуру:



При дальнейшем понижении температуры, ввиду ограниченной растворимости углерода в аустените (линия SE), из него выделяется цементит вторичный. Причем это происходит как в свободных кристаллах аустенита, так и в аустените в составе ледебурита:



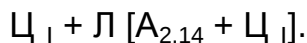
К температуре  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  (точка 3) аустенит обедняется углеродом до  $0,8 \%$  (точка S), чем создаются условия для эвтектоидного превращения. В результате такого превращения структура чугуна приобретает следующий вид:



При дальнейшем охлаждении чугуна из феррита выделяется цементит третичный, который структурно не обнаруживается.

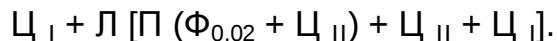
С п л а в III – заэвтектический белый чугун ( $4,3 \% < C < 6,67 \%$ ).

Кристаллизация этого сплава начинается в точке 5 с выделения кристаллов цементита первичного. При последующем охлаждении жидкая фаза обедняется углеродом по линии ликвидус (СД) и к моменту окончания кристаллизации (точка 6) достигает эвтектического состава ( $4,3 \%$  C, точка C). В результате эвтектического превращения оставшейся жидкости сплав будет состоять из кристаллов цементита первичного и ледебурита:



При дальнейшем понижении температуры до окончательного охлаждения чугуна кристаллы цементита первичного никаких превращений не претерпевают, а изменения в структуре ледебурита будут аналогичны изменениям, происходящим в сплавах I и II.

Окончательно структура заэвтектического чугуна будет следующая:



Микроструктура белых чугунов приведена на рис. 53.

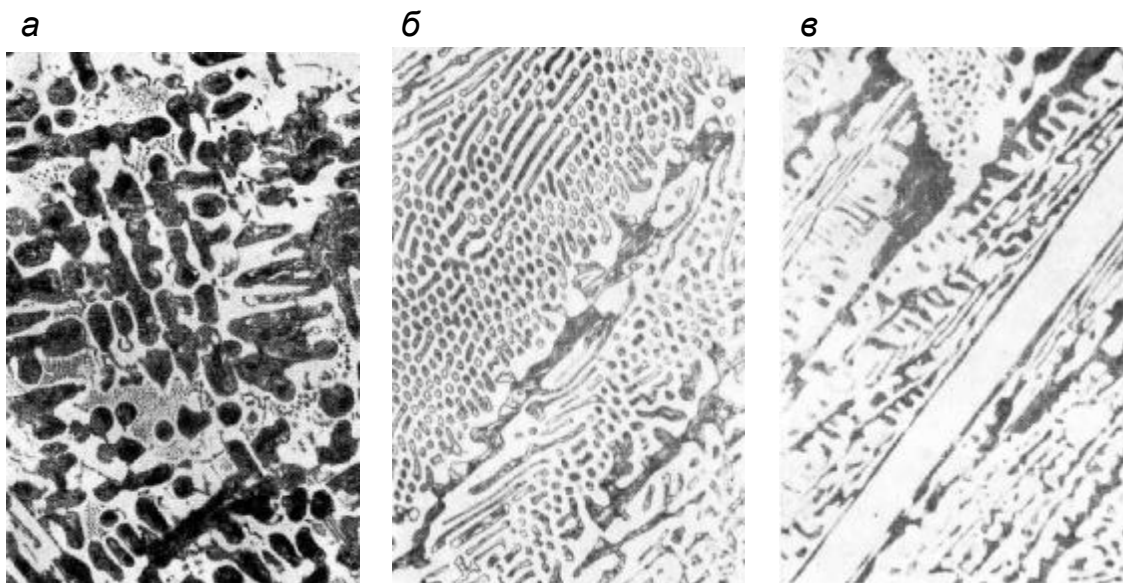


Рис. 53. Микроструктуры белых чугунов: а – доэвтектического,  $\times 100$ ; б – эвтектического,  $\times 500$ ; в – заэвтектического,  $\times 500$

При микроисследовании структур белого чугуна, особенно таких, в которых много ледебурита, различить вторичный и третичный цементит практически не представляется возможным, так как он сливается с эвтектическим цементитом.

Обязательной структурной составляющей белых чугунов является ледебуритная эвтектика, которая отличается большой хрупкостью, а это вызывает хрупкость чугунов. Наиболее хрупок заэвтектический чугун, который кроме ледебурита имеет крупные хрупкие кристаллы первичного цементита.

## 3.2. Стали

### 3.2.1. Общая классификация

Сталь (польск. *stal*, от нем. *Stahl*) – деформирующийся (ковкий) сплав железа с углеродом (до 2,14 %) и другими элементами.

Стали, как наиболее широко используемые материалы, представлены в современной технике значительным числом марок (составов), исчисляемых тысячами, причем оно постоянно увеличивается в соответствии с возникающими новыми разнообразными требованиями многих отраслей промышленности. В связи с этим, характеризовать стали по одному какому-либо признаку, одинаковому для всех марок, сложно. Наиболее рациональным подходом при решении этой задачи является распределение сплавов по свойствам, наиболее характерным для отдельных групп с классификацией по следующим основным признакам:

- химическому составу;
- структуре;
- степени раскисления;
- качеству;
- назначению.

По химическому составу стали классифицируются на углеродистые и легированные. У обеих групп различаются низкоуглеродистые ( $C < 0,3 \%$ ), среднеуглеродистые ( $C = 0,3...0,7 \%$ ) и высокоуглеродистые ( $C > 0,7 \%$ ). У легированных сталей, в зависимости от введенных элементов, различаются группы хромистых, хромоникелевых и многих других. По количеству легирующих элементов стали могут быть низколегированными (менее  $5 \%$ ), среднелегированными ( $5...10 \%$ ), высоколегированными (более  $10 \%$ ).

По структуре стали систематизируются в отожженном и нормализованном состояниях. В зависимости от структуры в отожженном (равновесном) состоянии они могут быть следующих классов:

- доэвтектоидные, имеющие структуру избыточного феррита;
- эвтектоидные, структура которых состоит из перлита;
- заэвтектоидные, в структуре которых имеются вторичные (выделяющиеся из аустенита) карбиды;
- ледебуритные, содержащие в структуре первичные (эвтектические) карбиды;
- аустенитные, со структурой аустенита;
- ферритные, со структурой феррита.

Углеродистые стали могут быть первых трех классов, а легированные – всех классов.

Аустенитные стали образуются при наличии в них большого количества никеля, марганца и других элементов, расширяющих  $\gamma$ -область. В таких сталях аустенит существует в стабильном состоянии от комнатной температуры до температуры плавления.

Если в составе сталей имеются хром, вольфрам, молибден, ванадий, титан, кремний и другие элементы, то устойчивым при всех температурах является  $\alpha$ -состояние. Такие стали называются ферритными.

При определенном легировании возможно образование промежуточных классов – полуферритных и полуаустенитных.

По степени раскисления стали делятся на спокойные, полуспокойные и кипящие.

Раскислением называется процесс удаления кислорода из жидкого металла более активными (чем железо) элементами, иначе сталь хрупко разрушается при горячей деформации.

Спокойные стали раскисляются алюминием, марганцем и кремнием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно, без выделения газов. Содержание кремния в таких сталях обычно составляет  $0,12...0,35 \%$ , что повышает предел текучести, но снижает пластичность.

Кипящие стали раскисляются только марганцем. Перед разливкой они содержат повышенное количество кислорода, который при кристаллизации взаимодействуя с углеродом удаляется в виде углекислого газа. Выделение газа создает впечатление, что сталь кипит. Кипящие стали сравнительно дешевые. Они производятся низкоуглеродистыми и практически без кремния (менее 0,07 %).

Полуспокойные стали раскисляются алюминием и марганцем и занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

По качеству стали классифицируются на стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные. Под качеством понимается совокупность свойств, определяемых процессом ее производства, и зависит от химического состава, строения, содержания газов (кислорода, водорода, азота) и вредных примесей (серы и фосфора). Так как газы относятся к трудноопределяемым компонентам, то разделение сталей по качеству производится, в основном, по количеству вредных примесей. Стали обыкновенного качества содержат до 0,06 % серы и 0,07 % фосфора; качественные – до 0,04 и 0,03 % соответственно; высококачественные – не более 0,025 %; а особовысококачественные – не более 0,015 % каждого. Стали обыкновенного качества выпускаются только углеродистыми ( $C < 0,5 \%$ ), качественные и высококачественные – углеродистыми и легированными, особовысококачественные – легированными.

По назначению стали подразделяются на конструкционные, инструментальные и специальные.

Наиболее распространенной группой является группа конструкционных сталей, из которых изготавливаются изделия промышленных предприятий, транспорта, строительства. Эти стали выдерживают значительные нагрузки, обладают высокой прочностью и вязкостью, имеют высокую сопротивляемость динамическим и ударным воздействиям. Среди конструкционных сталей можно выделить цементуемые, улучшаемые, высокопрочные, рессорно-пружинные, строительные, арматурные, шарикоподшипниковые и другие.

Инструментальные стали подразделяются на стали для режущего и измерительного инструмента, штампов холодного и горячего деформирования.

К сталям специального назначения относятся жаростойкие и жаропрочные, коррозионностойкие, износостойкие, электротехнические и другие.

### 3.2.2. Углеродистые стали

**Состав и свойства углеродистых сталей.** Это сложные по химическому составу сплавы, основными составляющими которых являются железо (97,0...99,5 %) и углерод (до 2,14 %). Кроме того, в них находится ряд элементов, наличие которых вызвано технологическими

особенностями производства (марганец, кремний) или невозможностью полного удаления (сера, фосфор, кислород, водород, азот), а также случайные примеси (хром, никель, медь и др.).

Основное влияние на свойства сталей оказывает углерод. С его увеличением повышаются твердость и прочность, но при этом уменьшаются вязкость и пластичность (рис. 54). Прочность ( $\sigma_b$ ) достигает максимального значения при содержании углерода примерно 0,9 %. С его увеличением повышается порог хладноломкости и уменьшается ударная вязкость. Углерод также оказывает влияние и на технологические свойства: при его повышении сталь снижает способность деформироваться в горячем и особенно холодном состояниях, затрудняется свариваемость.

Примеси в сталях подразделяются на полезные, вредные и случайные.

К полезным примесям относятся кремний и марганец, которые вводятся в сталь в качестве раскислителей при ее выплавке. После раскисления эти элементы частично переходят в сплав. Количество марганца обычно не превышает 0,5...0,7 %, а кремния 0,3...0,5 %. Они растворяются в феррите и тем самым повышают его твердость и прочность.

К вредным примесям относятся сера, фосфор, кислород, водород.

Сера вызывает хрупкость стали при ее горячей обработке. Такое явление называется *красноломкостью*. Красноломкость связана с образованием сульфида железа  $FeS$ , который с  $Fe$  образует легкоплавкую эвтектику Эвт [ $FeS + Fe$ ]. Температура плавления эвтектики  $988^\circ C$ , и располагается она по границам зерен. При горячей обработке стали (с температурой нагрева  $1000^\circ C$  и выше) эвтектика расплавляется, и сталь хрупко разрушается. Поэтому количество серы в сталях строго ограничивается. Красноломкость понижает марганец, который связывает серу в сульфиды  $MnS$ , при этом образование легкоплавкой эвтектики исключается. Частицы сульфидов располагаются в виде отдельных включений, вытянутых в направлении прокатки. Наличие таких включений приводит к снижению пластичности и ударной вязкости.

Фосфор, растворяясь в феррите, повышает его прочность, но очень сильно понижает пластичность, вызывая в стали *хладноломкость* – уменьшение ударной вязкости при понижении температуры (рис. 55).

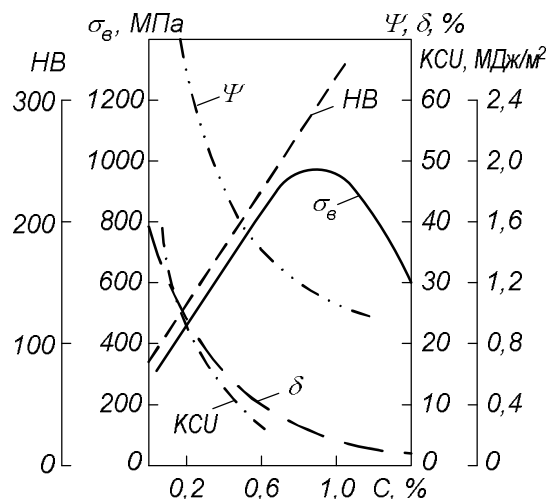


Рис. 54. Влияние углерода на механические свойства стали

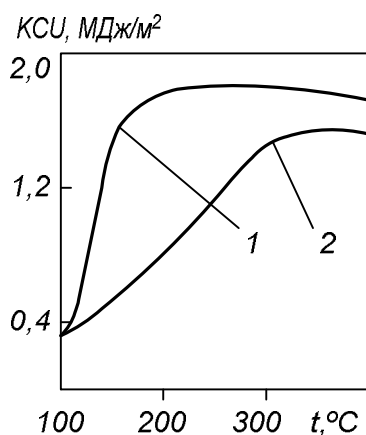


Рис. 55. Влияние фосфора на хладноломкость стали: 1 – 0,08 % Р; 2 – 0,06 % Р

Порогом хладноломкости называется температура, при которой ударная вязкость резко падает. Различаются верхний и нижний пороги хладноломкости. Верхний порог соответствует температуре, при которой в изломе испытуемого образца стали имеется 90 % вязкой составляющей, а нижний порог соответствует наличию в изломе лишь 10 % вязкой составляющей. Критическая температура хрупкости соизмеряется с 50 % вязкой составляющей.

Каждая 0,01 % фосфора повышает порог хладноломкости на 25  $^\circ\text{C}$ . Вредное влияние фосфора усугубляется еще и тем, что он обладает большой склонностью к ликвации. Участки, обогащенные фосфором, отличаются повышенной хрупкостью. Поэтому даже в углеродистых сталях обычного качества количество фосфора не превышает 0,045 %.

Вредные примеси в виде газов находятся в сталях в небольших количествах и трудно определяются. Такие примеси называются скрытыми.

Газовые примеси частично растворены в железе, частично находятся в виде неметаллических включений (оксидов и нитридов) или расположены в свободном состоянии в раковинах, трещинах и других пустотах. Оксиды и нитриды – твердые и хрупкие соединения, которые являясь концентраторами напряжений, снижают пластичность сталей. Водород, несмотря на то, что он не растворяется в стали, вызывает надрывы, называемые *флокенами*.

Случайные примеси – это элементы попадающие в стали при выплавке из руд или вторичного сырья.

**Назначение и маркировка углеродистых сталей.** На рис. 56 приведена классификация углеродистых сталей по назначению.

Конструкционные углеродистые стали обычного качества составляют до 70 % всего проката. Они широко применяются в промышленности, строительстве, на транспорте, в том числе и железнодорожном. Например, сталь Ст3 используется в вагоно- и локомотивостроении для изготовления рам тележек рефрижераторных вагонов, балок надрессорных тележек, подпятников, шкворней, опорных и хребтовых балок, кузовов крытых цельнометаллических вагонов, дверей вагонов всех типов, крышек разгрузочных люков полувагонов и т. д.

Согласно ГОСТ 380-94 конструкционные углеродистые стали обычного качества подразделяются на три группы: А, Б и В. В каждой группе имеется несколько марок.

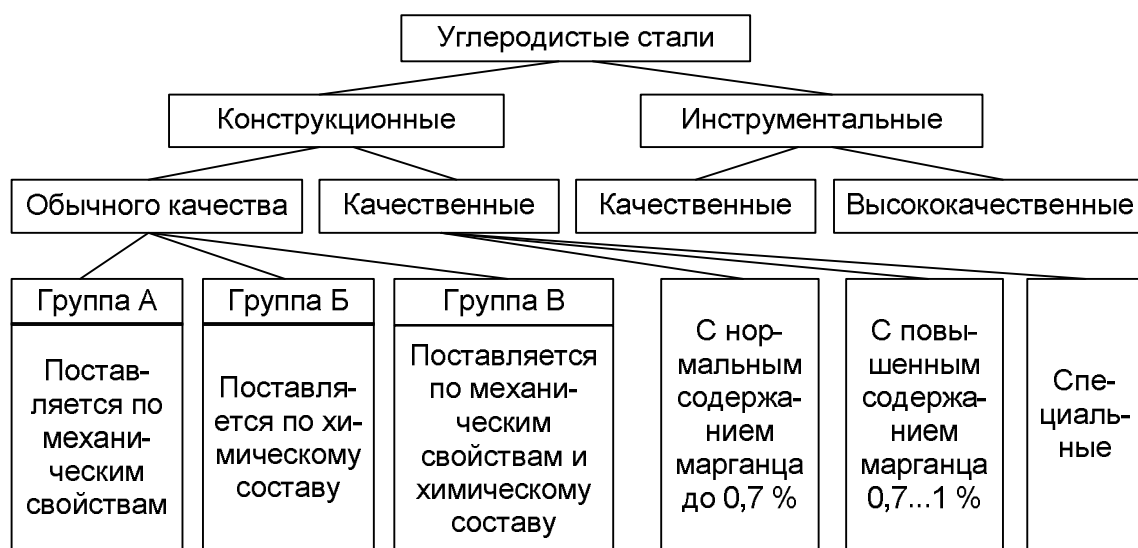


Рис. 56. Классификация углеродистых сталей по назначению

Группа А (поставляемая по механическим свойствам) включает семь марок – Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6.

Группа Б (поставляется по химическому составу) имеет также семь марок – БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6.

Группа В, которая поставляется как по механическим свойствам, так и по химическому составу, включает только пять марок: ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5.

Стали всех групп с номерами марок 1, 2, 3, 4 по степени раскисления изготавливаются кипящими, полуспокойными и спокойными. При их маркировке в конце обозначения приводятся буквы кп (кипящая), пс (полуспокойная) или сп (спокойная). Например, сталь БСт3кп – сталь углеродистая конструкционная обычного качества, поставляется по химическому составу, третьей марки, кипящая.

Полуспокойные стали с номерами марок 1...6 производятся с обычным и повышенным содержанием марганца (от 0,7 до 1,0 %). В этом случае при их обозначении после цифры добавляется буква Г (например, БСт 4Гпс).

Стали марок Ст0 и БСт0 по степени раскисления не разделяются.

Стали марок ВСт1, ВСт2, ВСт3 всех категорий и всех степеней раскисления (в том числе и с повышенным содержанием марганца) поставляются с гарантией свариваемости.

Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 2 июня 1997 г. № 205 с 1 января 1998 г. введен в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 380-94 в качестве государственного стандарта, распространяемого на углеродистую сталь обыкновенного качества, предназначенную для изготовления проката горячекатаного: сортового, фасонного, тол-

столистого, тонколистового, широкополосного и холоднокатаного тонколистового, а также слитков, блюмов, слябов, сутунок, труб, поковок и штамповок, лент, проволоки, метизов и др.

Согласно отмеченному стандарту углеродистая сталь обыкновенного качества изготавливается следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гсп, Ст3Гпс, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гсп, Ст6пс, Ст6сп. Химический состав этих сталей соответствует нормам, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

### Химический состав сталей

| Марка стали | Массовая доля элементов, % |             |             | Марка стали | Массовая доля элементов, % |           |             |
|-------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------|-----------|-------------|
|             | C                          | Mn          | Si          |             | C                          | Mn        | Si          |
| Ст 0        | < 0,23                     | —           | —           | Ст 3Гпс     | 0,14...0,22                | 0,8...1,1 | < 0,15      |
| Ст 1кп      | 0,06...0,12                | 0,25...0,50 | <0,05       | Ст 3Гсп     | 0,14...0,20                | 0,8...1,1 | 0,15...0,30 |
| Ст 1пс      | 0,06...0,12                | 0,25...0,50 | 0,05...0,15 | Ст 4кп      | 0,18...0,27                | 0,4...0,7 | < 0,05      |
| Ст 1сп      | 0,06...0,12                | 0,25...0,50 | 0,15...0,30 | Ст 4пс      | 0,18...0,27                | 0,4...0,7 | 0,05...0,15 |
| Ст 2кп      | 0,09...0,15                | 0,25...0,50 | <0,05       | Ст 4сп      | 0,18...0,27                | 0,4...0,7 | 0,15...0,30 |
| Ст 2пс      | 0,09...0,15                | 0,25...0,50 | 0,05...0,15 | Ст 5пс      | 0,28...0,37                | 0,5...0,8 | 0,05...0,15 |
| Ст 2сп      | 0,09...0,15                | 0,25...0,50 | 0,15...0,30 | Ст 5сп      | 0,28...0,37                | 0,5...0,8 | 0,15...0,30 |
| Ст 3кп      | 0,14...0,22                | 0,30...0,60 | < 0,05      | Ст 5Гпс     | 0,22...0,30                | 0,8...1,2 | < 0,15      |
| Ст 3пс      | 0,14...0,22                | 0,40...0,65 | 0,05...0,15 | Ст 6пс      | 0,38...0,49                | 0,5...0,8 | 0,05...0,15 |
| Ст 3сп      | 0,14...0,22                | 0,40...0,65 | 0,15...0,30 | Ст 6сп      | 0,38...0,49                | 0,5...0,8 | 0,15...0,30 |

Межгосударственный стандарт 380-94 соответствует международным стандартам ИСО 630-80 «Сталь конструкционная. Пластины, широкие фаски, бруски и профили» и ИСО 1052-82 «Сталь конструкционная общего назначения» в части требований к химическому составу. В табл. 3 показано сопоставление марок сталей типа «Ст» и «Fe».

Таблица 3

### Сопоставление марок сталей типа «Ст» и «Fe» по международным стандартам ИСО 630-80 и ИСО 1052-82

| Марки стали |            |         |                    |
|-------------|------------|---------|--------------------|
| «Ст»        | «Fe»       | «Ст»    | «Fe»               |
| Ст 0        | Fe 310     | —       | Fe 360 – D         |
| Ст 1кп      | —          | Ст 4кп  | Fe 430 – A         |
| Ст 1пс      | —          | Ст 4пс  | Fe 430 – B         |
| Ст 1сп      | —          | Ст 4сп  | Fe 430 – C         |
| Ст 2кп      | —          | —       | Fe 430 – D         |
| Ст 2пс      | —          | Ст 5пс  | Fe 510 – B, Fe 490 |
| Ст 2сп      | —          | Ст 5Гпс | Fe 510 – B, Fe 490 |
| Ст 3кп      | Fe 360 – A | Ст 5сп  | Fe 510 – C, Fe 490 |
| Ст 3пс      | Fe 360 – B | Ст 6пс  | Fe 590             |
| Ст 3Гпс     | Fe 360 – B | Ст 6сп  | Fe 590             |
| Ст 3сп      | Fe 360 – C | —       | Fe 690             |
| Ст 3Гсп     | Fe 360 – C |         |                    |

Стали марок Fe 490, Fe 590, Fe 690 изготавливаются полуспокойными и спокойными. Для сталей марок Fe 310, Fe 360, Fe 430, Fe 510 массовая доля марганца – не более 1,6 %; кремния – не более 0,55 %.

Конструкционные углеродистые качественные стали подразделяются (см. рис. 56) на стали с нормальным содержанием марганца (до 0,7 %) и с повышенным (0,7...1 %). По содержанию углерода – на низкоуглеродистые ( $C < 0,3 \%$ ), среднеуглеродистые ( $C = 0,3...0,7 \%$ ) и с повышенным содержанием углерода ( $C > 0,7 \%$ ). При одинаковом содержании углерода конструкционная качественная сталь является более пластичной и вязкой, чем сталь обычного качества.

Низкоуглеродистые качественные стали, обладающие невысокой прочностью, но высокой пластичностью применяются для изготовления различных малонагруженных деталей. Из листового и полосового проката особо пластичной стали (с содержанием углерода 0,05...0,1 %) выполняются изделия холодной штамповкой и глубокой вытяжкой.

Среднеуглеродистые стали применяются после нормализации, улучшения, заковки с низким отпуском и поверхностного упрочнения для изготовления различных деталей в общем и транспортном машиностроении.

Стали с повышенным содержанием углерода обладают значительной прочностью, высокими упругими свойствами и износостойкостью. Они используются после заковки и отпуска для изготовления деталей, работающих в условиях трения при наличии высоких статических и вибрационных нагрузок.

Обозначаются качественные конструкционные стали словом «сталь» и двузначным числом, показывающим примерное содержание углерода в сотых долях процента. При этом для сталей с содержанием углерода менее 0,2 %, не подвергнутых полному раскислению, в конце обозначения добавляются буквы кп (для кипящих сталей) или пс (для полуспокойных).

Для сталей, подвергнутых полному раскислению (спокойных), буквы в конце их наименований не добавляются. Слово «сталь» при обозначении допускается опускать.

Примеры обозначений:

- сталь 60 – конструкционная углеродистая качественная спокойная сталь с примерным содержанием углерода 0,6 %;
- 10пс – конструкционная углеродистая полуспокойная качественная сталь с примерным содержанием углерода 0,1 %;
- 75Гпс – конструкционная углеродистая качественная полуспокойная сталь с примерным содержанием углерода 0,75 % и повышенным содержанием (0,7...1 %) марганца.

Углеродистые качественные стали специального назначения относятся к сталям, к которым предъявляются повышенные требования, учитывающие особые условия работы конструкций.

На железнодорожном транспорте важное место в этой группе занимают стали для мостостроения, рельсовые, осевые, бандажные, колесные, котельные и другие.

Так стали для мостостроения отличаются большой степенью раскисленности и хорошей свариваемостью. Они обладают значительной ударной вязкостью, которая определяется после искусственного старения с учетом возможных изменений свойств при длительной эксплуатации мостов.

Рельсовые стали обладают высокой контактной прочностью и износостойкостью. Они имеют плотную макроструктуру без пороков усадочного характера, высокую сопротивляемость ударным нагрузкам. Для повышения стойкости против износа и образования контактно-усталостных дефектов, рельсы подвергаются термическому упрочнению.

Стали для осей локомотивов и вагонов близки по составу к углеродистой конструкционной качественной стали марки 40. Она применяется в нормализованном состоянии.

Стали для цельнокатаных колес вагонов и бандажей локомотивов близки по составу к сталям 55 и 60. Колеса подвергаются закалке с отпуском.

К группе сталей специального назначения относятся также автоматные стали, которые имеют повышенную обрабатываемость режущим инструментом благодаря наличию в них значительного содержания серы (до 0,3 %) и фосфора (до 0,15 %). В целях повышения обрабатываемости кроме серы и фосфора в стали вводятся свинец, селен, теллур. Такие стали дают возможность в 2...3 раза сократить расход режущего инструмента. Однако, механические свойства (пластичность, вязкость) у автоматных сталей весьма низкие. Поэтому они используются в основном при изготовлении на станках-автоматах малоответственных изделий.

Обозначение углеродистых сталей специального назначения многообразно. Некоторые из них обозначаются аналогично углеродистым качественным (50, 55, 60 и др.), у других – к содержанию углерода добавляется определенный индекс. Например, у литейных конструкционных качественных сталей в конце приводится буква Л (сталь 20Л), а у автоматных – в начале проставляется буква А (сталь А12).

Углеродистые качественные инструментальные стали делятся на две группы: качественные и высококачественные (см. рис. 56). Качественные стали маркируются буквой У и следующей за ней цифрой, показывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента. Например, У8 означает, что это углеродистая инструментальная качественная сталь со средним содержанием углерода 0,8 %. Высококачественные инструментальные стали имеют более низкое содержание серы и фосфора, чем качественные. Обозначаются они ана-

логично последним, но в конце проставляется буква А. Например, У12А – углеродистая инструментальная высококачественная сталь со средним содержанием углерода 1,2 %.

Для режущего инструмента (фрезы, зенкеры, сверла, пилы, ручные ножовки, шаберы, напильники, бритвы и т. д.) обычно используются заэвтектоидные стали У10, У11, У12, У13. Такие инструменты, как зубила, отвертки, топоры, кернеры и др. изготавливаются из сталей У7, У8.

Углеродистые стали используются в качестве режущих только в том случае, когда обработка идет с малыми скоростями, не вызывающими в зоне резания температур, превышающих 200 °С. При более высоких температурах первоначальная высокая твердость (обеспечиваемая закалкой инструмента) резко снижается и режущие свойства теряются.

### 3.2.3. Легированные стали

Легированием (от нем. *legieren* – сплавлять, от лат. *ligo* – соединяю) называется введение в состав металлических сплавов так называемых легирующих элементов для изменения их структуры, придания определенных физических или механических свойств. Легирующие добавки, как правило, вводятся в расплавленный металл.

*Легированные стали* – стали, которые помимо обычных компонентов (углерода, марганца, кремния, серы, фосфора) содержат и другие (легирующие) элементы, либо кремний или марганец в повышенном, кроме обычного, количестве. Легирующие элементы вводятся в основном в виде ферросплавов или лигатур. При суммарном содержании легирующих элементов до 5 % сталь считается низколегированной, от 5 до 10 % – среднелегированной и более 10 % – высоколегированной.

Легированные стали производятся качественными, высококачественными и особовысококачественными. Наиболее часто они подвергаются закалке и отпуску, так как в отожженном состоянии по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых.

**Влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей.** Основной структурной составляющей конструкционных сталей является феррит (не менее 90 % по объему), который во многом определяет их свойства. Поэтому улучшение свойств при легировании обусловлено в первую очередь влиянием легирующих элементов на свойства феррита. Кроме того, легирующие элементы воздействуют на образование и дисперсность карбидных фаз, устойчивость мартенсита при отпуске, прокаливаемость, размеры зерен.

Многие легирующие элементы образуют с углеродом карбиды, а с железом – твердые растворы. Элементы с малым атомным радиусом (азот, бор) образуют (как и углерод) твердые растворы внедрения, а остальные – твердые растворы замещения. Если атомные радиусы эле-

ментов отличаются от атомного радиуса железа до 15 %, то эти элементы имеют повышенную растворимость в  $Fe_\alpha$  или  $Fe_\gamma$  вплоть до неограниченной (например, хром и никель).

Большое значение при формировании структур легированных сталей оказывает тип кристаллической решетки легирующего компонента. Если решетка компонента ОЦК (т. е. аналогична решетке  $Fe_\alpha$ ), то он растворяется преимущественно в  $Fe_\alpha$ , образуя легированный феррит. Эти элементы повышают критическую точку  $A_3$  и понижают  $A_4$  (рис. 57). При этом область твердого раствора на основе  $Fe_\gamma$  сужается. Следовательно, твердые растворы на базе  $Fe_\alpha$  (с содержанием легирующего элемента

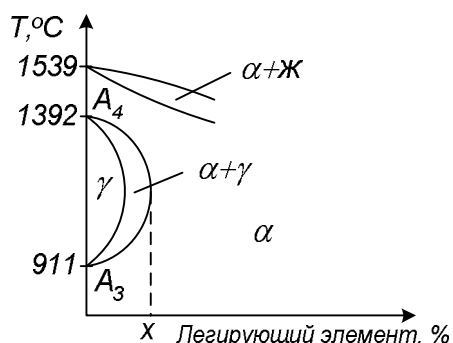


Рис. 57. Диаграмма состояния железа с Si, Cr, W, Mo, V, Ti, Ta, Nb, Zr

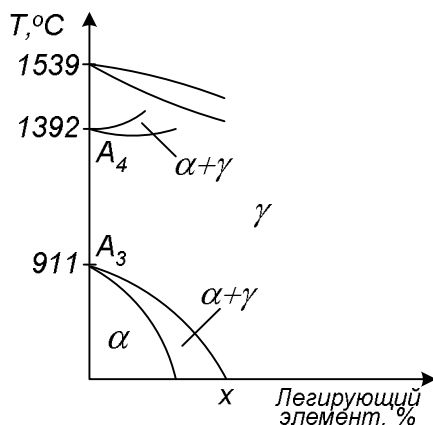


Рис. 58. Диаграмма состояния железа с Mn, Ni, Cu, Zn

больше  $x$ ) существуют вплоть до температуры плавления. К таким легирующим элементам относятся хром, ванадий, молибден, вольфрам, тантал, ниобий, цирконий, титан. Если элемент имеет решетку ГЦК (аналогичную решетке  $Fe_\gamma$ ), или низкотемпературная его модификация отличается от обеих модификаций железа, то такие элементы преимущественно растворяются в  $Fe_\gamma$ , образуя легированный аустенит. При этом критическая точка  $A_3$  понижается, а точка  $A_4$  — повышается (рис. 58). В этом случае расширяется область твердых растворов на основе  $Fe_\gamma$ , которые (при наличии легирующего элемента больше  $x$ ) существуют при комнатной температуре. Отмеченные структурные изменения в легированных сталях вызывают марганец, никель, цинк, рубидий, медь.

Легирующие элементы, растворяясь в феррите, упрочняют его. Наиболее сильно повышают твердость кремний, марганец и никель. Меньшее влияние на твердость оказывают молибден, вольфрам и хром (рис. 59, а). Упрочняя феррит, большинство легирующих элементов (за исключением никеля) снижают его ударную вязкость (рис. 59, б). Марганец и хром, при их содержании до 1,5 %, ударную вязкость несколько повышают. Однако при дальнейшем возрастании количества она снижается, достигая уровня нелегированного феррита, примерно при 3,5 % хрома и 1,5 % марганца. Следовательно, для достижения заданных свойств легированных сталей количество легирующих компонентов должно быть рациональным.

Наряду с железом в легированных сталях всегда присутствует углерод, с которым многие легирующие элементы могут вступать во взаимодействие, образуя карбиды.

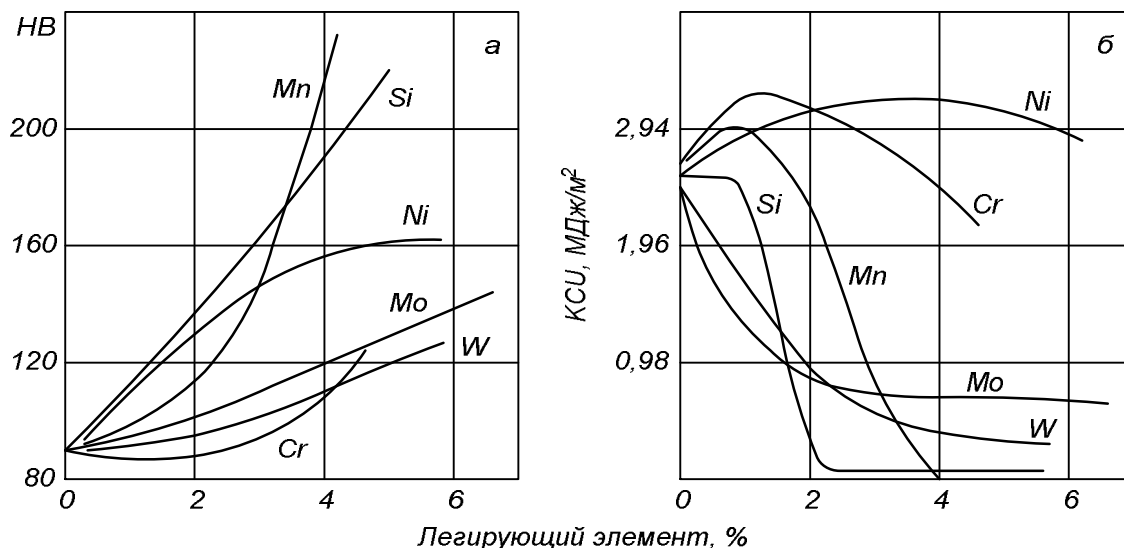


Рис. 59. Влияние легирующих элементов на свойства феррита:  
а – твердость; б – ударная вязкость

Легирующие элементы по отношению к углероду располагаются в ряд по возрастающей степени сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Mn} \rightarrow \text{Cr} \rightarrow \text{Mo} \rightarrow \text{W} \rightarrow \text{Nb} \rightarrow \text{V} \rightarrow \text{Zr} \rightarrow \text{Ti}$ .

Все карбиды, встречающиеся в сталях, в зависимости от строения кристаллической решетки подразделяются на две группы:

- карбиды первой группы имеют сложные кристаллические решетки. К ним относятся карбиды типов  $\text{M}_3\text{C}$ ,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{M}_7\text{C}_3$ ,  $\text{M}_6\text{C}$ , где под М имеется ввиду сумма металлических карбидообразующих элементов. Например,  $(\text{Fe}, \text{W})_3\text{C}$ ;  $(\text{Cr}, \text{Fe}, \text{Mo})_{23}\text{C}_6$ ;  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$  и др. Карбиды первой группы сравнительно легко растворяются в аустените при нагреве. При этом они более устойчивы (при высоких температурах), чем легированный цементит;

- во вторую группу входят специальные карбиды типа  $\text{MC}$  и  $\text{M}_2\text{C}$ , которые являются фазами внедрения. Эти карбиды имеют простые кристаллические решетки и обладают высокой устойчивостью. В реальных условиях они почти не растворяются в аустените.

Все карбидные фазы имеют высокую температуру плавления и большую твердость. В этом отношении карбиды второй группы превосходят карбиды первой группы.

Не образуют карбидов кремний, алюминий, медь, никель. Эти элементы находятся в сталях в твердых растворах (аустените или феррите). Отмеченные элементы при определенных условиях снижают устойчи-

вость карбидов других элементов. Особенно сильно они влияют на устойчивость цементита, способствуя его распаду на феррит и свободный углерод (графит). Такие элементы называются графитизирующими. Наиболее графитизирующее действие оказывает кремний.

Легирующие элементы в промышленных сталях могут находиться в свободном состоянии; в форме интерметаллических соединений с железом или между собой; в виде оксидов, сульфидов и других неметаллических включений.

Не образуют соединений с железом свинец, серебро и медь. Кроме того, серебро и свинец нерастворимы в твердом железе, а растворимость меди составляет приблизительно 1 %. Поэтому при наличии в стали даже незначительного количества свинца, серебра или меди они будут находиться в виде металлических включений. Стали легированные серебром, свинцом (кроме автоматных сталей) и медью (при содержании ее более 1 %) промышленного использования не имеют.

Большинство применяемых легирующих компонентов могут образовывать интерметаллические соединения, что имеет большое значение для формирования структуры и свойств высоколегированных сталей.

Многие элементы (особенно имеющие сродство к кислороду большее, чем у железа) образуют оксиды и другие неметаллические соединения. Такие элементы используются в качестве раскислителей при выплавке сталей.

Кроме большого сродства к кислороду, некоторые элементы имеют большее, чем у железа, сродство к сере, в результате чего образуются сульфиды. В общем случае количество оксидов, сульфидов и других неметаллических включений в обычных промышленных сталях невелико и зависит от способа их получения.

На железнодорожном транспорте наиболее широкое применение находят стали, содержащие следующие легирующие элементы:

- х р о м в количестве до 0,3 % в низколегированных сталях; 0,7...3,5 % в среднелегированных и 9...35 % в высоколегированных хромистых и хромоникелевых. Этот элемент повышает коррозионную стойкость и твердость, содействует образованию тугоплавких окислов. Он относится к недефицитным легирующим компонентам, что предопределяет его широкое использование;

- м а р г а н е ц также относится к относительно дешевым и широко распространенным легирующим элементам. До 1,5 % нередко используется как заменитель никеля. Он существенно повышает предел текучести, однако делает сталь чувствительной к перегреву. Поэтому для измельчения зерна вместе с ним вводятся карбидообразующие компоненты. В значительных количествах (11...14 % в сталях типа Г13Л) обеспечивает высокую вязкость, износостойкость и повышенную наклепываемость;

– кремний, количество которого ограничивается 1,5...2 %, дешевый, не образующий карбидов элемент. Значительно повышает жидкотекучесть (что ухудшает свариваемость), несколько затрудняет разупрочнение стали при отпуске, повышает порог хладноломкости при содержании свыше 1 %;

– никель вводится в количестве 0,2...35 %. Сильно повышает вязкость, хладостойкость, коррозионную стойкость, пластические и прочностные свойства сталей, измельчает зерна;

– молибден и вольфрам относятся к дорогим и дефицитным карбидообразующим элементам. Вводятся в количествах 0,15...0,8 % молибдена и 0,18...1,8 % вольфрама. Они увеличивают твердость и прочность стали при ударных нагрузках и высоких температурах, измельчают зерно, повышают стойкость к отпуску, увеличивают прокаливаемость;

– титан и ванадий вводятся в количествах 0,02...1 % и 0,05...0,8 % соответственно. Относятся к сильным карбидообразующим компонентам. Вводятся в стали, содержащие хром, марганец, никель для измельчения зерна. Повышают прочность и вязкость. Однако, при повышенном их содержании образуются специальные труднорастворимые при нагреве избыточные карбиды, которые снижают прокаливаемость и располагаясь по границам зерен способствуют хрупкому разрушению.

– бор используется для микролегирования сталей с целью увеличения прокаливаемости. Вводится в количестве 0,002...0,005 %. Микролегирование бором эквивалентно 1 % никеля; 0,5 % хрома и 0,2 % молибдена.

**Назначение и классификация легированных сталей.** По назначению легированные стали можно подразделить на конструкционные (общего назначения, для машиностроения, строительные, высокопрочные, коррозионностойкие, жаропрочные и др.), инструментальные и стали с особыми физическими свойствами.

Конструкционные легированные стали делятся на улучшаемые, цементуемые, для азотирования, для поверхностной закалки и ряд других.

Улучшаемые стали содержат 0,3...0,5 % углерода, до 1 % хрома и до 5 % других легирующих элементов, которые должны обеспечивать сквозную прокаливаемость изделий и заданный уровень свойств по всему сечению, так как все улучшаемые стали подвергаются закалке и высокотемпературному отпуску. Для измельчения зерна вводятся по 0,1 % титана, ванадия, ниобия, циркония. Для уменьшения хрупкости, стали легируются молибденом или вольфрамом. Для изготовления деталей сложных конфигураций в стали вводится никель.

Цементуемые стали содержат углерода 0,1...0,3 %. Для повышения твердости цементованного слоя и увеличения глубины прокали в стали вводятся хром и бор, а для изделий с большими сечениями дополни-

тельно легируются хромом и никелем. Для уменьшения стоимости цементуемых сталей никель иногда заменяется марганцем. Для поверхностной закалки применяются стали с содержанием 0,4...0,5 % углерода и 1,5...2 % хрома.

Азотированию подвергаются стали с наличием 0,3...0,4 % углерода легированные хромом и молибденом (1,7...2,1 % каждого). Кроме этих элементов, в стали зачастую вводятся дополнительно алюминий или титан, которые образуют в насыщенном азотом слое очень твердые и химически прочные нитриды.

В группу легированных сталей для машиностроения можно включить пружинно-рессорные, шарикоподшипниковые и износостойкие.

Пружинные стали должны обладать высоким пределом текучести (не менее 1000 МПа) при твердости 39...44 HRC для чего они легируются кремнием, хромом, марганцем, ванадием, бором. Так, например, для пружин подвижного состава железнодорожного транспорта основным материалом является сталь с содержанием, %: 0,57...0,65 углерода; 0,6...0,9 марганца и 1,5...2 кремния; а для рессор грузовых автомобилей – 0,46...0,54 углерода; 0,5...0,8 марганца; 0,17...0,37 кремния; 0,8...1,1 хрома и 0,1...0,2 ванадия.

Железнодорожный транспорт и транспортное машиностроение являются крупнейшими потребителями подшипников. Для изготовления шариков, роликов и колец подшипников качения используются высокоуглеродистые ( $C = 0,4...1,15\%$ ) стали легированные хромом от 0,4 до 1,95 %. Крупногабаритные подшипники изготавливаются из шарикоподшипниковых сталей, которые кроме хрома содержат кремний и марганец. К шарикоподшипниковым сталям предъявляются очень жесткие требования по содержанию неметаллических включений, так как они являются основной причиной разрушения подшипников качения. Изделия из шарикоподшипниковых сталей подвергаются закалке с последующим низким отпускком до твердости 61...66 HRC.

Необходимые свойства износостойких сталей обеспечиваются закалкой на мартенсит с включениями карбидов очень высокой твердости. Однако есть сталь, имеющая сравнительно небольшую твердость (180...220 HB), которая в условиях трения, сопровождаемая большим удельным давлением, обладает значительным сопротивлением износу. Это высоколегированная марганцовистая сталь Г13, содержащая 1...1,4 % углерода; 11...14 % марганца и 0,7 % кремния. Эту сталь иногда называют сталью Гадфильда по имени инженера, предложившего ее состав в 1886 г. Сталь хорошо работает в условиях ударного износа, так как способна упрочняться в местах приложения нагрузки. Она имеет широкое применение на железнодорожном транспорте. Из этой стали изготавливаются работающие в очень тяжелых условиях крестовины стре-

лочных переводов, ковши экскаваторов, детали камнедробилок, некоторые детали электровозов – втулки подвески тормозного башмака, боковые опоры, детали крепления тягового электродвигателя и др.

К коррозионностойким относятся стали обладающие высокой стойкостью против коррозии в атмосферных условиях, в морской и речной воде, в растворах солей и кислот. Основным легирующим компонентом нержавеющей сталей является хром. При его содержании 12...13 % повышается электрохимический потенциал до положительных значений, структура становится однофазной ферритной. Кроме того, от коррозии предохраняет тонкая, но очень прочная пленка окислов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , которая образуется на поверхности деталей. Антикоррозионные свойства хромистых сталей повышаются введением в их состав никеля. В соответствии с этим различаются хромистые и хромоникелевые нержавеющие стали. Часто в хромоникелевые стали вводится титан (до 0,7 %), чтобы связать углерод в стойкие карбиды титана и тем самым предотвратить образование карбидов хрома, которые обедняют границы зерен хромом и сталь становится склонной к межкристаллитной коррозии.

Из-за дефицитности никеля разработан ряд нержавеющей сталей с меньшим его содержанием. Для сохранения аустенитной структуры в их состав вводится большое количество марганца.

На железнодорожном транспорте коррозионностойкие стали используются для изготовления лопаток турбин, химической аппаратуры, котлов цистерн, предназначенных для перевозки серной и азотной кислоты, поливинилхлорида, расплавленной серы, плодовоовощных соков и т. д.

Жаростойкие стали должны обладать высокой сопротивляемостью образования окалины при воздействии различных газов в условиях повышенной температуры. Для этих целей в состав сталей вводятся хром, алюминий и кремний, которые образуют прочные пленки окислов ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ), защищающих металл от кислорода и печных газов при температурах до 1000 °С.

Жаростойкие стали не являются жаропрочными, поэтому не могут выдерживать значительные нагрузки при высоких температурах в течение длительного времени.

К жаропрочным относятся стали, сохраняющие достаточно высокую прочность и окалиностойкость при высоких температурах. Все жаропрочные стали легируются хромом, который играет роль упрочнителя. Для работы до 580 °С используются стали перлитного класса (0,12...0,2 % углерода; 0,3...0,5 % хрома; 0,4...0,6 % молибдена). Более жаропрочными являются стали мартенситного класса (0,12...0,19 % углерода; 10...11,5 % хрома; 0,6...0,8 % молибдена).

К жаропрочным сталям относятся силхромы, легированные хромом и кремнием: 0,35...0,45 % углерода; 8...10 % хрома; 2...3 % кремния. Из них изготавливаются клапаны двигателей внутреннего сгорания.

Наиболее жаропрочные аустенитные стали содержат большие количества хрома, марганца, никеля и добавки молибдена, вольфрама, ванадия, ниобия, бора. Такие стали упрочняются либо за счет карбидов, либо за счет промежуточных фаз. В сталях с карбидным упрочнением находится до 0,3...0,55 % углерода.

Для работы изделий при температурах выше 700 °С используются сплавы на основе никеля, кобальта и молибдена, а также металлокерамические на основе тугоплавких соединений.

В качестве строительных сталей наиболее часто используются низколегированные сплавы с содержанием, %: углерода не более 0,22; марганца до 1,8; кремния 1,1...1,2; хрома и никеля до 0,8; меди 0,3...0,5; ванадия и азота до 1,5; титана до 0,3.

Легирующие элементы, растворяясь в феррите, измельчают карбидную фазу, уменьшают размер зерен, увеличивают склонность аустенита к переохлаждению. Все это приводит к высоким значениям пределов прочности и текучести, сохранению высокой пластичности. Введение в сталь меди и никеля увеличивает коррозионную стойкость в атмосферных условиях, понижает порог хладноломкости. Существенно повышают механические и технологические свойства ванадий (0,05...0,12 %) и азот (0,015...0,025 %). При их взаимодействии образуется нитрид ванадия, позволяющий получить очень мелкое зерно и низкий порог хладноломкости.

Строительные стали имеют хорошую свариваемость, высокие значения прочности и ударной вязкости, как при обычных, так и при пониженных температурах. Низколегированные горячекатаные стали используются и в качестве арматурных для изготовления обычных и предварительно напряженных конструкций (стержневая арматурная сталь).

Инструментальные легированные стали должны обладать высокой твердостью (60...65 HRC), прочностью и износостойкостью. В некоторых случаях от инструментов требуется повышенная коррозионная стойкость.

В зависимости от условий эксплуатации инструментальные стали подразделяются на стали для измерительных инструментов, стали для режущих инструментов и штамповые.

Для измерительных инструментов (плиток, шаблонов, калибров) используются стали, имеющие высокую твердость, износостойкость, сохраняющие постоянство размеров. Наиболее часто применяются высокоуглеродистые хромистые стали с содержанием углерода 0,95...1,3 % и хрома 1,3...1,65 %.

Легированные стали для режущих инструментов имеют невысокую теплостойкость и пригодны только для резания с небольшой скоростью. Они имеют 0,85...1,4 % углерода и легированы хромом, марганцем, кремнием, вольфрамом. Стали могут работать при температурах не выше

250 °С. Они используются для изготовления напильников, плашек, холодных вырубных штампов. Стали с повышенным содержанием вольфрама (2...4,5 %) после закалки имеют очень высокую твердость (64...67 HRC) и применяются для пил по металлу и граверных инструментов.

Быстрорежущие стали, в отличие от других инструментальных, имеют высокую теплостойкость, то есть способность сохранять высокую твердость, прочность и износостойкость при повышенных температурах, возникающих в зоне резания. Это дает возможность повышать скорости резания (в 2...4 раза) и стойкость инструмента (в 10...30 раз) по сравнению со сталями, не обладающими высокой теплостойкостью. Основными легирующими элементами быстрорежущих сталей являются, %: углерод 0,8...1; вольфрам 5,5...19; хром 3...4,5; ванадий 1...2,5; молибден 0,5...5,5. Их фазовый состав в отожженном состоянии представляет собой легированный феррит и карбиды. В феррите растворена большая часть хрома, а вольфрам, молибден и ванадий практически полностью находятся в карбидах.

Для придания быстрорежущей стали высокой теплостойкости осуществляется ее закалка и многократный отпуск. Последний необходим для того, чтобы при цикле «нагрев–охлаждение» происходило более полное превращение остаточного аустенита в мартенсит и повышение твердости.

Из быстрорежущих сталей изготавливаются фасонные резцы, сверла, развертки, зенкеры, метчики, протяжки, фрезы, долбяки, шеверы, инструменты для холодного и полугорячего выдавливания легированных сталей и сплавов.

Штамповые стали предназначены для изготовления инструментов и штампов холодного и горячего деформирования. Штампы для деформирования металлов при нормальных температурах должны иметь высокую твердость, износостойкость, прочность и достаточную вязкость. В связи с тем, что в процессе деформирования достигается большая скорость штампы разогреваются до температуры 200...350 °С, что требует от инструментов значительной теплостойкости. Наиболее часто для изготовления таких штампов используются стали с содержанием углерода 0,5...1,65 %, хрома 1,5...12,5 %, ванадия 0,1...0,9 %. Кроме того, для измельчения зерна, достижения высокой устойчивости аустенита, увеличения прокаливаемости, уменьшения карбидной неоднородности в стали включаются кремний, марганец, молибден, вольфрам в количествах от 0,5 до 2,5 %.

Износостойкость и устойчивость против нагрева может быть повышена азотированием при температуре 520...560 °С перед закалкой.

Стали для изготовления штампов деформирующих металл в горячем состоянии должны иметь, кроме высоких механических свойств при повышенных температурах, высокие окалиностойкость и разгаростойкость, т. е. способность выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования разгарных трещин. Кроме того, необходима высокая теп-

лопроводность для лучшего отвода тепла, передаваемого обрабатываемой заготовкой. Основными легирующими элементами наиболее распространенных сталей для штампов горячего деформирования являются углерод (0,3...0,6 %), хром (0,6...5,5 %) и вольфрам (0,4...8,5 %). Для формирования других заданных свойств, в стали добавляются такие элементы, как никель (1,4...1,8 %), молибден (0,15...1,5 %), ванадий (0,6...1,1 %), кремний (0,8...1,2 %).

**Обозначение легированных сталей.** Конструкционные легированные стали обозначаются цифрами и буквами. В начале наименования цифрами указывается среднее содержание углерода в сотых долях процента. Далее следуют буквы, показывающие наличие в стали легирующих элементов (табл. 4). Цифры после каждой буквы обозначают содержание соответствующего элемента в процентах, округленного до целого числа. При содержании легирующего элемента до 1,5 % цифра за соответствующей буквой не проставляется. Если в стали ограничено содержание серы и фосфора ( $S < 0,03 \%$ ;  $P < 0,03 \%$ ), и сталь относится к группе высококачественных, то в конце ее обозначения ставится буква А.

Таблица 4

**Обозначения легирующих элементов**

| Легирующий элемент | Обозначение элемента | Легирующий элемент     | Обозначение элемента                       |
|--------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| Хром               | Х                    | Никель                 | Н                                          |
| Марганец           | Г                    | Кобальт                | К                                          |
| Вольфрам           | В                    | Бор                    | Р                                          |
| Кремний            | С                    | Ниобий                 | Б                                          |
| Алюминий           | Ю                    | Цирконий               | Ц                                          |
| Медь               | Д                    | Фосфор                 | П                                          |
| Титан              | Т                    | Селен                  | Е                                          |
| Ванадий            | Ф                    | Редкоземельные металлы | Ч                                          |
| Молибден           | М                    | Азот                   | А (если находится в середине наименования) |

Особовысококачественные стали, которые подвергались электрошлаковому переплаву, обеспечивающему эффективную очистку от сульфидов и оксидов, обозначаются добавлением в конце наименования через тире буквы Ш.

Литейные конструкционные легированные стали обозначаются аналогично качественным углеродистым и легированным, только в конце наименования проставляется буква Л.

Примеры обозначений конструкционных легированных сталей:

12ХН – сталь конструкционная, легированная, с содержанием, %: 0,09...0,15 углерода; 0,4...0,7 хрома; 0,5...0,8 никеля;

30Х3МФА – сталь конструкционная, легированная, высококачественная, в состав которой входят, %: углерод 0,27...0,34; хром 2,3...2,7; молибден 0,2...0,3; ванадий 0,06...0,12; сера и фосфор менее 0,03 каждого;

10Х12НЗМ2ФА–Ш – сталь конструкционная, легированная, особокачественная с содержанием следующих элементов, %: углерода 0,08...0,12; хрома 11...12,5; никеля 2,5...2,9; молибдена 1,5...2; ванадия 0,25...0,4; серы менее 0,015; фосфора менее 0,02;

20ГСЛ – сталь конструкционная, легированная, литейная с содержанием, %: углерода 0,16...0,22; марганца 1...1,34 кремния 0,6...0,8; серы и фосфора менее 0,03.

Строительные стали обозначаются буквой С (строительная) и цифрами, соответствующими минимальному пределу текучести. Буква К в конце наименования указывает на повышенную коррозионную стойкость стали, буква Т на термоупрочненный прокат, а буква Д на повышенное содержание меди.

Примеры обозначений:

С255 – строительная сталь с пределом текучести  $\sigma_T = 255 \text{ Н/мм}^2$ ;

С345Т – строительная сталь с пределом текучести  $\sigma_T = 345 \text{ Н/мм}^2$ , термоупрочненная;

С390К – строительная сталь с пределом текучести  $\sigma_T = 390 \text{ Н/мм}^2$ , с повышенной коррозионной стойкостью.

Автоматные стали обозначаются буквой А (автоматная) за которой следуют цифры, указывающие на среднее содержание углерода в сотых долях процента. Последующие буквы и цифры показывают наличие легирующих элементов и их количество в процентах. При отсутствии цифры за обозначением легирующего элемента, количество последнего составляет менее 1,5 %. Если сталь легирована свинцом, то обозначение начинается с букв АС.

Примеры обозначений:

А40Г – сталь автоматная, состава, %: углерода 0,37...0,45; кремния 0,15...0,35; марганца 1,2...1,5; серы 0,18...0,3; фосфора менее 0,05;

АС25ХГМ – сталь автоматная, состава, %: углерода 0,23...0,29; хрома 0,9...1,2; марганца 0,9...1,2; молибдена 0,2...0,3; свинца 0,15...0,3; серы и фосфора менее 0,05.

Подшипниковые стали обозначаются так же, как и легированные, но в начале ставится буква Ш. Для сталей, подвергнутых электрошлаковому переплаву, в конце обозначения через тире ставится буква Ш.

Примеры обозначений:

ШХ15 – сталь шарикоподшипниковая, с содержанием углерода 0,95...1,05 %; хрома 1,3...1,6 %; кремния 0,17...0,37 %; марганца 0,2...0,4 %; серы и фосфора менее 0,02 % каждого;

ШХ20СГ-Ш – сталь шарикоподшипниковая, подвергнутая электрошлаковому переплаву, с содержанием, %: углерода 0,95...1,1; хрома 1,9...2,1; кремния 0,6...0,8%; марганца 1,3...1,5; серы менее 0,015; фосфора менее 0,02.

Инструментальные легированные стали обозначаются в основном также, как и конструкционные. Отличие состоит лишь в том, что содержание углерода указывается не в сотых, а в десятых долях процента. Если содержание углерода составляет 0,9...1 %, то соответствующая цифра в начале ее наименования не указывается.

Примеры обозначений:

4Х2В5МФ – сталь легированная, инструментальная, с содержанием следующих элементов, %: углерода 0,3...0,4; хрома 2,2...3; вольфрама 4,5...5,5; молибдена 0,6...0,9; ванадия 0,6...0,9; серы и фосфора менее 0,03 каждого;

ХВГ – сталь легированная инструментальная состава, %: углерод 0,9...1,05; хром 0,9...1,2; вольфрам 1,2...1,6; марганец 0,8...1,1; сера и фосфор менее 0,03 каждого.

Быстрорежущие стали обозначаются буквой Р и цифрой, указывающей на среднее содержание в стали вольфрама. Далее следуют буквы и цифры, соответствующие наличию и количеству других легирующих элементов. В отличие от легированных сталей в наименованиях быстрорежущих не указывается процентное содержание хрома, так как он имеется во всех марках в количестве около 4 %. Содержание ванадия пропорционально содержанию углерода. Если ванадия в стали содержится более 2,5 %, тогда он обозначается буквой Ф и числом, соответствующим его количеству в процентах.

Примеры обозначений:

Р18 – быстрорежущая сталь, содержащая, %: углерода 0,73...0,83; вольфрама 17...18,5; кремния 0,2...0,5; марганца 0,2...0,5; хрома 3,8...4,4; ванадия 1...1,4; серы и фосфора менее 0,03 каждого;

Р6М5 – быстрорежущая сталь, содержащая, %: углерод 0,82...0,9; вольфрам 5,5...6,5; кремний 0,2...0,5; марганец 0,2...0,5; молибден 4,5...5,3; ванадий 1,7...2,1; сера – менее 0,025; фосфор – менее 0,03;

11РЗАМЗФ2 – быстрорежущая сталь, с содержанием, %: углерода 1,02...1,12; вольфрама 2,5...3,3; кремния 0,2...0,5; марганца 0,2...0,5; хрома 3,8...4,4; азота 0,05...0,1; молибдена 2,5...3; ванадия 2,3...2,7; серы и фосфора менее 0,03 каждого.

В приложениях 1,2 и 3 приведены в соответствии с [14] Европейская система обозначения сталей, система маркировки сталей в США и система маркировки сталей в Японии.

### 3.2.4. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами

В эту группу можно включить электротехнические кремнистые стали, стали и сплавы для постоянных магнитов, стали с заданными упругими свойствами, сплавы с малым термическим расширением, сплавы с большим электросопротивлением.

Электротехнические стали содержат не более 0,1 % углерода и 1...4 % кремния и имеют ферритную структуру. Основное назначение таких сталей – для изготовления деталей электрических машин, работающих в переменном магнитном поле. Кремнистые стали являются типичными магнитомягкими материалами, т. е. легко перемагничиваются, имеют повышенное электросопротивление, что снижает потери энергии на вихревые токи при работе в переменных магнитных полях, имеют высокую магнитную проницаемость.

Обозначаются электротехнические стали буквой Э (электротехническая сталь) и следующими за ней цифрами. Цифры 1,2,3,4, стоящие на первом месте за буквой Э, указывают на степень легирования стали кремнием. Цифры стоящие на втором месте (1...8) отражают гарантированные электрические и магнитные свойства. Для холоднокатаной стали к цифрам добавляются один или два нуля (0 – сильно текстурованная, 00 – малотекстурованная). Например: Э1200 – электротехническая сталь, слаболегированная кремнием ( $Si = 0,8...1,8 \%$ ), с пониженными магнитными потерями, холоднокатаная, малотекстурованная. Если сталь имеет очень низкие удельные потери, то в обозначение дополнительно вводится буква А (Э43А, Э330А).

Низколегированные электротехнические стали (1...2 % Si) используются для изготовления статоров, роторов и якорей электродвигателей небольшой мощности. Стали с содержанием кремния 3...4 % – для сердечников силовых трансформаторов и статоров мощных электрических машин. Сплавы с большой магнитной проницаемостью предназначены для магнитопроводов слаботочных приборов в электро- и радиотехнике.

Сплавы для постоянных магнитов являются магнитотвердыми, так как для их перемагничивания требуется значительная напряженность магнитного поля обратного направления. Сравнительно маломощные магниты изготавливаются из углеродистых сталей У10, У12 со структурой слабоотпущенного мартенсита. Более высокие магнитные свойства имеют специальные хромистые и хромистокобальтовые стали, содержащие 1 % углерода и 4,5...5,5 % хрома и кобальта. Еще более высокими характеристиками обладают сплавы железо – никель – алюминий, называемые альни. Они содержат 20...25 % никеля, 11...13 % алюминия, не более 0,05 % углерода. Одними из лучших магнитотвердых сплавов на железной основе являются альнико, содержащие 15...20 % никеля, 20...25 % кобальта, 9...11 % алюминия, 4...5 % меди. Эти сплавы обозначаются ЮНДК.

Сплавы с заданными упругими свойствами обладают прямолинейной зависимостью модуля упругости от температуры до 200 °С, что позволяет корректировать работу приборов, в которых эти сплавы используются в качестве упругих элементов. Примером подобных сплавов может служить элинвар (41...43 % никеля, 5...6 % хрома, 2...3 % титана, 0,8...1 % алюминия). В электровакуумной технике широко применяется сплав ковар (29 % никеля, 18 % кобальта, остальное – железо).

Сплавы с большим электросопротивлением предназначены для работы в качестве нагревательных элементов в печах сопротивления и поэтому обладают высокой жаростойкостью. В состав этих сплавов входят хром и алюминий. Например, сплав фехраль содержит до 0,1 % углерода, 12...14 % хрома и 3...4 % алюминия. Он может работать на воздухе при высоких температурах несколько сотен часов.

### 3.3. Конструкционные чугуны

Чугунами называются железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода более 2,14 %. В состав чугунов всегда входят кремний (0,5...3 %) и марганец (0,5...1,5 %).

Чугуны являются исключительно литейными сплавами. Они не подвергаются никакому пластическому деформированию. Чугунные отливки составляют более 80 % всего фасонного литья.

По структуре и свойствам чугуны подразделяются на белые (структура которых рассмотрена в гл. 3 настоящего пособия), серые, высокопрочные и ковкие.

В серых чугунах часть углерода находится в виде графита, а часть в связанном состоянии в виде цементита или весь углерод находится в свободном состоянии в виде графита (пластинчатая форма (рис. 60, а).

Высокопрочные и ковкие чугуны имеют основу аналогичную серым, но форму графита соответственно шаровидную (рис. 60, б) и хлопьевидную (рис. 60, в).

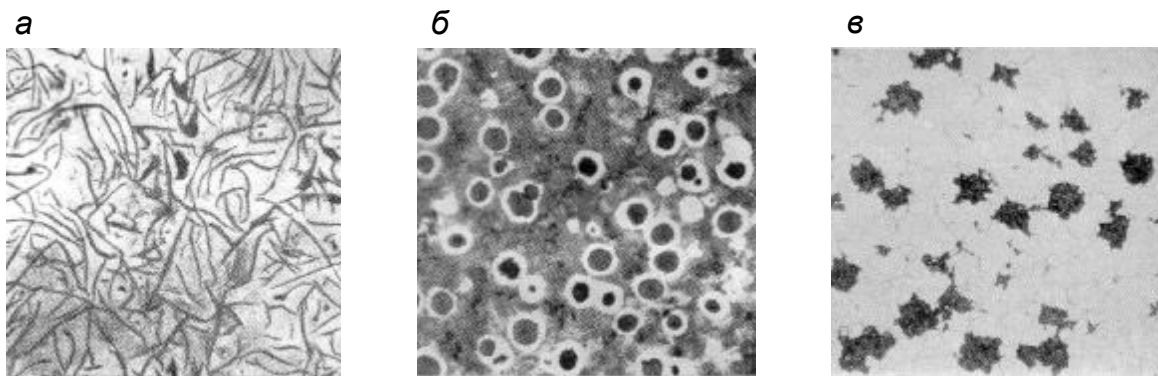


Рис. 60. Типы чугунов с различной формой графита: а – пластинчатая (серый чугун),  $\times 100$ ; б – шаровидная (высокопрочный чугун),  $\times 100$ ; в – хлопьевидная (ковкий чугун),  $\times 100$

В зависимости от формы графитных включений изменяется прочность чугуна. Наиболее сильно ослабляет металлическую основу пластинчатый графит, наименее сильно – шаровидный.

### 3.3.1. Серые чугуны

При производстве отливок возможны случаи, когда кроме белых чугунов (в которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита) и феррито-графитных (в которых углерод находится в свободном состоянии в виде графита) получают чугуны, в структуре которых имеются и графит и цементит, т. е. часть углерода находится в свободном, а часть в связанном состоянии. В соответствии с этим конструкционные чугуны производятся со следующими структурами:

- ферритные, со структурой: феррит + графит. В них металлической основой является феррит, а весь углерод присутствует в виде графита;
- перлитные, со структурой: перлит + графит. Эти чугуны имеют перлитную основу, а графит выделен в виде тонких пластин (прожилок);
- феррито-перлитные, со структурой: феррит + перлит и включениями веретенообразного (вермикулярного) графита. В таких чугунах количество углерода в связанном состоянии не превышает 0,8 %.

Образование отмеченных структур вызывается тем, что кристаллизация чугуна начинается по графитной системе, т. е. выделяется какое-то количество графита. Однако, чтобы все время выделялся графит, необходимо очень медленное охлаждение. При этом чем ниже температура, тем меньше должна быть скорость. Если при какой-то температуре скорость охлаждения больше скорости, обеспечивающей выделение графита, то его выделение частично или полностью прекращается. Сплав по отношению к условиям кристаллизации графита оказывается переохлажденным, что способствует выделению цементита. Следовательно, кристаллизация с графитной системы переходит на цементитную. Процесс кристаллизации в этом случае становится смешанным.

На структуру (а соответственно и свойства) чугуна сильное влияние оказывает химический состав. Кремний, титан, никель, медь, алюминий называются графитизирующими элементами, так как они способствуют выделению углерода в виде графита. Препятствуют выделению графита марганец, молибден, хром, ванадий, вольфрам, сера. Такие элементы относятся к антиграфитизирующим.

Для получения заданной структуры обычно регулируется содержание углерода, кремния и марганца. Чем больше в чугуне кремния, тем меньше в структуре связанного углерода и тем он мягче. Поэтому в серые чугуны вводится 1,5...3,5 % кремния. При увеличении содержания марганца (0,5...1 %) количество связанного углерода увеличивается, но в тоже время он связывает серу в соединение  $MnS$  тем самым уменьшая отбеливающее действие серы.

Фосфор образует в чугунах фосфидную эвтектику  $[\text{Fe}(\text{P})+\text{Fe}_3\text{C}+\text{Fe}_3\text{P}]$ , которая плавится при температуре  $905^\circ\text{C}$ . Поэтому, чем больше в чугуне фосфора, тем больше его жидкотекучесть. Фосфидная эвтектика повышает твердость и хрупкость чугуна. В обычном сером чугуне фосфора содержится  $0,3...0,4\%$ . В случае изготовления художественных отливок для повышения жидкотекучести его количество повышается до  $1\%$ .

Сера в чугунах является вредной примесью. Она способствует увеличению углерода в связанном состоянии (явление отбела), понижает жидкотекучесть, увеличивает усадку и склонность к образованию трещин. Поэтому сера допускается в минимальном количестве (не более  $0,08...0,1\%$ ).

Значительное влияние на структуру чугуна оказывает скорость охлаждения. При одном и том же химическом составе в отливках разной толщины получается различная структура. Следовательно, для производства отливок с разными толщинами стенок необходимо использовать различный химический состав чугунов.

При выборе химического состава для получения отливок с требуемой структурой используются структурные диаграммы, получаемые опытным путем. На рис. 61 показана диаграмма, характеризующая структуры, получаемые в зависимости от суммарного содержания углерода и кремния в отливках с разной толщиной стенок. К примеру, если детали отлиты из чугуна с суммарным содержанием кремния и углерода  $4\%$  (линия а-а), то в изделиях с толщиной стенок до  $10\text{ мм}$  получается белый чугун,  $10...20\text{ мм}$  – половинчатый,  $20...60\text{ мм}$  – перлитный серый,  $60...120\text{ мм}$  – феррито-перлитный серый.

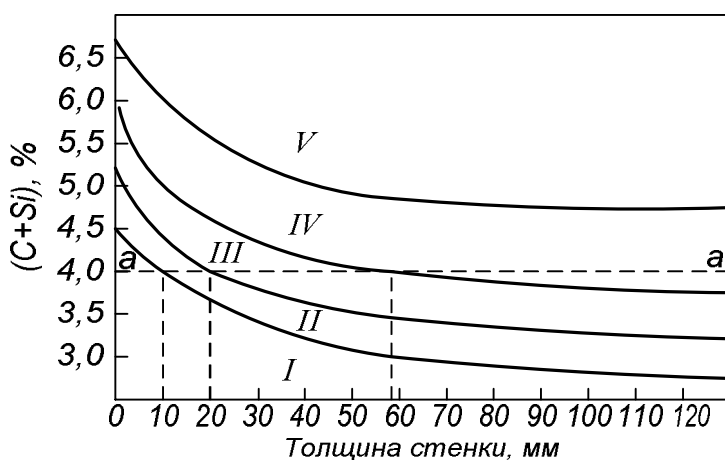


Рис. 61. Зависимость структуры чугуна от толщины стенки отливки и суммы углерода и кремния. Области чугунов: I – белый; II – половинчатый; III – серый перлитный; IV – серый феррито-перлитный; V – серый ферритный

Маркируются серые чугуны двумя буквами СЧ, за которыми следует двужначное число, показывающее предел прочности при растяжении.

Например, СЧ35 – серый чугун, имеющий предел прочности  $\sigma_B = 35 \text{ МПа} \cdot 10^{-1} (35 \text{ кгс/мм}^2)$ .

Отливки из серого чугуна широко используются в машиностроении: для станин металлорежущих станков, маховиков, корпусов, поршневых колец, головок блоков двигателей, поршней, гильз автомобильных и тракторных двигателей, картеров, зубчатых колес, распределительных валов и др.

### 3.3.2. Высокопрочные чугуны

Высокопрочные чугуны имеют шаровидную форму графита. Для его получения в жидкий расплав вводятся небольшие добавки некоторых щелочных или щелочноземельных металлов. Чаще всего для этих целей используется магний в количестве 0,03...0,07 %. По содержанию других элементов высокопрочный чугун не отличается от серого, т. е. в зависимости от химического состава и скорости охлаждения могут быть получены следующие структуры основы:

- феррит + шаровидный графит;
- феррит + перлит + шаровидный графит;
- перлит + шаровидный графит.

Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность при определенном объеме, значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый. Чугуны с такой формой графита имеют более высокие механические свойства (не уступающие свойствам литой углеродистой стали), сохраняя при этом высокие литейные свойства; обрабатываемость резанием, высокую износостойкость, способность гасить вибрации и др. Обычный состав высокопрочного чугуна следующий, %: 2,7...3,6 углерода; 1,6...2,7 кремния; 0,5...0,6 марганца; серы и фосфора менее 1 % каждого.

Маркируются высокопрочные чугуны буквами ВЧ, за которыми следуют два числа, показывающие предел прочности при растяжении и относительное удлинение. Например, ВЧ 42–12 – высокопрочный чугун с пределом прочности  $\sigma_b = 42 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$  (42 кгс/мм<sup>2</sup>) и относительным удлинением  $\delta = 12 \%$ .

Отливки из высокопрочного чугуна широко используются в различных отраслях: в авто- и дизелестроении для коленчатых валов, крышек цилиндров; для многих деталей прокатных станов; в кузнечно-прессовом оборудовании; в химической и нефтяной промышленности для корпусов насосов, вентилялей и др.

Замена стальных деталей литыми из высокопрочного чугуна является экономически выгодной. Например, заготовка литого чугунного коленчатого вала дизеля магистрального тепловоза в три раза легче заготовки из легированной стали.

### 3.3.3. Ковкие чугуны

Ковкие чугуны получаются в результате длительного нагрева при высоких температурах (отжиге) отливок из белых чугунов. При отжиге происходит распад цементита с образованием графита характерной хлопьевидной формы (см. рис. 60, в). Такой отжиг называется графитизирующим.

Наиболее часто белые чугуны, подвергаемые отжигу, имеют следующий химический состав: 2,5...3 % углерода; 0,7...1,5 % кремния; 0,3...1 % марганца; менее 0,12 % серы и не более 0,18 % фосфора. По структуре: ледебурит + цементит (вторичный) + перлит, т. е. доэвтектический чугун.

Для получения требуемой структуры ковкого чугуна (феррит + графит) в процессе отжига разлагаются цементит ледебурита, вторичный цементит и эвтектоидный цементит (входящий в состав перлита). Разложение цементита ледебурита и частично цементита вторичного происходит на первой стадии при температуре выше  $A_{c1}$  (950...1000 °С). Разложение эвтектоидного цементита осуществляется на второй стадии графитизации, которая проводится выдержкой при температуре 740...720 °С, или очень медленным охлаждением в интервале критических температур 760...720 °С (рис. 62).

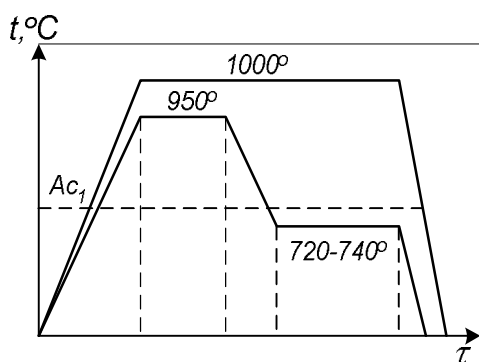


Рис. 62. Схемы отжига белого чугуна на ковкий чугун

Отжиг белого чугуна с получением ферритного ковкого называется полным графитизирующим отжигом.

Ферритный ковкий чугун – мягкий материал ( $HB < 163$ ), с высокой пластичностью ( $\delta$  до 12 %) и удовлетворительной прочностью ( $\sigma_b = 30...37 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$ ).

Иногда в условиях производства требуется ковкий чугун со структурой феррит + перлит + графит или перлит + графит. В этом случае вторая стадия графитизации проводится не до конца, или не проводится совсем, а из аустенитного состояния охлаждение ведется на воздухе, что не дает перлиту возможности разложиться полностью.

Маркируются ковкие чугуны буквами КЧ и следующими за ними двумя числами – предел прочности при растяжении и относительное удлинение, т. е. аналогично маркировке высокопрочных чугунов.

Отливки из ковких чугунов применяются для изготовления деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках – картеры редукторов, ступицы, крюки, глушители, фланцы, муфты и др.

### 3.3.4. Специальные чугуны

Аналогично сталям свойства чугунов можно улучшить введением в них легирующих элементов, которые оказывают влияние на металлическую основу, а также на размеры и форму графитных включений. Таким приемом формируются легированные чугуны, обладающие необходимыми для данной группы изделий свойствами: износостойкостью, жаростойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, антифрикционностью и т. д.

Износостойкие чугуны предназначены для работы в условиях абразивного износа. Как правило, такие чугуны содержат 3,5...5 % никеля и 0,8 % хрома. Чугуны для работы в условиях сухого трения легируются хромом до 0,6 % и никелем до 2,5 % с добавками меди, титана, вольфрама, молибдена. Из таких чугунов изготавливаются тормозные барабаны автомобилей, диски сцепления, суппорты токарных станков и др. Высокую износостойкость имеют высокохромистые чугуны, содержащие, %: 12...14 хрома; 2,8...3,8 марганца; 0,4...0,8 молибдена.

Жаростойкие чугуны легируются в основном хромом, никелем и алюминием. Так, для изделий работающих при температурах до 800 °С используются кремнистые чугуны (5...6 % Si); при температурах 850...900 °С – хромистые (28...32 % Cr), а при более высоких (до 1150 °С) температурах – алюминиевые (19...25 % Al).

Жаропрочные чугуны формируются с шаровидной формой графита и имеют в своем составе 10...12 % никеля, 5...8 % марганца, 1...2,5 % хрома.

Коррозионностойкие чугуны наиболее часто легируются никелем (0,7...1,5 %), хромом (0,2...0,6 %), молибденом (0,3...0,6 %), медью (0,2...0,5 %). Высоколегированные чугуны (кремнистые сплавы – ферросилиды) содержат до 14...18 % кремния. Они используются для изготовления деталей насосов, оборудования для концентрированных серной и азотной кислот и др.

Антифрикционные чугуны используются для изготовления деталей, работающих в узлах трения со смазкой. Они обеспечивают низкий коэффициент трения и малую скорость изнашивания сопряженной стальной детали. Чугуны имеют перлитную металлическую основу, наличие фосфидной эвтектики и большое количество крупных включений графита. Перлитная основа обеспечивает достаточную прочность изделия, фосфидная эвтектика способствует повышению износостойкости, а в местах расположения графита происходит впитывание и удержание смазки.

Большинство антифрикционных чугунов содержат в небольшом количестве добавки хрома, титана, меди и других элементов.

Маркируются антифрикционные чугуны буквами АЧ (А – антифрикционный, Ч – чугун). Следующая за ними буква показывает к какой группе относится основа (С – серый чугун с пластинчатым графитом, К – ковкий чугун с хлопьевидным графитом, В – высокопрочный чугун с шаровидным графитом). Цифра в конце марки обозначает ее порядковый номер. Например, АЧС-2 антифрикционный серый чугун с пластинчатым графитом, второй марки.

Отбеленные чугуны в сердцевине отливки имеют структуру серого, а на поверхности – белого чугуна. Примерный химический состав, %: 2,8...3,6 углерода; 0,5...0,8 кремния; 0,4...0,6 марганца.

Отбел (на глубину 10...30 мм) является следствием быстрого охлаждения при отливке в металлические или сырые земляные формы.

Отбеленные чугуны отличаются высокой твердостью поверхности, большой износостойкостью. Поэтому они используются для изготовления валков листовых прокатных станов, колес, шаров для мельниц и т. д. В этих случаях в чугунах занижается количество кремния, что увеличивает их склонность к отбеливанию.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте характеристику основных компонентов диаграммы «железо – цементит».
2. Какие фазы образуют компоненты сплавов системы «железо – цементит»? Дайте их характеристику.
3. Какой сплав системы «железо – цементит» называется эвтектическим?
4. Что называется сталью?
5. Какой сплав системы «железо – цементит» называется эвтектидным?
6. По каким признакам классифицируются стали?
7. Как маркируются углеродистые стали?
8. Какие компоненты называются легирующими? Как они влияют на свойства сталей?
9. Как маркируются легированные стали?
10. Какие сплавы называются чугунами? Приведите классификацию и свойства чугунов.

### **4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Для изготовления режущего инструмента, обладающего повышенными эксплуатационными свойствами и красностойкостью не менее 800...900 °С, широко применяются пластины из вольфрамсодержащих и безвольфрамовых спеченных твердых сплавов.

Вольфрамсодержащие твердые сплавы подразделяются на три группы:

- вольфрамо-кобальтовые (ВК) – на основе карбидов вольфрама;
- титано-вольфрамовые (ТК) – на основе карбидов вольфрама и титана;
- титано-тантало-вольфрамовые (ТТК) – на основе карбидов вольфрама, титана и тантала.

Во всех трех группах сплавов в качестве связующего используется кобальт.

Сплавы первой группы обозначаются буквами ВК, за которыми следует численное содержание кобальта в процентах. Например, ВК6 – вольфрамо-кобальтовый твердый сплав, содержащий 6 % кобальта. Остальное (94 %) – карбиды вольфрама.

Сплавы второй группы маркируются буквами Т и К. За первой буквой следует содержание карбидов титана, а за второй – кобальта. Например, Т5К10 – титано-вольфрамовый твердый сплав, имеющий 5 % карбидов титана и 10 % кобальта. Остальное (85 %) карбиды вольфрама.

Сплавы третьей группы обозначаются следующим образом: в начале обозначения проставляются буквы ТТ и совместное содержание карбидов титана и тантала. Далее следует буква К и процентное содержание кобальта. Например, ТТ8К6 – твердый сплав, состоящий из 8 % карбидов титана и тантала, 6 % кобальта и 86 % (остальное) карбидов вольфрама.

Прочность и твердость сплавов зависят от содержания в них кобальта: чем больше его количество, тем выше прочность при изгибе, но меньше твердость.

Сплавы вольфрамовой группы при одинаковом химическом составе отличаются размерами карбидных составляющих, что предопределяет различие их физико-механических свойств и областей применения:

- особомелкозернистые имеют не менее 70 % зерен карбидов с размерами менее 1 мкм. Они обозначаются буквами ОМ в конце марки сплава (ВК6ОМ, ВК10ОМ);

- мелкозернистые – зерна с размерами менее 1 мкм составляют 50 % карбидной фазы. Для обозначения таких сплавов в конце ставится буква М (ВК6М);

- среднезернистые – сплавы с зернами карбидов размерами 1...2 мкм. В обозначении таких сплавов в конце буква не ставится (ВК6);

- крупнозернистые – с карбидными зернами 2...5 мкм. В таких сплавах при обозначении в конце ставится буква В (ВК8В).

Крупнозернистые сплавы имеют невысокие износостойкость и теплоустойчивость, высокую прочность, хорошо сопротивляются ударным и циклическим нагрузкам. В этой связи их целесообразно использовать при черновом точении труднообрабатываемых материалов при наличии на поверхностях изделий трещин, раковин, неравномерных припусков.

Сплавы с мелкозернистой, особомелкозернистой структурами и повышенным содержанием кобальта (BK10M, BK10OM) применяются для изготовления мелкозернистого инструмента (сверл, метчиков). Они более износостойкие, чем BK3M, BK6M, но имеют меньшую эксплуатационную прочность. Такие твердые сплавы используются при получистовой и чистовой обработке на повышенных режимах резания.

Безвольфрамовые твердые сплавы подразделяются на две группы:

- первая – состоит из карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой. Они обозначаются буквами ТНМ или КТНМ, за которыми проставляется цифра, указывающая на содержание связки (ТНМ-20, ТНМ-25, КТНМ-30 и др.);

- вторая – карбидохромистые сплавы с никелевой связкой. Маркируются они буквами КХН с последующей цифрой, соответствующей содержанию никеля в процентах (КХН-20, КХН-30, КХН-35, КХН-40). Эти сплавы не окисляются на воздухе при нагреве до 1100°C, хорошо сопротивляются истиранию, коррозионностойкие, обладают низкой склонностью к схватыванию.

Безвольфрамовые твердые сплавы используются в машиностроении для изготовления режущего инструмента, измерительных калибров, вытяжных матриц, прессформ. Они имеют высокую окалиностойкость (в 10...15 раз выше, чем у сплавов Т5К10, Т15К6), небольшой коэффициент трения, обеспечивают низкую шероховатость обработанной поверхности. В тоже время, у безвольфрамовых твердых сплавов пониженная прочность, склонность к разупрочнению и трещинообразованию при высоких температурах. Поэтому их целесообразно использовать при чистовой и получистовой обработке низколегированных, высокохромистых и хромоникелевых сталей с  $HRC \leq 31$  и цветных металлов вместо сплавов Т30К4 и Т15К6.

Керамические режущие материалы – это материалы на основе химических соединений (оксидов или нитридов), получаемые порошковой металлургией.

По составу основы керамические материалы подразделяются на оксидные (на основе  $Al_2O_3$ ) и нитридные (на основе  $Si_3N_4$ ).

Керамика на основе  $Al_2O_3$  подразделяется на группы:

- оксидная чистая (белая), легированная оксидами  $MgO$ ,  $ZnO_2$  и др;
- оксидно-карбидная (черная), легированная карбидами тугоплавких металлов и оксидами;
- оксидно-нитридная, легированная нитридом титана и др.

Основные марки и области применения керамики отечественного производства приведены в табл. 5.

**Основные марки и области применения керамики**

| Марка  | Химическая основа                                              | Область применения                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| ЦМ-332 | $\text{Al}_2\text{O}_3$ (>99 %),<br>$\text{MgO}$ ( $\leq 1$ %) | Обработка серых чугунов, конструкционных сталей                                   |
| ВО-13  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ (>99 %)                                | Обработка серых и ковких чугунов, конструкционных и улучшенных сталей             |
| ВШ-75  | $\text{Al}_2\text{O}_3$                                        | Обработка серых и ковких чугунов конструкционных и улучшенных сталей              |
| ВОК-60 | $\text{Al}_2\text{O}_3$ (>60 %)                                | Обработка отбеленных чугунов, улучшенных и цементуемых сталей                     |
| В-3    | $\text{TiC}$ (<40 %)                                           | Обработка отбеленных чугунов, цементуемых сталей, сплавов на основе меди          |
| ОНТ-20 | $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{TiN}$                         | Обработка отбеленных чугунов, цементуемых сталей, сплавов на основе меди и никеля |

Сверхтвердые режущие материалы предназначены для обработки резанием закаленных сталей с твердостью около 60 HRC, жаропрочных сталей и сплавов, керамики, пластмасс, сплавов на основе титана и других аналогичных материалов.

Наиболее перспективными материалами этого класса являются:

- природные и синтетические алмазы с твердостью около 100 ГПа;
- нитрид бора со структурой сфалерита с твердостью 70...90 ГПа;
- тугоплавкие карбиды, бориды, нитриды, оксиды с твердостью 33...34 ГПа.

Сверхтвердые материалы для режущих инструментов производятся в виде монокристаллов; поликристаллов; сверхтвердых композитов, полученных высокотемпературным спеканием, в которых частицы сверхтвердых веществ соединены металлической или керамической связкой. Преимуществом композитов является отсутствие в них дорогих и дефицитных вольфрама и кобальта.

Режущие инструменты из сверхтвердых материалов используются для полустачевой и тонкой обработки при скоростях резания, на порядок превышающих скорости резания твердосплавными инструментами. Высокие скорости резания обеспечивают точность размеров, низкую шероховатость обработанной поверхности, высокую производительность и экономичность.

Среди сверхтвердых материалов первое место принадлежит алмазу, твердость которого в 6 раз превосходит твердость карбида вольфрама и в 8 раз твердость быстрорежущей стали. Преимущественно используются синтетические алмазы (борт, баллас, карбонадо) поликристаллического строения.

Область применения алмазных инструментов ограничивается высокой адгезией к железу, что является причиной его низкой износостойкости при обработке сталей и чугунов. Алмазный инструмент используют при обработке цветных металлов и их сплавов, а также пластмасс и керамики.

Большой универсальностью обладают инструменты из поликристаллического нитрида бора BN с кубической решеткой (кубический нитрид бора). В зависимости от способа получения нитрид бора выпускается под названиями эльбор, эльбор-Р, боразон.

Кубический нитрид бора по твердости не уступает алмазу, но превосходит его по теплостойкости и химической инертности. Он эффективно используется для обработки труднообрабатываемых сталей, в том числе цементованных и закаленных. При этом высокоскоростное точение закаленных сталей может заменить шлифование, сокращая в 2...3 раза время обработки и обеспечивая низкую шероховатость.

### **Контрольные вопросы**

1. На какие группы подразделяются инструментальные вольфрамсодержащие твердые сплавы?
2. На какие группы подразделяются инструментальные безвольфрамовые твердые сплавы?
3. Что используется в качестве связующего у вольфрамсодержащих инструментальных твердых сплавов?
4. Как маркируются инструментальные твердые сплавы?
5. На какие группы по размерам карбидных составляющих делятся инструментальные твердые сплавы вольфрамовой группы?

## **5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ**

### **5.1. Общие положения**

Термическая обработка – совокупность операций теплового воздействия на материалы (главным образом металлы и сплавы) с целью изменения их структуры и свойств в нужном направлении. Заключается в нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью (рис. 63).

Термическая обработка является одним из важнейших звеньев технологического процесса производства и ремонта деталей машин. Она применяется как промежуточная операция для улучшения технологических свойств металлов (обрабатываемости давлением, резанием и др.) и как окончательная – для придания им комплекса механических, физических и химических свойств, обеспечивающих необходимые характеристики изделий.

Тепловое воздействие при термической обработке может сочетаться с деформационным (термомеханическая обработка), химическим (химико-термическая обработка), магнитным (термомагнитная обработка). Разновидностями термообработки являются обработка холодом и электротермическая обработка.

К основным видам термической обработки относятся: отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение, патентирование.

**Отжиг** – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до определенной температуры, выдержке и последующем медленном охлаждении. Отжиг способствует снятию напряжений, повышению пластичности, улучшению обрабатываемости и т. д. Отжиг в контролируемой атмосфере проводится для изменения состава материала.

**Нормализация** (франц. normalization упорядочение, от normal правильный) стали – термическая обработка, заключающаяся в ее нагреве до температур аустенитного состояния, выдержке и последующем охлаждении на воздухе. Целью нормализации является придание стали однородной мелкозернистой структуры для повышения ее механических свойств (пластичности и ударной вязкости).

**Закалка** – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали и последующем ускоренном охлаждении с целью подавления нежелательных процессов, происходящих в ней при медленном охлаждении.

После закалки структура стали находится в неравновесном состоянии, не свойственном ей при нормальной температуре.

**Отпуск закаленной стали** – термическая обработка, осуществляемая после ее закалки. При отпуске сталь нагревается до температуры ниже нижней критической точки, выдерживается и охлаждается, как правило, на воздухе, в воде или в масле. Цель отпуска – достижение наиболее рационального сочетания в обрабатываемых сплавах прочности, пластичности и ударной вязкости.

**Старение** – изменение механических, физических и химических свойств металлов и сплавов, протекающее либо самопроизвольно, в процессе длительной выдержки при комнатной температуре (естественное старение), либо при нагреве (искусственное старение). Старение приводит к увеличению прочности и твердости при одновременном уменьшении пластичности и ударной вязкости.

**Патентирование** (от англ. patenting) – термическая обработка стальной проволоки с целью увеличения ее обжата при волочении и повышения прочности. Патентирование заключается в нагреве до

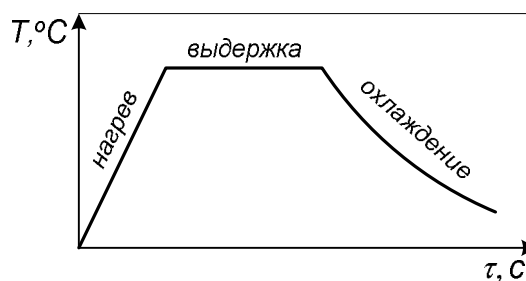
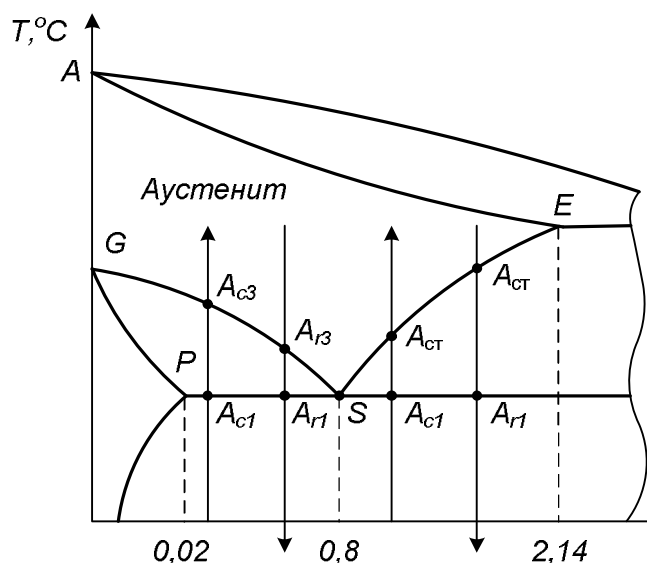


Рис. 63. Операции термической обработки

870...950 °С, быстром охлаждении (обычно в солевом или свинцовом расплаве) до температуры 450...550 °С, выдержке и последующем охлаждении на воздухе или в воде.

Для установления режимов термической обработки необходимо знать температуры, при которых в стали происходят превращения. Такие температуры называются критическими и обозначаются буквой А с индексами (например,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и др.). Если рассматривается процесс нагревания, то к индексу добавляется буква «с», если охлаждение – буква «r». Семейство критических точек, соответствующих линии SE диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C и при нагреве и при охлаждении обозначается индексом «ст» (рис. 64).



Основными температурными воздействиями, оказывающими влияние на структуру и свойства сталей, являются:

- нагрев до аустенитного состояния, вызывающий фазовую перекристаллизацию;
- охлаждение с различными степенями переохлаждения, при котором происходит превращение аустенита;
- нагрев закаленных сталей до определенных температур, изменяющих их структуру и свойства.

## 5.2. Превращения в стали при нагреве

В соответствии с диаграммой Fe–Fe<sub>3</sub>C при нагреве эвтектоидной стали перлит превращается в аустенит при температуре 727 °С (критическая точка  $A_{c1}$ ). Однако в реальных условиях такое превращение при отмеченной температуре происходить не может, так как в данном случае имеет место равенство свободных энергий Е перлита и аустенита, т. е. температура  $A_{c1}$  является равновесной (рис. 65). Следовательно, для превращения перлита в аустенит температура нагрева должна быть обязательно немного выше 727 °С, а для превращения аустенита в перлит – немного ниже. Другими словами должны иметь место перенагрев (в первом случае) и переохлаждение – во втором. От этих параметров во многом зависит величина зерна, а соответственно и свойства продуктов превращений.

Превращение перлита в аустенит при нагреве эвтектоидной стали происходит следующим образом. В исходном состоянии сталь состоит из смеси фаз феррита и цементита (рис. 66, а). При нагреве до температуры чуть выше критической точки  $A_{c1}$  по границам ферритной и цементитной фаз начинается превращение  $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$ . В связи с тем, что объемы решеток  $Fe_{\gamma}$  больше, чем у  $Fe_{\alpha}$  в них диффундирует углерод цементита и образуются зерна аустенита (рис. 66 б, в, г). Полиморфное превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$  идет с более высокой скоростью, чем растворение цементита. Поэтому образовавшийся аустенит имеет неоднородность по углероду, которая устраняется при дальнейшем повышении температуры или дополнительной выдержке.

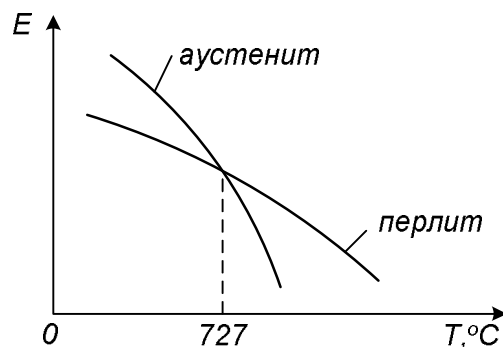


Рис. 65. Изменение свободных энергий аустенита и перлита

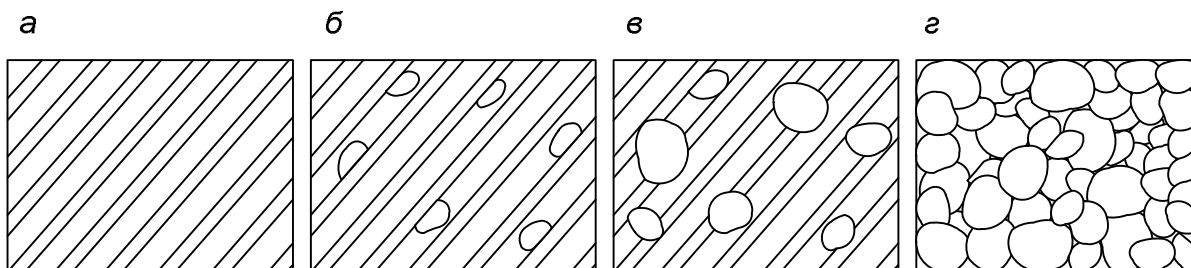


Рис. 66. Схема образования аустенита эвтектоидной стали

На скорость превращения перлита в аустенит влияют температура превращения, скорость нагрева, форма цементита (пластинчатая или зернистая), химический состав стали и др. Поскольку в каждой перлитной области образуется несколько центров кристаллизации аустенита, превращение сопровождается измельчением зерна, что широко используется в практике термической обработки стали.

В доэвтектоидных сталях при нагреве от  $A_{c1}$  до  $A_{c3}$  происходит превращение избыточного феррита в аустенит, а в заэвтектоидных (при нагреве от  $A_{c1}$  до  $A_{сг}$ ) — растворение избыточного цементита в аустените.

При повышении температуры нагрева в однофазной аустенитной области или длительной выдержке происходит рост зерна. По склонности к росту зерна стали подразделяются на наследственно мелкозернистые и наследственно крупнозернистые. К наследственно мелкозернистым относятся стали, раскисленные в процессе производства алюминием, который образует устойчивые мелкодисперсные частицы  $AlN$ . Последние располагаются по границам зерен, препятствуя их росту.

В заэвтектоидных сталях росту зерна могут препятствовать нерастворившиеся карбидные частицы, а у доэвтектоидных – участки феррита в интервале температур  $A_{c1}$ - $A_{c3}$ . Карбидообразующие элементы также замедляют рост зерна аустенита. Наибольший эффект наблюдается при наличии труднорастворимых карбидов титана, вольфрама, молибдена, циркония, ниобия и др.

Стали, раскисленные в процессе выплавки кремнием и марганцем, являются наследственно крупнозернистыми. С повышением температуры у них происходит непрерывный рост зерна.

Величина действительного зерна практически не оказывает влияния на твердость и свойства, определяемые при испытаниях на статическое растяжение. Рост зерна резко снижает ударную вязкость и повышает порог хладноломкости. Крупнозернистые стали более склонны к закалочным трещинам, деформации, короблению.

Стали, имеющие крупнозернистую структуру по причине нагрева до высоких температур, называются перегретыми и исправляются повторной аустенизацией с нагревом до более низких температур.

### **5.3. Превращения в стали при охлаждении**

#### **5.3.1. Перлитное превращение аустенита**

В пункте 3.1.4. рассматривались фазовые превращения в стали при медленном охлаждении из аустенитного состояния. Повышая скорость охлаждения, т. е. увеличивая степень переохлаждения, можно изменить механизм и кинетику превращения аустенита и соответственно структуру и свойства продуктов распада.

Процессы распада переохлажденного аустенита подразделяются на перлитное, промежуточное и мартенситное.

Кинетику распада удобнее всего рассматривать при изотермических условиях по диаграммам изотермического распада аустенита (рис. 67).

Диаграммы строятся на основе экспериментальных данных в координатах температура – время (по логарифмической шкале). Образцы, нагретые до аустенитного состояния, быстро переносятся в ванны, имеющие температуры ниже равновесной и выдерживаются до полного превращения. При этом фиксируются изменения какого-нибудь свойства (например, аустенит парамагнитен, а продукты распада аустенита ферромагнитны), тем самым, определяя время начала и конца превращений. Соединяя точки, соответствующие началу ( $a_1, a_2 \dots a_n$ ) и концу ( $b_1, b_2 \dots b_n$ ) превращений получают две С-образные кривые, разделяющие диаграмму на три области:

– область, находящаяся левее С-образных кривых, соответствует переохлажденному аустениту;

- область, расположенная между кривыми – область, в которой происходят превращения;
- область, лежащая правее С-образных кривых, соответствует продуктам распада аустенита.

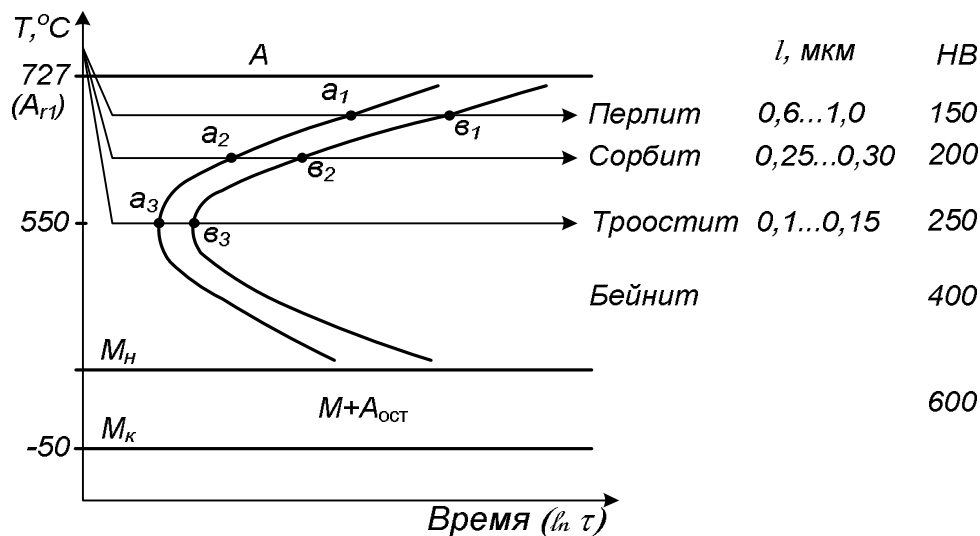


Рис. 67. Схема диаграммы изотермического распада аустенита эвтектоидной стали

Горизонтальными линиями отмечаются области, соответствующие устойчивому аустениту и образования мартенсита. Линия  $M_H$  соответствует температуре начала образования мартенсита, а  $M_K$  – конца образования.

Превращение аустенита при температурах в интервале  $A_{r1}...550$  °C называется перлитным, а в интервале  $550$  °C... $M_H$  – промежуточным.

При перлитном превращении в результате распада аустенита образуются пластинчатые структуры перлитного типа, строение которых зависит от температур превращения.

Если превращение происходит при температурах чуть ниже  $A_{r1}$  (при малых степенях переохладения), образуется сравнительно грубая смесь пластинок феррита и цементита с межпластиночным расстоянием  $l = 0,6...1$  мкм. Такая смесь называется собственно пластинчатым перлитом. При увеличении степени переохладения, когда превращение совершается при  $640...590$  °C, возникает феррито-перлитная смесь с межпластинчатым расстоянием  $0,25...0,3$  мкм. Такая структура называется сорбитом [от имени англ. ученого Г.К. Сорби (H.C. Sorby)]. При степени переохладения  $150...180$  °C межпластинчатое расстояние уменьшается до  $0,1...0,15$  мкм. Такая структура называется трооститом [от имени франц. ученого Л.Ж. Труста (L.-J. Troost)].

При увеличении дисперсности феррито-цементитной смеси повышаются прочность и твердость стали, но уменьшается вязкость. Наилучшую пластичность и вязкость имеет структура сорбита.

### 5.3.2. Мартенситное превращение

Область образования мартенсита на диаграмме изотермического распада аустенита показана условно, так как не только в эвтектоидной, но и в подавляющем большинстве сталей мартенситного превращения в изотермических условиях не происходит. Оно протекает при непрерывном охлаждении в интервале температур  $M_n \dots M_k$ . В случае любой изотермической выдержки в этом интервале температур превращение реализуется не до конца, что приводит к наличию в структуре остаточного аустенита, т. е. происходит его стабилизация.

Характерной особенностью мартенситного превращения является его бездиффузионный характер. При большой степени переохлаждения углерод не успевает диффундировать из решетки аустенита и образовать частицы цементита, как это происходит при образовании перлита, сорбита и троостита. Однако полиморфное превращение  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$  протекает, и углерод остается в решетке  $\alpha$ -железа в большом количестве. В результате образуется пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе. Такое перенасыщение вызывает изменение объемноцентрированной кубической решетки в тетрагональную, элементарной ячейкой которой является прямоугольный параллелепипед (рис. 68). Атомы углерода в такой ячейке располагаются или в междоузлиях, или в середине удлинённых ребер, или в центре основания.

Интервал температур образования мартенсита зависит от химического состава аустенита. С повышением в нем содержания углерода линии  $M_n$  и  $M_k$  понижаются. При содержании углерода более 0,6 % мартенситное превращение заканчивается при температурах ниже 0 °С. Поэтому, для того чтобы в высокоуглеродистых сталях получить большее количество мартенсита, их необходимо охлаждать до минусовых температур. Существенное влияние на линии  $M_n$  и  $M_k$  оказывают легирующие элементы.

Рис. 68. Кристаллическая ячейка мартенсита: ○ – атомы железа; ● – атом углерода

Аустенитно-мартенситное превращение сопровождается увеличением объема, что вызывает значительные напряжения по границам мартенсита и остаточного аустенита.

Мартенсит из аустенита образуется в виде пластин, обнаружить которые в плоскости исследуемого шлифа затруднительно. Поэтому обычно в зависимости от угла сечения пластин плоскостью шлифа они под микроскопом наблюдаются в виде игл различной толщины (рис. 69).

Пластинки мартенсита образуются со скоростью ~5000 м/с в пределах аустенитных зерен не переходя их границы. Поэтому размеры игл зависят от размеров зерен аустенита. Чем мельче зерна аустенита, тем мельче

иглы мартенсита и наоборот. В связи с этим различают мартенсит мелко-игльчатый и крупноигльчатый. В случаях наличия очень мелких игл (не различимых под микроскопом при обычно применяемых увеличениях –  $\times 500 \dots 600$ ), мартенсит называют бесструктурным. Такая структура характерна для правильно закаленной стали.

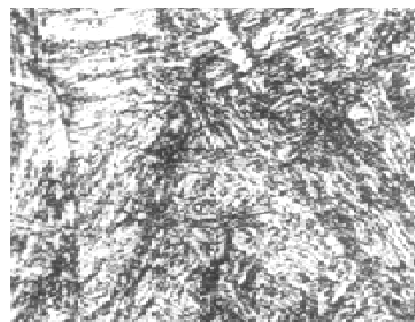


Рис. 69. Микроструктура мартенсита,  $\times 500$

Для получения мартенситной структуры аустенит углеродистых сталей необходимо охлаждать очень быстро и непрерывно, чтобы подавить возможные диффузионные процессы и образование перлитных структур. При непрерывном охлаждении время устойчивости аустенита в 1,5 раза больше, чем при изотермическом превращении. Следовательно, наложение кривых охлаждения на диаграмму изотермического распада аустенита дает лишь качественную характеристику превращений при непрерывном охлаждении. Поэтому для получения объективной картины превращений аустенита при непрерывном охлаждении необходимо пользоваться термокинетическими диаграммами (рис. 70), которые строятся в тех же координатах, что и диаграммы изотермических превращений.

При определенных скоростях охлаждения (например  $V_3$ ) начавшееся превращение аустенита в троостит приостанавливается и при дальнейшем охлаждении не распавшийся аустенит ниже линии  $M_n$  превращается в мартенсит.

Экспериментально построенные термокинетические диаграммы дают возможность определить критическую скорость закалки  $V_{кр}$ , при которой аустенит превращается только в мартенсит. Термокинетические диаграммы имеют важнейшее значение для технологии термической обработки, так как дают возможность прогнозировать виды фазовых превращений и возможные структуры сталей в зависимости от скорости ее охлаждения, что непосредственно связано с физико-механическими и эксплуатационными свойствами обрабатываемых изделий.

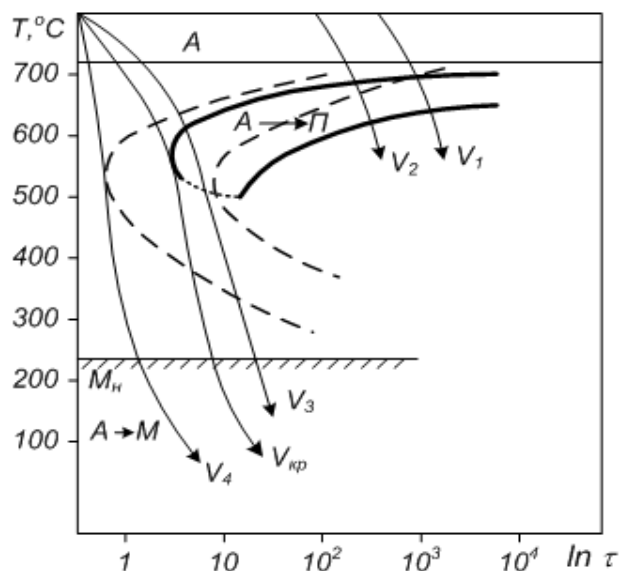


Рис. 70. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита (штриховые линии) и термокинетическая диаграмма (сплошные линии) эвтектидной стали

### 5.3.3. Промежуточное (бейнитное) превращение аустенита

В интервале температур (промежуточном между перлитным и мартенситным превращениями) от изгиба С-кривой ( $\sim 550^\circ\text{C}$ ) до критической точки  $M_n$  (см. рис. 67) аустенит распадается с образованием структур, называемых бейнитом [от имени амер. металлурга Э. Бейна (E. Bain; 1891–1974)], представляющих двухфазную смесь кристаллов пересыщенного углеродом феррита и цементита.

На начальном этапе превращения углерод перераспределяется в переохлажденном аустените с образованием обогащенных и обедненных участков. Участки обедненного углеродом аустенита претерпевают мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, а из участков, обогащенных углеродом, выделяется цементит. При этом аустенит обедняется углеродом, и происходит мартенситное бездиффузионное превращение. С течением времени при постоянной температуре изотермической выдержки образовавшийся мартенсит диффузионным путем превращается в ферритно-цементитную смесь.

Ферритная фаза является пересыщенным твердым раствором  $\text{Fe}_\alpha(\text{C})$ . Обогащенный углеродом аустенит, обладая высокой устойчивостью, часто не претерпевает превращения и сохраняется как остаточный аустенит. Следовательно, в результате промежуточного превращения структура стали в самом общем случае состоит из феррита, пересыщенного углеродом; частиц цементита и остаточного аустенита. Вся эта смесь имеет очень высокую дисперсность, которую при обычных увеличениях микроскопа различить невозможно.

В зависимости от температуры изотермической выдержки, при которой образовался бейнит, различаются два его вида: верхний и нижний. Бейнит, образовавшийся при температуре  $400\ldots 550^\circ\text{C}$  (немного ниже изгиба С-кривой) называется верхним. Он имеет перистое строение, пониженную прочность (из-за сохранения нераспавшегося аустенита), низкие пластичность и вязкость. Твердость верхнего бейнита составляет примерно 450 НВ. Если бейнит образовался при температуре чуть выше (на  $50\ldots 100^\circ\text{C}$ ) температуры мартенситного превращения, то он относится к нижнему; имеет игольчатое строение, очень похожее на строение мартенсита; обладает значительной твердостью ( $\sim 550$  НВ), имеет достаточно высокие вязкость и пластичность.

## 5.4. Технология термической обработки стали

### 5.4.1. Отжиг

Отжигу или нормализации подлежат, как правило, стальные отливки, горячекатаные и штамповые заготовки, поковки. В том случае, когда изделия после изготовления резанием подвергаются последующему тер-

мическому упрочнению, отжиг и нормализация являются промежуточными видами термической обработки. Если последующего термического упрочнения изделий не требуется, то отжиг и нормализация относятся к окончательным видам термообработки.

На рис. 71 приведены виды отжига, имеющие наиболее широкое использование в промышленности.

**Диффузионный** (гомогенизирующий) отжиг предназначен для устранения химической неоднородности (ликвации), возникающей при кристаллизации. Такому отжигу подвергаются в основном слитки или отливки из легированных сталей. Это объясняется тем, что скорость диффузии углерода, растворенного в аустените, на несколько порядков больше скорости диффузии легирующих элементов. Поэтому гомогенизация углеродистых сталей происходит практически в процессе их нагрева. Режим гомогенизирующего отжига: нагрев до температуры 1050...1200 °С, выдержка при отмеченной температуре 8...10 часов и последующее медленное охлаждение. Крупное зерно, возникающее в процессе отжига, устраняется другими видами термообработки.

**Рекристаллизационный** отжиг применяется для устранения наклепа после холодной пластической деформации. Этот вид отжига чаще используется как промежуточная операция для снятия наклепа между операциями холодного деформирования. Для углеродистых сталей с содержанием углерода 0,08...0,2 % (наиболее часто подвергаемых обработке давлением) температура нагрева при отжиге составляет 680...700 °С. Отжиг калиброванных прутков из высокоуглеродистых легированных сталей проводится при 680...740 °С в течение 0,5...1,5 часов.

**Отжиг для снятия остаточных напряжений.** Такому отжигу подвергаются отливки, сварные изделия, изделия после обработки резанием, правки и др., в которых возникают внутренние (остаточные напряжения). Остаточные напряжения часто вызывают коробление изделий, а складываясь с внешними (даже незначительными) напряжениями могут привести к разрушению. Для снятия напряжений чаще всего используется отжиг при температуре 550...650 °С. Время выдержки составляет несколько часов. Скорость нагрева и особенно охлаждения должна быть небольшой, чтобы исключить возможность образования новых остаточных напряжений.

**Полный отжиг** наиболее часто применяется для доэвтектоидных сталей. Изделия нагреваются до температуры на 30...50 °С выше критической точки  $A_{с3}$  для полной перекристаллизации исходной структуры.

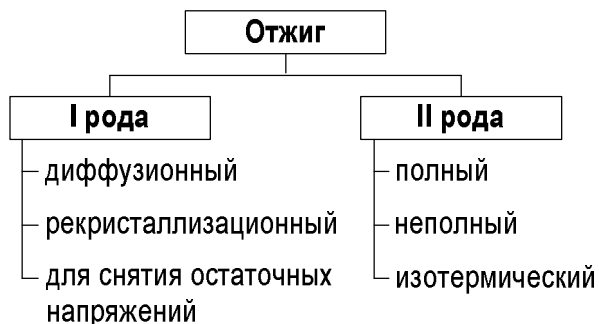


Рис. 71. Основные виды отжига

После такого нагрева аустенит становится мелкозернистым, что при последующем замедленном охлаждении дает возможность получения мелкозернистой ферритно-перлитной структуры. Если при отжиге нагрев произвести значительно выше  $A_{c3}$ , то зерна аустенита могут вырасти до крупных размеров и при дальнейшем охлаждении образуется грубая структура, состоящая из крупных зерен феррита и перлита. Такая сталь обладает пониженной пластичностью.

Таким образом, основным назначением полного отжига является измельчение зерна доэвтектоидной стали, повышение пластических свойств, улучшение обрабатываемости резанием.

**Неполный отжиг** применяется для заэвтектоидных сталей. При таком отжиге сталь нагревается до температуры на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c1}$  ( $740...770\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), при которой сохраняется вторичный цементит. После охлаждения цементит получается в виде зерен. Получению зернистого цементита способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, в результате которой цементитная сетка дробится. Сталь с зернистым цементитом лучше обрабатывается режущим инструментом и приобретает хорошую структуру после закалки.

Для доэвтектоидной стали неполный отжиг применяется редко, так как в этом случае полной перекристаллизации не происходит и часть зерен феррита остается в том же виде, что и до отжига. Такой вид термообработки проводится только в том случае, когда исправление структуры не требуется, а необходимо только понижение твердости.

Если после проведения неполного отжига цементит остается пластинчатым, проводится так называемый **циклический отжиг**, при котором сталь нагревается до температуры немного выше  $A_{c1}$ , с последующим охлаждением до температуры чуть ниже  $A_{r1}$  ( $\sim 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с повторением этого цикла несколько раз.

**Изотермический отжиг** используется для улучшения обрабатываемости легированных сталей. Порядок отжига следующий: сталь нагревается на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c3}$ , охлаждается до температуры немного ниже  $A_{r1}$ , изотермическая выдержка при этой температуре для получения равновесной перлитной структуры, с последующим охлаждением на воздухе.

При отжиге легированных сталей увеличиваются не только продолжительность нагрева и выдержки, но также и продолжительность охлаждения. И все-таки их твердость после отжига остается достаточно высокой, что ухудшает обрабатываемость резанием.

#### 5.4.2. Нормализация

Нормализация чаще всего применяется как промежуточная операция, улучшающая структуру. В некоторых случаях она используется как окончательная термическая обработка (например, при изготовлении сортового проката – швеллеров, тавров, рельсопроката и др.).

При нормализации сталь нагревается до температуры на 30...50 °С выше  $A_{с3}$  или  $A_{сг}$ , выдерживается для прогрева и охлаждается на спокойном воздухе. В результате получается тонкая структура перлита или сорбита, уменьшаются внутренние напряжения.

Нормализация является более экономичной операцией, чем отжиг. Ее широко используют вместо закалки и отпуска для улучшения свойств крупногабаритных стальных отливок, устранении дефектов предыдущих технологических операций, в подготовке структуры с целью улучшения обрабатываемости режущим инструментом, улучшения штампования в холодном состоянии, а также в подготовке структуры к последующим видам окончательной термической обработки.

#### 5.4.3. Закалка

При закалке, как правило, стремятся к тому, чтобы получить структуру мартенсита, имеющего высокую твердость. При последующем отпуске можно повысить пластичность стали за счет снижения твердости. Структуры, полученные при отпуске мартенсита, имеют лучшие механические свойства, чем структуры, полученные при изотермическом распаде аустенита. При этом их твердость остается практически одинаковой.

В зависимости от температуры нагрева закалка подразделяется на полную и неполную.

При **полной** закалке доэвтектоидной стали она нагревается до температуры аустенитного состояния (на 30...50 °С выше  $A_{с3}$ ) и после выдержки охлаждается со скоростью не менее критической. В результате мелкозернистый аустенит превращается в мелкоигольчатый мартенсит.

При **неполной** закалке доэвтектоидной стали нагрев производится до температур между  $A_{с1}$  и  $A_{с3}$ , при которой в структуре сохраняется доэвтектоидный феррит. При дальнейшем охлаждении со скоростью  $V_{кр}$  аустенит превращается в мартенсит, а феррит остается. Такая структура, при некотором снижении твердости и прочности, обеспечивает повышенную пластичность закаленной стали.

Заэвтектоидные стали обычно используются для изготовления инструмента, имеющего наиболее высокую твердость. Поэтому если такие стали подвергать полной закалке (нагрев выше  $A_{сг}$ ), то формируется дефектная структура грубоигольчатого мартенсита со значительным количеством остаточного аустенита, что резко уменьшает твердость. Поэтому для заэвтектоидных сталей применяется неполная закалка с нагревом до температуры на 30...50 °С выше  $A_{с1}$ . После резкого охлаждения образуется структура, состоящая из мартенсита и цементита. Твердость цементита выше твердости мартенсита, поэтому заэвтектоидные стали при неполной закалке имеют твердость более высокую, чем при полной.

Благодаря тому, что нагрев осуществляется ниже  $A_{ст}$ , уменьшается рост зерна, снижаются термические напряжения при закалке. Наиболее благоприятная структура закаленной заэвтектоидной стали достигается тогда, когда вторичный цементит имеет зернистую форму. Цементитная сетка по границам зерен недопустима, так как увеличивает хрупкость. Поэтому перед закалкой сталь необходимо подвергать соответствующему отжигу.

Время нагрева детали при закалке зависит от габаритов детали и теплопроводности стали. Чаще всего оно определяется экспериментально.

Способ охлаждения зависит от формы закаливаемого изделия, его размеров и химического состава стали. Чем сложнее форма и больше сечение детали, чем выше содержание углерода в стали, тем больше опасность деформации, выше возникающие напряжения и вероятнее возможность появления трещин.

Наиболее простой способ закалки – использование одного охладителя, когда нагретое изделие остается в охлаждающей жидкости до полного охлаждения (кривая 1, рис. 72). Однако недостатком этого способа является появление значительных внутренних напряжений. Поэтому для деталей из углеродистых сталей сечением более 5 мм в качестве закалочной среды рекомендуется вода, а при меньших размерах и для легированных сталей – масло.

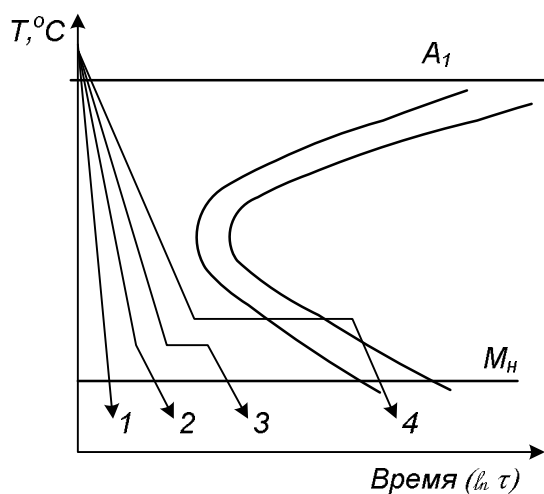


Рис. 72. Способы охлаждения при закалке сталей: 1 – непрерывное охлаждение; 2 – закалка в двух средах; 3 – ступенчатая закалка; 4 – изотермическая закалка

Для уменьшения внутренних напряжений применяется охлаждение в двух средах (кривая 2), при котором деталь сначала охлаждается в воде до 350...400 °С, а затем переносится для полного охлаждения в масло. Недостатком этого способа является трудность регулирования времени выдержки в первой охлаждающей жидкости.

Наиболее благоприятные условия для регулирования времени выдержки в первой охлаждающей жидкости достигаются при ступенчатой закалке (кривая 3). В этом случае деталь быстро охлаждается в соляной ванне с температурой, превышающей температуру начала мартенситного

превращения  $M_n$  на 30...50 °С. После выдержки для достижения одинаковой температуры по всему сечению, дальнейшее охлаждение осуществляется на воздухе. Такая технология закалки способствует резкому снижению внутренних напряжений и возможности коробления детали.

В то же время, из-за низкой скорости охлаждения в нагретой среде, в центральных областях крупногабаритных изделий скорость охлаждения может оказаться ниже критической. Поэтому максимальный размер деталей из углеродистых сталей, закаливаемых этим способом, не должен превышать 10 мм, а легированных 30 мм.

В тех случаях, когда после закалки на мартенсит и последующего отпуска не удастся достичь достаточной прочности и вязкости, осуществляется изотермическая закалка на нижний бейнит. Для этого нагретая деталь помещается в соляную ванну с температурой на 50...100 °С выше мартенситной точки  $M_n$ , выдерживается до завершения превращения аустенита в бейнит и охлаждается на воздухе (кривая 4). Такая закалка может применяться только для сталей, обладающих достаточной устойчивостью переохлажденного аустенита.

#### 5.4.4. Отпуск закаленной стали

Целью отпуска является повышение вязкости и пластичности, уменьшение твердости, снижение внутренних напряжений закаленной стали. Отпуск является окончательной операцией термической обработки и заключается в нагреве до температуры ниже критической точки  $A_{c1}$ , выдержке при этой температуре с последующим охлаждением (обычно на воздухе). Отпуск может быть низким, средним и высоким.

При **низком отпуске** (температура нагрева 150...250 °С) из мартенсита закалки выделяется углерод и образует очень мелкие пластинки метастабильного карбида железа, называемого  $\epsilon$ -карбидом, имеющего гексагональную решетку и химический состав, близкий к  $Fe_2C$ . Решетки мартенсита и пластинки  $\epsilon$ -карбида имеют общие слои атомов по границам фаз, т. е. имеет место когерентность (соответствие) решеток. Образовавшийся в результате такого превращения мартенсит называется *мартенситом отпуска* и представляет собой смесь пересыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе и карбида, еще не отделившегося от решетки мартенсита.

Низкому отпуску подвергается в основном режущий и мерительный инструменты, а также машиностроительные изделия, которые должны иметь высокие твердость и износостойкость, но не подвергаемые существенным ударным и знакопеременным нагрузкам.

**Средний отпуск** проводится при температуре 350...450 °С. Основное назначение – некоторое снижение твердости при значительном увеличении предела упругости. Такие свойства достигаются за счет полного распада мартенсита на феррито-цементитную смесь и одновременным превращением  $\epsilon$ -карбидов в цементит  $Fe_3C$ . В результате образуется структура *троостит отпуска* – высокодисперсная феррито-цементитная смесь, в которой цементит имеет зернистое строение.

При **высоком отпуске** закаленная сталь нагревается до температуры 500...650 °С. При этой температуре никаких новых превращений не происходит, но интенсивно протекают процессы сфероидации (скругления) и коагуляции (укрупнения) частиц цементита. В результате феррито-цементитная смесь становится более укрупненной, менее дисперсной, с зернистой формой частиц цементита. Структура, образованная в результате высокого отпуска, называется *сорбитом отпуска* и применяется для конструкционных сталей, детали из которых подвергаются воздействиям высоких напряжений и ударных нагрузок. Закалка с последующим высоким отпуском является основным видом термической обработки конструкционных сталей и называется улучшением.

При дальнейшем повышении температуры нагрева (650...700 °С) образуется *зернистый перлит*, который является наиболее равновесной структурой. При одинаковых значениях временного сопротивления сталь, имеющая зернистую структуру, обладает большей пластичностью по сравнению со сталью, имеющей пластинчатую структуру.

### 5.5. Особенности закалки легированных сталей

В разделе 3.2.3. показано влияние легирующих элементов на структуру и свойства сталей. Не менее существенное влияние они оказывают и на фазовые превращения при нагреве и охлаждении.

Почти все легирующие элементы изменяют температуры полиморфных превращений железа и оказывают влияние на растворимость углерода в аустените. Некоторые легирующие элементы способны взаимодействовать с углеродом, азотом, а также между собой, образуя интерметаллиды.

При введении в сталь небольшого количества карбидообразующих элементов (десятые доли процента или 1...2 % для слабых карбидообразователей) образования карбидов этих элементов, как правило, не происходит. В этом случае атомы легирующих элементов частично замещают атомы железа в решетке цементита. Образуется легированный цементит, который по свойствам не отличается от обычного цементита. Марганец не образует карбидов при любом его содержании.

Сильные карбидообразователи (Mo, W, V, Nb, Ti) создают с углеродом фазы внедрения. При этом чаще всего карбиды имеют формулу MeC или Me<sub>2</sub>C. Такие фазы отличаются очень высокой тугоплавкостью, практически не растворяются в аустените. К примеру, для растворения таких карбидов, как TiC, NbC, WC сталь необходимо нагревать до температуры ~1300 °С.

Промежуточное положение по карбидообразующей способности занимает хром. В низко- и среднелегированных сталях он образует карбид Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, а в высоколегированных – Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Карбиды хрома могут раство-

рять железо и легирующие элементы стали в большом количестве. Поэтому часто в общем виде формулы этих карбидов записываются как  $\text{Me}_7\text{C}_3$  и  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ .

При введении хрома с молибденом и вольфрамом фазы внедрения ( $\text{MoC}$ ,  $\text{WC}$ ) не образуются, а вместо них возникают сложные карбиды, содержащие хром, молибден, вольфрам и железо с формулой  $\text{Me}_6\text{C}$ , которые растворимы в аустените. Однако, для их растворения требуются еще более высокие температуры и более длительные выдержки, чем для растворения карбидов хрома.

Итак, в зависимости от наличия в легированных сталях тех или иных легирующих элементов и их количества, могут быть следующие типы карбидов: хорошо растворимые в аустените –  $\text{Me}_3\text{C}$ ; труднорастворимые –  $\text{Me}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Me}_6\text{C}$  и почти нерастворимые –  $\text{MeC}$ .

В связи с отмеченным, закалка и отпуск легированных сталей имеют ряд особенностей. Температура нагрева под закалку обычно выше, чем у углеродистых сталей. Диффузионные процессы протекают медленнее, что требует более длительной выдержки как нагретой до аустенитного состояния стали, так и при температуре отпуска, которая также выше температуры отпуска углеродистой стали.

Из-за пониженной теплопроводности легированных сталей они нагреваются и охлаждаются более медленно. Закалка обычно производится в масле.

Все легирующие элементы затрудняют процесс распада мартенсита при нагреве. Поэтому структура отпущенного легированного мартенсита может сохраняться при температурах 400...600 °C. При одинаковой температуре отпуска прочность и пластичность легированных сталей выше, чем углеродистых.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется термической обработкой сталей?
2. Какие существуют основные виды термической обработки сталей?
3. Какие превращения происходят в стали при ее нагреве?
4. Что представляет собой перлитное превращение аустенита при его охлаждении?
5. Что называется диаграммой изотермического распада аустенита? Какое ее практическое значение?
6. Что называется мартенситом? Каковы условия его образования и свойства?
7. Что такое отжиг стали, его виды и технология?
8. Приведите назначение, виды и технологию закалки. Назовите способы закалки. Какова структура закаленной эвтектоидной стали.

9. Приведите назначение и виды отпуска закаленной углеродистой стали, технологию отпуска.

10. Приведите назначение и технологию нормализации.

11. В чем влияние легирующих элементов на фазовые превращения сталей? Каковы особенности закалки легированных сталей?

## 6. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

### 6.1. Общие сведения

Химико-термическая обработка (ХТО) – это технологический процесс, заключающийся в насыщении поверхностного слоя стали каким-либо элементом при высокой температуре с последующим термическим воздействием, в результате чего происходит изменение химического состава, микроструктуры и свойств. Она применяется для повышения твердости, износостойкости, сопротивления усталости и контактной выносливости, а также для защиты от коррозии.

Основными стадиями ХТО являются диссоциация, абсорбция и диффузия.

**Диссоциация** – выделение активных диффундирующих элементов в результате протекания химических реакций в исходной среде. Например,  $\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ ;  $2\text{NH}_3 \leftrightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}$ , и т. д.

**Абсорбция** – захват поверхностью металла свободных атомов насыщающего элемента. Атомы поверхностного слоя насыщаемого металла, имеющие направленные наружу свободные связи, присоединяют атомы диффундирующего элемента, в результате чего возникает градиент концентрации, являющийся движущей силой последующей стадии процесса.

**Диффузия** – проникновение насыщающего элемента вглубь насыщаемого металла, сопровождаемого образованием твердых растворов или фазовой перекристаллизацией.

Поверхностный слой изделия, насыщенный диффундирующим элементом, называется диффузионным слоем. Металл, расположенный под диффузионным слоем, называется сердцевиной.

Диффузионное насыщение стали углеродом, азотом и совместно этими элементами являются наиболее распространенными в промышленности процессами ХТО в связи с тем, что эти элементы легко усваиваются поверхностью стали, образуют с железом твердые растворы внедрения, сравнительно быстро диффундируют на значительную глубину.

### 6.2. Цементация

Целью цементации является достижение на поверхности стальной детали высокой твердости и износостойкости с одновременным сохранением ее вязкой сердцевины, что осуществляется насыщением поверхностного слоя изделия углеродом. Поэтому для цементации ис-

пользуются стали с низким (0,08...0,25 %) содержанием последнего. После цементации сталь подвергается закалке и низкому отпуску. В результате концентрация углерода на поверхности стальной детали составляет 0,8...1 %, а ее структура представляет низкоотпущенный мартенсит с мелкими сфероидальными карбидами.

Цементации обычно подвергаются зубчатые колеса, валы, пальцы, распределительные валики, кулачки, червяки и т. д. Она может проходить в твердой и газовой средах, которые называются карбюризаторами.

Наиболее распространенный твердый карбюризатор состоит из древесного угля с добавкой 20...25 %  $\text{BaCO}_3$  для интенсификации процесса и 3...5 %  $\text{CaCO}_3$  для исключения спекания частиц карбюризатора. Изделия, подвергаемые цементации, помещаются в стальной ящик и со всех сторон обкладываются карбюризатором. После этого, они нагреваются в печи до температуры 910...940 °С. Во время нагрева карбюризатор взаимодействует с кислородом остаточного воздуха по реакциям:  $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ ,  $\text{BaCO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{BaO} + 2\text{CO}$ ,  $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ .

Образующиеся атомы углерода активно диффундируют в поверхностный слой изделия. В течение 8...10 часов такой слой достигает толщины около 1 миллиметра.

При массовом производстве чаще используется газовая цементация, при которой детали нагреваются в газовых смесях, содержащих  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и др. В этом случае насыщение идет быстрее. Слой толщиной 1 мм образуется за 6...7 ч.

Полученный в результате цементации слой содержит углерода более 0,8 % и имеет структуру заэвтектоидной стали. Глубже располагается слой эвтектоидного состава. Из-за длительной выдержки при высокой температуре структура стали получается крупнозернистой, что необходимо учитывать при обязательной после цементации термической обработке.

Режимы термической обработки назначаются в зависимости от условий работы детали и стали, из которой она изготовлена.

Не очень ответственные детали подвергаются закалке непосредственно с температуры нагрева для цементации с последующим низким отпуском (рис. 73, а). Выросшее при цементации крупное зерно аустенита приводит к грубокристаллическому мартенситу отпуска в поверхностном слое и крупнозернистую феррито-перлитную смесь в сердцевине изделия. Такие недостатки определенным образом устраняются при применении газовой цементации, сокращающей время пребывания стали при высоких температурах.

Для тяжело нагруженных изделий, испытывающих динамические нагрузки, необходима не только высокая поверхностная твердость, но и высокая прочность, а также высокая ударная вязкость. Для получения таких свойств необходимо мелкое зерно как на поверхности детали, так и в сердцевине. В таком случае цементованные детали подвергаются двойной закалке с низким отпуском (рис. 73, б).

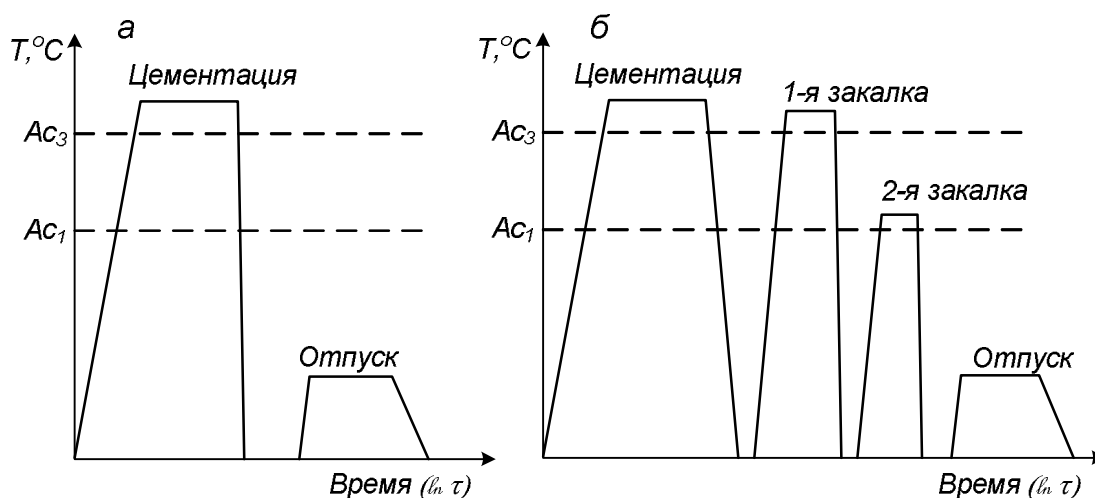


Рис. 73. Режимы термической обработки стали после закалки

При первой закалке с температуры на 30...50 °С выше  $A_{c3}$  происходит перекристаллизация с образованием во всем объеме мелкого аустенитного зерна и последующей мелкозернистой структуры продуктов его распада. В связи с тем, что при нагреве до температуры выше  $A_{c3}$  весь цементованный слой также переходит в аустенитное состояние, то для предотвращения выделения цементитной сетки при последующем охлаждении, проводится вторая закалка.

При нагреве под вторую закалку, мартенсит, образовавшийся после первой закалки, отпускается с образованием зернистого цементита, увеличивающего твердость поверхностного заэвтектоидного слоя.

Цементация деталей из легированной стали дает возможность получать в поверхностном слое структуру мартенсита отпуска, а в сердцевине сорбит, троостит или мартенсит. Благодаря низкому содержанию углерода сердцевина будет иметь высокую ударную вязкость.

### 6.3. Азотирование

**Азотированием** называется насыщение поверхностного слоя детали азотом для получения в нем высокой твердости, износостойкости, усталостной прочности и сопротивления коррозии.

При азотировании деталь помещается в герметически закрытые стальные емкости, в которые поступает аммиак. Емкости помещаются в нагревательную печь и выдерживаются при 500...600 °С в течение длительного (до 60 ч) времени. При такой температуре аммиак разлагается на азот и водород:  $\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H} + \text{N}$ . В результате образуются нитриды железа. Однако последние не обеспечивают высокой твердости. Поэтому для ее получения производится совместное легирование стали такими элементами, как хром, молибден, алюминий.

Благодаря высокой твердости нитридов легирующих элементов, азотированию чаще всего подвергаются легированные среднеуглеродистые стали, например 38Х2МЮА, 35 ХМА, 38ХМА, 38Х2Ю, 3Х2В8, 5ХНМ и др. Высокая твердость после азотирования достигается сразу, что не требует дополнительной термической обработки.

Однако, по сравнению с цементацией, для азотирования требуется более длительное время и необходимость использования дорогостоящих легированных сталей. Поэтому оно применяется в случае изготовления более ответственных изделий, для которых требуются особо высокие показатели качества поверхностного слоя – мерительного инструмента, цилиндров, зубчатых колес, гильз, втулок, коленчатых валов и др.

#### **6.4. Насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом**

При совместном насыщении стали азот способствует диффузии углерода, что дает возможность снизить температуру процесса до 850 °С и получить практически такое же насыщение, как при цементации. При этом уменьшается рост зерна аустенита и последующую закалку можно проводить сразу же после некоторого подстуживания. Такой технологический процесс называется нитроцементацией. В связи с тем, что исходной насыщающей средой является смесь цементирующего газа с 4...5 %  $\text{NH}_3$  в поверхностном слое детали образуются карбонитриды. Полученная структура хорошо сопротивляется износу и коррозии и используется для упрочнения поверхностей нешлифуемых изделий.

Одновременное насыщение стали углеродом и азотом можно также осуществлять в расплавленных солях, содержащих цианистый натрий. Такая технология называется цианированием. В составе расплава 20...25 %  $\text{NaCN}$ , 25...50 %  $\text{NaCl}$  и 25...50 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . За 1 час выдержки при температуре 820...850 °С диффузионный слой достигает величины 0,3...0,4 мм, который после закалки с температуры насыщения и последующего отпуска при температуре 180...200 °С приобретает твердость 58...62 HRC и высокую износостойкость.

Недостатком цианирования является более высокая стоимость процесса, связанная с высокими требованиями к правилам техники безопасности по причине высокой токсичности цианистых солей.

#### **6.5. Диффузионная металлизация**

Для многих изделий машиностроения требуются такие свойства, как высокая жаростойкость, повышенная износостойкость, коррозионная стойкость, значительная твердость и др. Традиционными способами получения таких покрытий являются алитирование (насыщение алюминием), хромирование, силицирование (насыщение кремнием), борирова-

ние путем применения порошковых смесей, содержащих диффундирующий элемент, активизатор ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{J}$  и др.) и нейтральный порошок (шамот, глинозем и др.) для предотвращения спекания смеси.

Насыщаемые изделия, находящиеся в порошке, упаковываются в металлические контейнеры, нагреваются в печи до температуры 1000...1200 °С и выдерживаются в течение нескольких часов для получения диффузионных слоев заданной толщины и структуры.

При алитировании детали приобретают повышенную коррозионную стойкость благодаря образованию плотной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,2...0,5 мм, предохраняющей металл от окисления даже при высоких температурах.

Хромированием достигается высокая стойкость против газовой коррозии, коррозии в обычной и морской воде, в кислотах. Толщина слоя достигает 0,2 мм.

Силицирование придает поверхностям изделий высокую кислотостойкость в соляной, серной и азотной кислотах, поэтому используется чаще всего в химической и нефтяной промышленности. Толщина слоя колеблется в пределах 0,3...1 мм.

Борированием достигается исключительно высокие твердость, износостойкость и устойчивость против коррозии в различных агрессивных средах. Поверхностный слой борида железа достигает величины 0,1...0,2 мм.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется химико-термической обработкой сплавов? В чем ее назначение? Назовите основные стадии технологического процесса.
2. Приведите назначение и технологию цементации. Какова структура цементованного слоя?
3. Каковы виды термообработки цементованных сталей?
4. Приведите назначение и технологию азотирования и нитроцементации. Какова структура азотированного слоя?
5. Что такое диффузионная металлизация? Назовите ее назначение и виды. Каковы свойства стали после диффузионной металлизации?

## **7. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**

### **7.1. Общие сведения**

Более 95 % изготавливаемой в мире металлопродукции производится из железа и сплавов на его основе, которые относятся к группе черных. Все остальные металлы и сплавы называются цветными.

По физическим и химическим свойствам, характеру залегания в земной коре последние можно подразделить на следующие группы:

– легкие – алюминий, магний, титан, бериллий, литий, натрий, калий, кальций, рубидий, цезий, стронций, барий;

– тяжелые – медь, никель, кобальт, свинец, олово, цинк, кадмий, сурьма, висмут, ртуть;

– благородные – золото, серебро, платина и платиноиды (рутение, родий, палладий, осмий, иридий);

– особыми свойствами – тугоплавкие (вольфрам, молибден, ниобий, тантал, рений, ванадий, хром, цирконий, гафний); рассеянные (галлий, индий, таллий); редкоземельные (скандий, иттрий, лантан и все лантаноиды); радиоактивные (технеций, франций, радий, полоний, актиний, торий, протактиний, уран и все трансурановые элементы).

Металлы, которые производятся и используются в ограниченном количестве, называются редкими. К ним можно отнести все рассеянные и редкоземельные, значительную часть тугоплавких, радиоактивные и некоторые легкие (бериллий, литий, рубидий, цезий).

Приведенную классификацию следует считать условной, так как многие металлы могут быть отнесены к разным группам одновременно. Например, тугоплавкий металл рений – типичный рассеянный элемент, а легкий титан является тугоплавким и т. д.

**Легкие металлы** очень широко используются в качестве конструкционных материалов. Из этой группы наибольшее применение находят алюминий, магний, титан.

**Алюминий** – химический элемент Al (от лат. *alumen* квасцы) – атомный номер 13, атомная масса 26,98154. Серебристо-белый металл, легкий, ковкий, устойчивый против коррозии. Плотность  $2699 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления  $660^\circ\text{C}$ . Встречается в виде различных минералов, из которых наиболее распространены боксиды и алюмосиликаты. Получают алюминий электролизом раствора оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в расплавленном криолите  $\text{Na}_2\text{AlF}_6$ .

Впервые предположение о существовании алюминия было высказано в 1808 году английским ученым Дэви. Именно он дал название новому металлу. Однако лишь в 1825 году датскому ученому Эрстеду и в 1827 году немецкому химику Веберу удалось выделить алюминий в чистом виде. До конца XIX столетия алюминий был дорогим металлом, лишь немного дешевле золота. Промышленный выпуск алюминия начался в 1890 году.

По распространенности в природе среди металлов алюминий занимает первое место, по практическому использованию – второе (после железа).

Широкое применение алюминия и его сплавов обусловлено его характерными свойствами: легкостью (масса алюминиевой детали составляет лишь треть массы стальной таких же размеров); устойчивостью к коррозии на воздухе, а также в среде многих газов и жидкостей; высокой

отражательной способностью; относительно высокой упругостью; хорошей обрабатываемостью; высокой тепло- и электропроводностью. Электропроводность алюминия чистотой 99,997 % составляет 65,5 % от электропроводности меди.

Алюминий является химически активным металлом. В результате этого он легко покрывается с поверхности окисной пленкой, которая защищает его от дальнейшего взаимодействия с окружающей средой. При комнатной температуре на воздухе толщина этой пленки составляет  $(5...7) \cdot 10^{-9}$  м. При нагреве до температуры плавления толщина пленки возрастает в 15...20 раз. Окисная пленка очень плотная, обладает хорошим сцеплением с металлом и малопроницаема для всех газов. Благодаря такой пленке алюминий устойчив на воздухе даже в условиях чрезвычайно влажного климата, обладает высокой коррозионной стойкостью в морской воде. Скорость коррозии резко возрастает с присутствием в воде примесей щелочей, солей, ртути, меди, ионов хлора.

С каждым годом постоянно растет применение т и т а н а . Для многих целей он более перспективен, чем любые другие металлы. Прочность технического титана близка к прочности обычных конструкционных сталей, а по своей коррозионной стойкости титан превосходит даже высоколегированные коррозионно-стойкие стали. Если такие стали в растворе, состоящем из двух частей соляной кислоты и одной части азотной кислоты, за год растворяются на глубину 10 мм, то титан за то же время – только на 0,005 мм. Благодаря этому титан является превосходным материалом для оболочек и облицовок резервуаров, в которых хранятся кислоты.

Почти 90 % получаемого в мире титана потребляют авиация, космическая и ракетная техника, военная промышленность.

«Младшим братом» алюминия можно назвать легкий металл – магний. По распространенности в земной коре он занимает третье место после алюминия и железа. Однако не все соединения магния могут быть использованы как исходное сырье для промышленного получения металла. Технология его производства в настоящее время довольно трудна и высокочувствительна.

Магний относится ко II группе периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Его атомный номер 2; атомная масса 24,32; плотность  $1,74 \text{ г/см}^3$ ; температура плавления  $651^\circ\text{C}$ .

Чистый магний в качестве конструкционного материала практически не используется из-за низких прочностных свойств. Поэтому он применяется как составная часть сплавов. Две важнейшие группы из них составляют сплавы магний–алюминий–цинк и магний–церий с малыми добавками тория или циркония.

Существенное достоинство магниевых сплавов состоит в том, что они хорошо обрабатываются резанием. При одинаковых скоростях резания магний требует примерно вдвое меньшего усилия, чем латунь и в шесть раз меньшего, чем сталь.

Преимущества магния дают основание полагать, что в будущем он найдет широкое применение во многих областях техники, причем не только как легирующая добавка, средство для восстановления и очистки металлов или для целей катодной защиты других металлов от коррозии, но и как основной компонент конструкционных сплавов.

**Тяжелые цветные металлы** имеют в технических устройствах не меньшее распространение, чем легкие. Наиболее часто используются медь, свинец, цинк, олово и никель. Этих металлов с каждым годом в мире производится все больше. Так, годовое производство меди с начала XX века выросло более чем в десять раз. Но потребности растут еще быстрее, и некоторых металлов уже явно не хватает. Приходится строго следить, чтобы тяжелые цветные металлы применялись только там, где их особые свойства, безусловно, необходимы и где их нельзя заменить другими материалами.

**Медь** – химический элемент – Cu (от лат. Cuprum) – атомный номер 29, атомная масса 63,546. Это из немногих действительно цветных металлов: в зависимости от степени чистоты и состояния поверхности ее цвет изменяется от светло-розового до красного. Плотность меди составляет  $8960 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления  $1083^\circ\text{C}$ . За год в мире производится 4...6 млн т меди. Согласно прогнозам, мировые запасы меди в тех рудах, которые технически и экономически пригодны для добычи и переработки существующими ныне методами, составляют около 100 млн т. Следовательно, уже через несколько десятков лет эти запасы могут иссякнуть. Открытие новых месторождений и совершенствование методов добычи может лишь на какое-то более или менее продолжительное время отодвинуть этот момент. Поэтому единственный выход состоит в том, чтобы возможно шире использовать металлолом и другие отходы промышленности, содержащие медь. Уже после второй мировой войны в крупнейших промышленно развитых странах из отходов получали больше меди, чем выплавляли ее из руд, а сегодня относительная доля вторичной меди значительно возросла.

Для современной техники наиболее важными являются такие свойства меди, как высокая электро- и теплопроводность, а также прочность, вязкость, хорошая коррозионная стойкость. Около половины всей производимой меди (с большей или меньшей степенью чистоты) идет на изготовление проводов, кабелей, шин и других токопроводящих изделий электротехнической промышленности. Проводимость меди составляет  $60,1 \text{ МОм/мм}^2$ . Это означает, что медный провод сечением  $1 \text{ мм}^2$  и длиной 60,1 м обладает электрическим сопротивлением 1 Ом. Провода та-

кого же сечения из алюминия и железа имеют аналогичное сопротивление при длине 63,38 и 10 м соответственно. По электропроводности медь уступает лишь серебру (на 5 %), оставляя позади все другие металлы. Однако необходимо помнить, что любые примеси в меди, даже серебро, ухудшают ее электропроводность, причём тем существеннее, чем дальше (по горизонтали) примесный элемент отстоит от меди в периодической таблице Менделеева.

Другим важнейшим цветным тяжелым металлом, широко используемым в промышленности, является свинец. Он известен с древнейших времен, но существенное значение в технике приобрел только с развитием производства серной кислоты. Это металл голубовато-белого, а чаще тускло-серого цвета. Он очень мягок, обладает низкой прочностью, плавится при температуре 327,4 °С.

Ежегодно в мире производится 3...4 млн т свинца. Около половины этого количества идет на изготовление аккумуляторов и кабелей, а треть – на химическое аппаратостроение. Остальной свинец используется для легирования сплавов и производства химических соединений. Одно из главных достоинств свинца – его высокая коррозионная стойкость.

Крупным потребителем свинца является кабельная промышленность. Бесшовная свинцовая оболочка хорошо защищает кабель, проложенный под землей или по морскому дну. Вместе с тем, он не мешает намотке или размотке кабеля, так как очень пластичен. Свинец используется для изготовления аппаратов, резервуаров и трубопроводов для серной кислоты. Однако, из-за его низкой прочности, детали химической аппаратуры зачастую изготавливаются из других материалов, на которые наносятся свинцовые покрытия.

Для легирования свинца используется, главным образом, сурьма и олово. Сурьма вводится в сплав в количестве 0,5...13 %, что значительно повышает твердость свинца. Такие сплавы называются гартами (от нем. Hartblei, букв. «твердый свинец»). Из свинцовых сплавов с добавками сурьмы и олова изготавливаются подшипники скольжения.

О л о в о – древний металл, который по сей день сохраняет большое значение. В бронзовом веке олово вместе с медью служило важнейшим материалом. Оловянной посудой пользовались повсеместно и в средневековье, и даже в прошлом столетии. С развитием консервной промышленности олово нашло новое важное назначение – многие миллиарды консервных банок изготавливаются из белой жести, т. е. покрытой оловом тонколистовой стали. Для этой цели используется почти половина мирового производства олова. При нормальных температурах олово способно чрезвычайно долго сопротивляться коррозии на воздухе и в воде. Олово нетоксично и не влияет на вкус пищевых продуктов. Температура плавления олова самая низкая из всех тяжелых цветных металлов – 231,9 °С.

Значительная доля олова используется для пайки, изготовления бронз, подшипниковых и других сплавов. Сульфиды олова входят в состав красок для золочения, а диоксиды – на приготовление жаростойких эмалей и глазурей. Олово высокой чистоты применяется в электронике.

В группе тяжелых цветных металлов находится цинк – металл синевато-белого цвета с температурой плавления  $419,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и плотностью  $7130\text{ кг/м}^3$ .

Цинк устойчив к коррозии на воздухе и в воде, поэтому значительная его часть используется для покрытий стальных изделий (цинкование). Широко распространен цинк и в качестве легирующего элемента для изготовления многих сплавов. Некоторые цинковые сплавы используются для литья под давлением. Они обладают хорошими литейными свойствами и дают возможность получать тонкостенные прецизионные отливки сложной конфигурации.

Сплав цинка с 22 % алюминия обладает чрезвычайно интересным свойством – сверхпластичностью. Этот сплав способен удлиняться на 1000 %, т. е. в 20...50 раз больше, чем обычные металлические материалы. Листы из такого сплава приобретают сверхпластичное состояние при температуре  $260\text{...}270\text{ }^{\circ}\text{C}$  и легко поддаются формообразованию. В то же время при комнатной температуре прочность сплава достигает  $300\text{ Н/мм}^2$ .

К традиционным давно известным тяжелым цветным металлам относится никель – серебристо-белого цвета, тугоплавкий ( $t_{\text{пл}} = 1453\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с плотностью  $8910\text{ кг/м}^3$ , не изменяющийся на воздухе.

В средние века саксонские горняки пытались получать медь из красно-бурого гравия, считая его медной рудой. Но все их попытки не увенчались успехом. Тогда они решили, что их дурачит злой горный дух по имени Никель (нем. Nickel) и присвоили этому минералу пренебрежительное название «купферникель» (нем. Kupfernickel злой дух меди). В память об этой древней истории шведский химик и минералог А. Кромшtedт назвал никелем металл, открытый им в 1751 г.

Никель устойчив к коррозии в воде (в том числе морской), в щелочах, растворах солей и многих органических кислотах. Половина получаемого в мире никеля идет на легирование сталей – он повышает вязкость и прочность низколегированных сталей и коррозионную стойкость и жаропрочность высоколегированных.

В последнее время значение никелевых сплавов особенно возросло. Сплавы железа с никелем применялись еще в те времена, когда чистый никель, не был известен человеку, использующему метеоритное железо, в составе которого содержится до 10 % никеля. Из медно-никелевых сплавов чеканили монеты во II тысячелетии до н.э. Древнекитайский металл «пафong» был сплавом меди с цинком и никелем. В начале XIX века примерно такой же сплав начали производить в Германии под названием

«нейзильбер». Но лишь гораздо позже никелевые сплавы нашли широкое применение в технике, особенно сплавы никеля с медью, которые легко поддаются горячей и холодной обработке давлением, обладают достаточной прочностью, хорошо противостоят коррозии и износу, имеют высокое электросопротивление. Медь и никель образуют непрерывный ряд твердых растворов.

Добавка хрома придает никелю стойкость в агрессивной окислительной среде. Нихромы (сплавы никеля и хрома) хорошо зарекомендовали себя как материалы для нагревательных элементов. Необычайно жаропрочные сплавы на основе никеля (наряду с хромом, молибденом и железом) содержат вольфрам, титан и алюминий. Высокая их жаропрочность в интервале температур 800...1000 °С дает возможность использовать такие сплавы для изготовления лопаток турбин реактивных двигателей.

Никель – один из самых распространенных материалов для антикоррозионных и декоративных покрытий. Около 25 % его мирового производства идет на гальванические покрытия изделий из других металлов.

**Благородные металлы** находят самое различное применение в современных технических устройствах. Однако, по сравнению с другими металлами их доля очень невелика в связи с высокой стоимостью. Свое название «благородные» они получили по причине того, что гораздо реже, чем остальные металлы вступают в химические реакции и образуют соединения с другими элементами. По этой причине они в природе встречаются, как правило, в самородном виде. Однако это не говорит о том, что благородные металлы вообще не способны к химическим реакциям. Так, серебро корродирует в средах, содержащих серу. Золото сильно реагирует с хлором и бромом. В смеси концентрированных соляной и азотной кислот (царская водка) растворяются и золото и платина. Но вместе с тем они остаются очень стойкими в жестких эксплуатационных условиях. Наряду с очень большой коррозионной стойкостью благородные металлы обладают и другими достоинствами, делающими их незаменимыми для специальных технических целей. Например, серебро обладает непревзойденной электропроводностью; платиновые сплавы имеют высокие механические свойства, сохраняющиеся при высоких температурах и др.

Самым известным из благородных металлов является з о л о т о . Два столетия назад оно в технике не использовалось вообще. Да и в настоящее время 50 % добываемого в мире золота расходуется для чеканки монет, 20 % – на ювелирные изделия, 20 % потребляет стоматология и только 10 % приходится на долю технических устройств.

Температура плавления золота 1064 °С, плотность – 19320 кг/м<sup>3</sup>. Оно лучше всех других металлов поддается пластическому деформированию. Из одного грамма золота можно вытянуть проволоку длиной 3 км, а золотую фольгу удастся сделать такой тонкой, что она становится почти прозрачной и имеет голубой или зеленоватый цвет.

Важнейшими легирующими элементами золота являются медь и серебро. В качестве добавок используются никель и платиновые металлы.

Чистое золото используется в электротехнике для покрытий контактов, а сплавы его с никелем или серебром – как материалы для самих контактов. На космических кораблях оно используется для уплотнений. Из сплава золота, платины (до 50 %) и родия (0,5 %) изготавливаются фильеры для производства химических волокон. Другие сплавы золота используются для производства тиглей, кювет, катодных сеток.

Значение золота в технике с каждым годом возрастает, однако титул «царя металлов» оно имеет не за какие-то особые технические качества, а за то, что в условиях товарного производства выполняет функцию всеобщего эквивалента стоимости всех товаров.

Серебро – наиболее часто встречаемый и самый дешевый из благородных металлов. С тех пор как люди узнали серебро, они пользуются им как мерой стоимости. В Китае, Эфиопии, Иране, Афганистане вплоть до 30-х годов прошлого столетия в ходу были серебряные деньги. Бруски из серебра служили деньгами и в древней Руси.

Серебро плавится при температуре 960,8 °С, обладает наивысшей среди металлов электропроводностью, имеет хорошую отражательную способность, очень стойко химически. Применяется в основном в виде сплавов для чеканки монет, изготовления ювелирных и бытовых изделий, лабораторной посуды, а также для футеровки химической аппаратуры, покрытия радиодеталей, производства серебряно-цинковых аккумуляторов и т. д. Ионы серебра уничтожают бактерии и уже в незначительной концентрации стерилизуют питьевую воду.

Платина (исп. platina, уменьш. от plata серебро) – серовато-белый блестящий металл, очень стойкий химически (при комнатной температуре на нее действуют только «царская водка» и бром), плотность 21450 кг/м<sup>3</sup>, температура плавления 1769 °С. В природе встречается главным образом в самородном состоянии обычно в виде сплавов. В состав так называемой самородной платины входят в основном минералы ферроплатина (77...81 % Pt и 14...20 % Fe) и поликсен (80...92 % Pt и 6...10 % Fe), остальное – другие платиновые металлы, а также медь и никель.

Благодаря высокой коррозионной стойкости, устойчивости к действию высоких температур, хорошей обрабатываемости давлением платина широко применяется в различных областях техники. Из платины (и ее сплавов с родием и иридием) изготавливается аппаратура для химической промышленности, термометры сопротивления и термопары (сплавы платины с палладием, родием, иридием, рутением, осмием), электрические контакты и нагреватели. Платина абсолютно устойчива в расплавленном стекле. Поэтому она используется для изготовления плавильных тиглей для варки оптического стекла, требования к чистоте

которого очень высоки. Платиновые фильеры применяются в производстве стеклянного волокна. Большое количество платины идет на изготовление ювелирных изделий.

Из группы платиноидов наиболее часто в технике используется палладий благодаря своей пластичности и сравнительной дешевизне. Открыт он в 1803 г. и назван в честь малой планеты Паллады, обнаруженной в 1802 г. Это серовато-белый металл, мягкий и ковкий с плотностью  $11970 \text{ кг/м}^3$  и температурой плавления  $1552^\circ\text{C}$ . В чистом виде используется для очистки водорода. Сплавы палладия с серебром широко используются в аппаратах связи; сплавы с золотом, платиной, родием – в терморегуляторах и термopарах; сплавы с золотом, серебром, никелем и другими элементами – в ювелирном деле и зубопротезировании. Широко используются сплавы палладия в качестве катализаторов.

Осми́й (от греч. *osme* запах) – белый с серовато-голубым оттенком металл. Плотность –  $22500 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления –  $3050^\circ\text{C}$ . Свое название он получил из-за резкого запаха оксида  $\text{OsO}_4$ . Чистый осмий, а также его природные и искусственные сплавы с другими платиновыми металлами, благодаря их высокой твердости, коррозионной стойкости, износостойкости, используются для изготовления изнашивающихся деталей точных измерительных приборов, наконечников перьев в авторучках, в качестве катализаторов и др.

Роди́й (от греч. *rhodon* роза, из-за розовато-красного цвета растворов его солей) – металл серебристо-голубоватого цвета, твердый и тугоплавкий. Плотность –  $12420 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления  $1960^\circ\text{C}$ . Химически очень пассивен. Используется родий для гальванических покрытий, а также в сплавах с платиной в качестве катализаторов, термopар, химической посуды и т. д.

Руте́ний (от позднелат. *Ruthenia* Россия) – серовато-белый металл с удельной плотностью  $12200 \text{ кг/м}^3$  и температурой плавления  $2250^\circ\text{C}$ , открыт русским химиком К.К. Клаусом. Очень стоек химически. Сплавы рутения отличаются твердостью и износостойкостью, используются для изготовления наконечников перьев авторучек, ювелирных изделий, лабораторной посуды, в качестве катализаторов.

Ири́дий (от лат. *iris* радуга, из-за разнообразной окраски его солей) – металл серебристо-белого цвета, плотность  $22400 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления  $2410^\circ\text{C}$ . Благодаря коррозионной стойкости и жаропрочности иридий (в сплавах с вольфрамом, платиной, родием и др.) служит ценным материалом для изготовления химической аппаратуры. Из сплава платины (90 %) и иридия (10 %) изготовлены эталоны метра и килограмма. В приборах, где требуются большая твердость и стойкость против износа, используется природный осмистый иридий, так называемый осмиридий.

**Металлы с особыми свойствами** в некоторых областях техники являются незаменимыми конструкционными материалами. Из этой группы наиболее широко используются цирконий, гафний, тантал, ниобий, вольфрам, молибден, рений, ванадий, хром.

**Цирконий** (от названия минерала циркон, лат. Zirkonium) – металл серебристо-белого цвета, по внешнему виду очень похожий на сталь. Твердый, тугоплавкий, стойкий против коррозии, с плотностью  $6450 \text{ кг/м}^3$ , температурой плавления  $1852^\circ\text{C}$ . Устойчив к соляной, азотной и фосфорной кислотам.

По прочности он не уступает конструкционным сталям. Кроме того, обладает некоторыми особыми свойствами. Из циркония, например, изготавливаются оболочки топливных элементов для ядерных реакторов, так как он легко пропускает нейтроны. Является также очень эффективным легирующим элементом для железоуглеродистых сплавов и легких металлов. Сталям он придает лучшую вязкость, уменьшая их охрупчивание при низких температурах. Цирконий повышает прочность и отчасти коррозионную стойкость алюминиевых и магниевых сплавов.

**Гафний** (от позднелат. Hafnia Копенгаген, где этот металл был открыт) является постоянным спутником циркония. Это серебристо-белый металл с плотностью  $13090 \text{ кг/м}^3$ , температурой плавления  $2222^\circ\text{C}$ . Сдержится в рудах циркония, из которых его и получают. Существование гафния предсказал Д.И. Менделеев, а датский физик Нильс Бор установил некоторые свойства тогда еще не открытого элемента. Гафний и цирконий, столь похожие по многим свойствам, в ядерных реакторах выполняют противоположные функции. Если цирконий практически прозрачен для нейтронов, то гафний представляет для них почти непреодолимое препятствие. Поэтому он используется как замедлитель быстрых и поглотитель медленных (т. е. тепловых) нейтронов. Кроме того, гафний применяется в электронной технике (катоды, электроконтакты), производстве жаропрочных и тугоплавких сплавов для авиации и ракетной техники. Например, твердый раствор  $\text{HfC}$  и  $\text{TiC}$  – 1:4 – имеет температуру плавления  $4200^\circ\text{C}$ .

Другие два схожих между собой металла – тантал и ниобий.

**Тантал** – серо-стальной, очень тугоплавкий металл ( $t_{\text{пл}} = 3014^\circ\text{C}$ ), с плотностью  $16600 \text{ кг/м}^3$ . Редкий элемент, в природе встречается совместно с ниобием. Назван по имени мифического царя тантала, который не мог утолить жажду, стоя по горло в воде (отсюда выражение «танталовы муки») – из-за трудности получения его в чистом виде.

Тантал используется для изготовления компактных электролитических конденсаторов, деталей электронных ламп, химической аппаратуры. В хирургии он служит для скрепления костей, нервов, сосудов, наложения швов. В ювелирном деле является заменителем платины.

Сплавы на основе тантала с добавками ниобия, вольфрама, циркония, гафния и других элементов характеризуются высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Применяются для изготовления сопел ракет, деталей реактивных двигателей, электровакуумных приборов и т. д.

**Н и о б и й** – светло-серый тугоплавкий металл, чрезвычайно стоек химически. Плотность –  $8570 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления –  $2470^\circ\text{C}$ . Назван в честь Ниобы (греч. Niobe) – дочери царя Тантала из-за близости свойств ниобия и тантала. Редкий элемент, встречается в природе совместно с танталом.

Ниобий – один из основных легирующих элементов для получения многих жаропрочных и коррозионно-стойких сплавов, из которых изготавливаются химическая и нефтеперегонная аппаратура; детали реактивных двигателей, ракет, газовых турбин. Широко используется в ядерной энергетике, в радиоэлектронике, для получения сверхпроводников с максимальными критическими температурами.

Главными потребителями двух других тугоплавких металлов – вольфрама и молибдена – является металлургическая промышленность, которая до 90 % этих металлов использует для легирования сталей.

Вольфрам – светло-серый, очень тяжелый металл (удельная плотность  $19300 \text{ кг/м}^3$ ), наиболее тугоплавкий из металлов (температура плавления  $3410^\circ\text{C}$ ). Устойчив на воздухе при обычной температуре. Входит в составы жаропрочных сверхтвердых сталей и сплавов (инструментальных, быстрорежущих, стеллиты и др.) Чистый вольфрам по прочности превосходит лучшие стали. Холоднотянутая вольфрамовая проволока выдерживает растягивающую нагрузку  $4000 \text{ Н/мм}^2$  и даже в отоженном состоянии сохраняет прочность выше  $1000 \text{ Н/мм}^2$ . Из вольфрама изготавливаются нити накала в осветительных и электронных лампах, нагревательные элементы электропечей, неплавящиеся электроды для сварки в среде защитных газов и др.

**Молибден** (от греч. molybδος свинец) назван из-за внешнего сходства минералов молибденита и свинцового блеска. Серебристо-серый тугоплавкий металл с плотностью  $10200 \text{ кг/м}^3$  и температурой плавления  $2620^\circ\text{C}$ . Молибден используется при производстве легированных сталей для повышения их твердости и прочности.

Сплавы на основе молибдена с добавками вольфрама, рения, циркония, титана, ниобия и др. используются при производстве ответственных деталей ракет и других летательных аппаратов, в ядерной энергетике, электронике, в химической промышленности. Молибден является важнейшим материалом для электроосветительных ламп и электровакуумных приборов. Дисульфид  $\text{MoS}_2$  применяется в качестве твердой смазки в подшипниках и других трущихся металлических частях машин.

Сплавы молибдена с ураном используются в качестве тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Нанесение молибденового покрытия на поверхности изделий из стали, титана, ниобия и других металлов повышает их твердость, коррозионную стойкость в азотной кислоте, а с дополнительным силицированием – жаростойкость при высоких температурах.

Следующая группа тугоплавких металлов – рений, ванадий, хром.

**Рений** (от Rhenus, латинского названия реки Рейн в Германии) – металл светло-серого цвета с плотностью  $2103 \text{ кг/м}^3$  и температурой плавления  $3180^\circ\text{C}$ . Один из самых тяжелых и тугоплавких металлов. Химически стоек, является катализатором многих химических и нефтехимических процессов.

Сплавы рения с другими тугоплавкими металлами (вольфрам, молибден, тантал) высокожаропрочные и идут на изготовление деталей сверхзвуковых самолетов и ракет, сплавы с вольфрамом – для нитей накаливания и термопар. Рениевые покрытия защищают металлы от коррозии и износа.

**Ванадий** (лат. Vanadium) – металл серебристо-белого цвета, плотность –  $6110 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления –  $1900^\circ\text{C}$ . Назван в честь древнескандинавской богини красоты Ванадис, благодаря красивому цвету солей.

Основной потребитель ванадия – черная металлургия (до 95 %), которая использует его для получения сталей с повышенной прочностью, вязкостью и износостойкостью. Кроме того, соединения ванадия используются как катализаторы при производстве серной кислоты; в резиновой и стеклянной промышленности, красильном и других производствах.

**Хром** (от греч. Chroma цвет, краска; из-за яркой окраски соединений) – твердый металл серо-стального цвета, с плотностью  $7190 \text{ кг/м}^3$  и температурой плавления  $1875^\circ\text{C}$ . Хром входит в состав антикоррозионных, жаропрочных, кислотостойких сталей. Из сплавов, содержащих хром, изготавливаются детали особенно подверженные коррозии (корпуса подводных лодок, детали химической аппаратуры). Хром (электролитическим или диффузионным способом) наносят на поверхности других металлов для повышения жаростойкости, жаропрочности, сопротивления усталости, износостойкости, коррозионной стойкости в кислотах и морской воде, для придания нужных магнитных и электрических свойств.

Жаропрочные сплавы на основе хрома с добавками редкоземельных элементов, никеля, титана, ванадия и других элементов по прочностным свойствам при температуре  $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$  занимают среднее положение между сплавами на основе железа и никеля и сплавами на основе более тугоплавких металлов (ниобий, молибден, вольфрам). Сплавы, относящиеся к группе хромалей (от хром и алюминий), обладают значительной

жаростойкостью и высоким удельным электрическим сопротивлением. Применяются в качестве материала для нагревательных электрических печей и элементов сопротивления. Сплав никеля с 9...10 % хрома и 1% кобальта, используются для изготовления термопар в качестве положительного электрода в паре с алюминием.

Итак, к группе металлов с особыми свойствами условно отнесены практически все металлы (за исключением циркония), температура плавления которых равна или выше температуры плавления хрома (1875 °С). Следовательно, тугоплавкие металлы по возрастанию температур плавления располагаются в следующем порядке: хром, ванадий, гафний, ниобий, молибден, тантал, рений, вольфрам. Большинство этих металлов известно науке более 170...180 лет. Лишь гафний и рений были открыты сравнительно недавно: в 1923 г. – первый, а в 1925 г. – второй. Однако до Второй мировой войны в чистом виде использовались только три металла из отмеченных: молибден, тантал, вольфрам и то в ограниченных областях (в основном в электротехнике).

Положение резко изменилось в послевоенный период, когда для развития сверхзвуковой авиации и ракетной техники потребовались материалы, обладающие высокой прочностью при температурах выше 1100 °С. Из металлических материалов для этой цели пригодны лишь тугоплавкие металлы и сплавы на их основе.

В послевоенных исследованиях наибольшее внимание отдавалось ванадию, ниобию, танталу, хрому, молибдену и вольфраму.

Выбор металла или сплава для того или иного применения является сложной и многосторонней задачей, требующей одновременного учета целого ряда противоречивых факторов. Так практически все тугоплавкие металлы имеют высокую склонность к хладоломкости. Особенно это ярко выражено у хрома, молибдена и вольфрама. У этих металлов технической чистоты температура перехода от вязкого состояния к хрупкому выше комнатной и близка к  $0,75 t_{пл}$ , что создает трудности в их производстве и применении. Существенным недостатком тугоплавких металлов является также их высокая склонность к окислению, в связи с чем возникает необходимость нанесения защитных покрытий на изделия при работе в условиях высоких температур. Наиболее распространен в природе хром, однако он имеет наименьшую из всех тугоплавких металлов температуру плавления. К тому же хром обладает высокой хрупкостью при температурах ниже 350 °С. Несмотря на то, что в природе много ванадия, у него тоже сравнительно низкая температура плавления. Рабочие температуры сплавов на основе хрома и ванадия существенно не превышают рабочих температур лучших жаропрочных никелевых сплавов. Интерес к танталу последние годы упал, поскольку в ряде применений в авиационной и ракетной технике его можно заменить более деше-

вым и распространенным металлом – молибденом. К тому же у тантала значительная плотность. Вольфрам относится к самым тяжелым металлам, он также очень склонен к хладноломкости и переходит в хрупкое состояние ниже температуры 300 °С. Ниобий обладает сравнительно небольшой плотностью, высокой пластичностью, значительной тугоплавкостью.

В связи со сказанным наиболее перспективными тугоплавкими металлами считаются ниобий и молибден.

## 7.2. Алюминиевые сплавы

### 7.2.1. Классификация алюминиевых сплавов

Технический алюминий в качестве конструкционного материала применяется для изготовления слабонагруженных деталей, когда главную роль играют малая плотность, высокая пластичность, коррозионная стойкость, удовлетворительная свариваемость. Высокая электропроводность алюминия в сочетании с малой плотностью дают возможность его широкого использования в электротехнике в качестве материала для проводников. Благодаря высокой теплопроводности из технического алюминия изготавливаются теплообменники в холодильных установках. Высокая отражательная способность содействует его широкому применению при изготовлении рефлекторов, зеркал, экранов. Коррозионная стойкость позволяет широко применять алюминий в строительстве, пищевой промышленности, химическом машиностроении.

Наибольшее количество алюминия расходуется для производства сплавов на его основе, которые благодаря малой плотности и высокой прочности дают возможность значительно снижать массу изделий.

Для получения сплавов с различными свойствами алюминий легируют другими компонентами. Наиболее часто для этих целей используются медь, марганец, магний, цинк, кремний и др. Благодаря этому в промышленности в настоящее время используется более пятидесяти марок сплавов, диаграммы состояния которых подобны диаграмме, схема которой представлена на рис. 74.

В зависимости от способа получения полуфабрикатов и изделий алюминиевые сплавы можно разделить на три группы: деформируемые, литейные и порошковые (рис. 75).

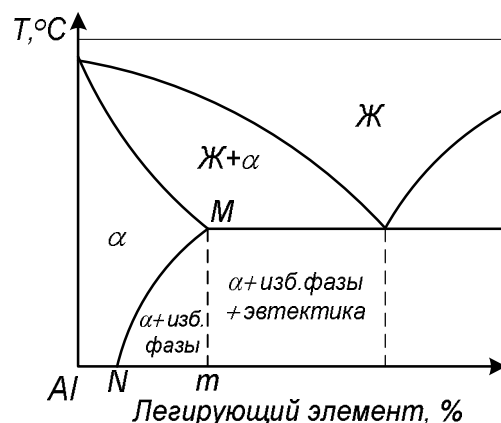


Рис. 74. Схема диаграммы состояния сплавов на основе алюминия

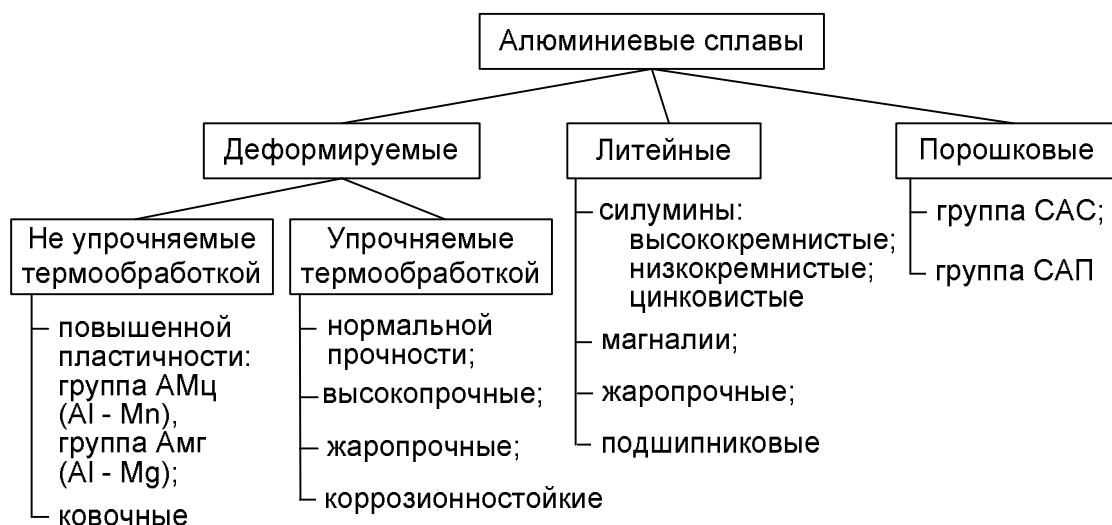


Рис. 75. Классификация алюминиевых сплавов

Маркируются алюминиевые сплавы следующим образом. Буква А в начале марки обозначает технический алюминий, а буква Д – дюралюмины (сплавы системы Al–Cu–Mg). Буквы АМц и АМг показывают, что сплавы относятся к группам, в которых основными легирующими элементами являются марганец и магний соответственно. Буквы АК, стоящие в начале обозначения, присвоены ковким алюминиевым сплавам, В – высокопрочным сплавам. Литейные сплавы обозначаются индексом АЛ. После букв проставляется условный номер сплава. Часто за условным номером следуют обозначения, характеризующие состояние сплава: М – мягкий (отожженный); Т – термически обработанный закалкой и старением; Н – нагартованный; П – полунагартованный и др. Например, сплав АМг5Н – алюминиевый сплав системы Al–Mg, условный номер 5, с сильным наклепом (нагартованный). Из деформируемых алюминиевых сплавов изготавливаются полуфабрикаты и готовые изделия методами обработки давлением (прокаткой, прессованием, ковкой, штамповкой и др.). Такие сплавы должны иметь однородную структуру, высокую пластичность.

Литейные сплавы предназначены для фасонного литья. Они должны обладать высокой жидкотекучестью, малой склонностью к образованию горячих трещин, способностью заполнять литейные формы сложной конфигурации.

Порошковые алюминиевые сплавы: САПы (спеченные алюминиевые порошки) и САСы (спеченные алюминиевые сплавы) изготавливаются методами порошковой металлургии с последующей обработкой давлением. Поэтому порошковые алюминиевые сплавы в общем случае можно рассматривать как разновидность деформируемых.

Деформируемые и литейные сплавы подразделяются на термически упрочняемые и термически неупрочняемые. Термическое упрочнение может осуществляться закалкой с последующим естественным и искусственным старением.

Кроме того, все применяемые в промышленности и на транспорте алюминиевые сплавы можно сгруппировать по системам, в которых определенные легирующие элементы формируют необходимые физико-химические и эксплуатационные свойства. Помимо основных элементов, в сплавы одной системы могут входить различные добавки других элементов, которые сообщают сплаву какие-то новые свойства, но не изменяют их основной природы.

Принадлежность алюминиевого сплава к той или иной группе определяется характером взаимодействия алюминия и легирующих элементов, т. е. типом диаграммы состояния. Часть легирующих элементов (медь, кремний, магний, цинк) очень сильно изменяют свойства алюминия. Другие (никель, марганец, хром) – улучшают свойства только при наличии основных легирующих компонентов. Некоторые элементы (натрий, бериллий, титан, ниобий) используются в качестве модифицирующих добавок.

Большинство легирующих элементов образуют с алюминием ограниченные твердые растворы, в которых растворимость элемента с понижением температуры уменьшается, в результате чего выделяются избыточные вторичные кристаллы. Так, в системе Al–Si избыточной фазой являются кристаллы кремния, в системе Al–Cu – химическое соединение  $\text{CuAl}_2$ , в системе Al–Mg – соединение  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ . В многокомпонентных сплавах могут образовываться тройные или четверные соединения (например,  $\text{CuMgAl}_2$ ,  $\text{AlCuMgSi}$ ), растворимость которых в алюминии ограничена и с понижением температуры понижается.

Рассмотрим структурные составляющие алюминиевых сплавов, схема диаграммы состояния которых приведена на рис. 74. Те из них, которые имеют суммарное количество легирующих элементов меньше количества, соответствующего точке N, в твердом состоянии будут однофазными, то есть представляют собой твердый раствор  $\alpha$ . Такие сплавы пластичны, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях. В связи с тем, что в них не происходит никаких фазовых превращений, упрочнить такие сплавы термической обработкой не представляется возможным.

При содержании в сплавах легирующих элементов больше концентрации, соответствующей точке N, при охлаждении выделяются избыточные фазы в виде вторичных кристаллов. Их состав и структура определяются составом сплава в целом. Избыточные фазы всегда упрочняют сплав, делают его более твердым и прочным, но понижают пластичность.

В сплавах, лежащих правее точки М имеется равновесная эвтектика, которая не устраняется никакой термической обработкой. В результате этого существенно снижается способность к пластической деформации, но возрастают литейные свойства.

Итак, все сплавы, имеющие концентрацию легирующих элементов меньше концентрации, соответствующей точке m, относятся к деформируемым, а сплавы с большей концентрацией – к литейным.

Все алюминиевые сплавы (как деформируемые, так и литейные) классифицируются по свойствам: с повышенной пластичностью, высокопрочные, жаропрочные, коррозионно-стойкие и др. (см. рис. 75).

### 7.2.2. Состав, структура и свойства алюминиевых сплавов

**К деформируемым сплавам не упрочняемым термической обработкой** относятся сплавы алюминия с марганцем или с магнием (табл. 6), а также технический алюминий (АДО, АД, АД1). Для этих материалов характерны высокая пластичность, значительная коррозионная стойкость, хорошая свариваемость, а для сплавов с магнием – пониженная плотность. Прочность отмеченных материалов невысокая. Однако, холодная деформация (нагартовка) позволяет увеличить ее в 1,5...2 раза.

Сплавы системы Al–Mn достаточно широко используются в промышленности. Они содержат от 1 до 1,6 % марганца. В действительности сплавы группы АМц не являются двойными, так как примеси железа и кремния (неизбежные примеси алюминия) делают его многокомпонентным. Эти примеси сильно понижают растворимость марганца в алюминии.

Таблица 6

#### Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов, не упрочняемых термической обработкой

| Система | Марка сплава | Массовая доля элементов, % |           |           |             |                |
|---------|--------------|----------------------------|-----------|-----------|-------------|----------------|
|         |              | Mn                         | Mg        | Si        | Ti          | Fe             |
| Al – Mn | АМц          | 1,0...1,6                  | –         | –         | –           | –              |
| Al – Mg | АМг 1        | –                          | 0,4...1,7 | –         | –           | –              |
|         | АМг 2        | 0,2...0,6                  | 1,8...2,8 | –         | –           | –              |
|         | АМг 3        | 0,3...0,6                  | 3,2...3,8 | 0,5...0,8 |             |                |
|         | АМг 5        | 0,3...0,8                  | 4,8...5,8 | –         | 0,02...0,10 | 0,0002...0,005 |
|         | АМг 6        | 0,5...0,8                  | 5,8...6,8 | –         | 0,02...0,10 | 0,0002...0,005 |

С 1936 г. началось широкое внедрение сплавов системы Al–Mg. В этой системе образуется несколько химических соединений: интерметаллидная фаза  $\beta$  ( $Al_3Mg_2$ ), а в присутствии железа и кремния дополнительные фазы и соединение  $Mg_2Si$ . Упрочняющей термической обработкой

ке сплавы АМг не подвергаются, так как эффект термического упрочнения гораздо ниже эффекта деформационного упрочнения. Кроме того, диффузионные процессы в сплавах системы Al–Mg протекают очень медленно, а повышение температуры искусственного старения резко ухудшают коррозионную стойкость из-за выделения по границам зерен фазы  $\beta$  ( $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ).

Высокая пластичность, удовлетворительная прочность, хорошие коррозионная стойкость и свариваемость обусловили широкое применение сплавов системы Al-Mg для изготовления сварных конструкций.

**Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой** можно разделить на следующие виды:

- конструкционные (Al – Cu – Mg);
- повышенной пластичности (Al – Mg – Si);
- ковочные (Al – Mg – Si – Cu);
- высокопрочные (Al – Zn – Mg – Cu);
- жаропрочные (Al – Cu – Mg и Al – Cu – Mn).

Одним из старейших алюминиевых сплавов, предложенным в 1906 году немецким исследователем А. Вильмом, является сплав алюминия с медью, магнием и марганцем (4 % Cu; 0,5 Mg и 0,5 % Mn), который позднее получил название дюралюмин (дюраль, дюралюмин, дюралюминий) (от нем. Düren город, где впервые было начато промышленное производство сплава). В табл. 7 приведен химический состав некоторых промышленных марок дюралюминов.

Таблица 7

#### Химический состав промышленных дюралюминов

| Сплав | Среднее содержание компонентов, % |      |      |      |      |
|-------|-----------------------------------|------|------|------|------|
|       | Cu                                | Mg   | Mn   | Ti   | Zr   |
| Д 1   | 4,3                               | 0,6  | 0,60 | –    | –    |
| Д 16  | 4,3                               | 1,5  | 0,60 | –    | –    |
| Д 19  | 4,0                               | 2,0  | 0,75 | –    | –    |
| ВАД 1 | 4,1                               | 2,5  | 0,60 | 0,06 | 0,15 |
| ВД 17 | 3,0                               | 2,2  | 0,55 | –    | –    |
| ВД 18 | 2,6                               | 0,35 | –    | –    | –    |
| В 65  | 4,2                               | 0,25 | 0,40 | –    | –    |

Структура дюралюминов состоит из твердого раствора и упрочняющих фаз, наиболее распространенными из которых являются  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ . Дюралюмины практически всегда содержат неизбежные примеси железа и кремния, которые с алюминием, медью и магнием образуют интерметаллидные фазы, нерастворимые в алюминии. В связи с этим они не участвуют в термическом упрочнении и отрицательно влияют на технологическую пластичность и коррозионную стойкость.

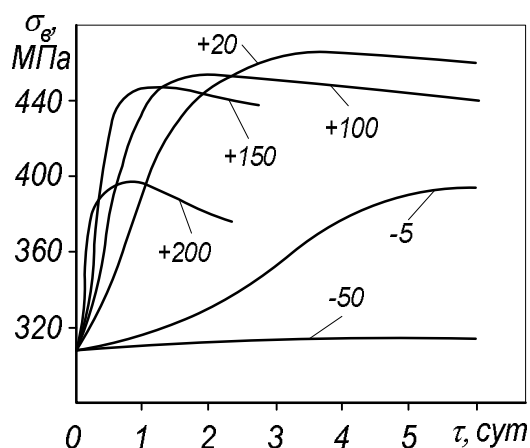


Рис. 76. Зависимость прочности дюралюмина  $\sigma_b$  от температуры (цифры на кривых,  $^{\circ}\text{C}$ ) и времени  $\tau$  старения

Дюралюмины обычно подвергаются закалке с температуры  $500 \pm 5^{\circ}\text{C}$  и естественному старению в течение 5...7 суток, в результате чего достигается максимальная прочность (рис. 76).

У некоторых сплавов температура рекристаллизации выше температуры их закалки. Поэтому упрочнение таких сплавов дополнительно к эффекту старения создается обработкой давлением. Такое упрочнение называется прессэффектом.

Дюралюминий находит очень широкое применение в строительстве, авиастроении, автомобилестроении, вагоностроении.

Алюминиевые сплавы повышенной пластичности (Al–Mg–Si) широко известны под названием авиали (авиационный алюминий). Первый термически упрочняемый сплав системы Al–Mg–Si был получен в 1923 году Джеффрисом и Арчером. В табл. 8 приведены химические составы некоторых сплавов этой системы, из которой видно, что они легированы в меньшей степени, чем дюралюмины. Суммарное содержание легирующих компонентов обычно колеблется в пределах 1...2 %. Они менее прочны, чем дюралюмины, но более пластичны и обладают лучшей коррозионной стойкостью.

Таблица 8

### Средний состав промышленных сплавов системы Al–Mg–Si (ГОСТ 4784-97)

| Сплав | Содержание компонентов, % |     |      |     |      |
|-------|---------------------------|-----|------|-----|------|
|       | Cu                        | Mg  | Mn   | Si  | Cr   |
| АВ    | 0,4                       | 0,7 | 0,25 | 0,9 | –    |
| АД 31 | –                         | 0,7 | –    | 0,5 | –    |
| АД 33 | 0,3                       | 1,0 | –    | 0,6 | 0,25 |
| АД 35 | –                         | 1,1 | 0,7  | 1,0 | –    |

Закалка сплавов Al–Mg–Si осуществляется с температуры 520...540  $^{\circ}\text{C}$ , причем строгого соблюдения выбранной температуры не требуется. Однако нагрев выше 540  $^{\circ}\text{C}$  не рекомендуется, так как это может привести к росту зерна в холоднодеформированных изделиях и первичной рекристаллизации.

Критическая скорость охлаждения рассматриваемой группы сплавов меньше, чем у дюралюминов. Так, прессованные профили из сплава АД 31 закаливаются при охлаждении на воздухе. Если гомогенизирован-

ный слиток нагреть перед прессованием до температуры 510...530 °С, то выходящий из матрицы профиль будет иметь температуру 490...500 °С. Следовательно, охлаждение его на воздухе после прессования заменяет закалку.

Закаленные сплавы системы Al–Mg–Si упрочняются при естественном и искусственном старении. Естественное старение протекает несколько медленнее, чем в дюралюминах. Прирост прочности продолжается в течение двух недель после закалки.

На практике чаще применяется искусственное старение, так как оно дает больший прирост прочности. Наиболее рациональные механические свойства обеспечиваются при нагреве до 160...170 °С в течение 12...15 ч. Однако после искусственного старения уменьшается коррозионная стойкость. Кроме того, механические свойства искусственно состаренных сплавов системы Al–Mg–Si чувствительны к продолжительности времени между закалкой и искусственным старением. Поэтому для получения максимальной прочности искусственное старение необходимо проводить сразу после закалки. Снижение прочности, вызванное перерывом между закалкой и старением, частично можно компенсировать увеличением выдержки при искусственном старении.

Ковочные алюминиевые сплавы относятся к системе Al–Cu–Mg–Si, обладают хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при горячей пластической деформации (табл. 9).

*Таблица 9*

**Химический состав промышленных сплавов  
системы Al–Cu–Mg–Si (ГОСТ 4784-97)**

| Сплав | Содержание элементов, % |           |           |           |
|-------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
|       | Cu                      | Mg        | Si        | Mn        |
| АК 6  | 1,8...2,6               | 0,4...0,8 | 0,7...1,2 | 0,4...0,8 |
| АК 8  | 3,9...4,8               | 0,4...0,8 | 0,5...1,2 | 0,4...1,0 |

Как видно из табл. 9, по своему химическому составу сплавы АК 6 и АК 8 имеют нечто общее с дюралюминами (Al–Cu–Mg) и авиалами (Al–Mg–Si).

Максимальный эффект упрочнения ковочных сплавов достигается закалкой с последующим искусственным старением. Температура нагрева под закалку для сплава АК 6 составляет 520±5 °С, а для сплава АК 8 – 505±5 °С. Искусственное старение для обоих сплавов проводится при температуре 160...170 °С в течение 12...15 часов.

Сплав АК 6 отличается достаточно высокой прочностью и очень хорошей пластичностью в нагретом и холодном состояниях.

Для сплава АК 8 характерны высокие прочностные свойства, что дает возможность его использования для изготовления ответственных силовых штамповок. Однако он менее технологичен, чем сплав АК 6. Существенным недостатком также является большая неравномерность структуры и свойств поковок и штамповок по объему. По вязкости сплав АК 8 существенно уступает сплаву АК 6, но обладает хорошей свариваемостью.

Сплавы АК 6 и АК 8 имеют низкую коррозионную стойкость. Поэтому изделия из них требуют тщательной защиты от коррозии.

Высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu (В 95, В 96, В 96ц) содержат значительное количество цинка (табл. 10).

Повышенная прочность этих сплавов вызвана наличием в их структуре интерметаллидных фаз  $MgZn_2$ ,  $Al_2Mg_3Zn_3$ ,  $Al_2CuMg$ . Отмеченные фазы могут быть упрочняющими при термообработке сплавов. Нагрев до температуры 470...480 °С приводит к растворению интерметаллидных фаз с относительно небольшим количеством остаточной фазы  $Al_2CuMg$ . Однако, медь, повышая прочность сплавов в закаленном состоянии, оказывает незначительное влияние на эффект старения, т. е. на прирост прочности в процессе старения. Значит основными упрочняющими фазами в сплавах системы Al–Zn–Mg–Cu являются  $MgZn_2$  и  $Al_2Mg_3Zn_3$ , а фаза  $Al_2CuMg$  играет значительно меньшую роль.

Таблица 10

**Содержание легирующих элементов в сплавах  
системы Al–Zn–Mg–Cu (ГОСТ 4784-97)**

| Сплав | Содержание элементов, % |           |           |           |           |             |
|-------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
|       | Zn                      | Cu        | Mg        | Mn        | Cr        | Zr          |
| В 95  | 5,0...7,0               | 1,4...2,0 | 1,8...2,0 | 0,2...0,6 | 0,1...0,2 | –           |
| В 96  | 7,6...8,6               | 2,2...2,8 | 2,5...3,2 | 0,2...0,5 | 0,1...0,2 | –           |
| В 96ц | 8,0...9,0               | 2,0...2,6 | 2,5...2,9 | –         | –         | 0,12...0,18 |

Добавки марганца и хрома в высокопрочные сплавы образуют в структуре дисперсные интерметаллидные фазы  $Al_6Mn$  и  $Al_7Cr$ , которые являются продуктами распада пересыщенного твердого раствора этих элементов в алюминии. Фазы повышают температуру рекристаллизации, затрудняют рост зерен при вторичной рекристаллизации, способствуют сохранению нерекристаллизованной структуры в прессованных изделиях после термообработки, т. е. обеспечивают при определенных условиях прессования и термообработки прессэффект.

Много общего с механизмом влияния марганца и хрома на структуру и свойства алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu имеет механизм влияния циркония, который при кристаллизации сплавов также образует с алюминием пересыщенный твердый раствор, распадающийся

при последующей обработке с выделением циркониевых интерметаллидов, более дисперсных, чем интерметаллиды марганца и хрома. Поэтому, несмотря на малую равновесную растворимость циркония в алюминии, он более интенсивно, чем другие переходные металлы повышает температуру рекристаллизации, сохраняет нерекристаллизованную структуру в прессованных и других горячедеформированных изделиях после термообработки, чем значительно упрочняет сплав.

Сплавы В95 и В96 подвергаются закалке с температуры 460...470 °С с последующим охлаждением в холодной или подогретой до 80...90 °С воде для исключения растрескивания и коробления крупногабаритных изделий. Для повышения пластичности, вязкости, коррозионной стойкости под напряжением сплавы подвергаются двухступенчатому смягчающему искусственному старению.

Жаропрочные сплавы АК 4-1 и Д 20 относятся к системам Al–Cu–Mg–Si (с добавками железа и никеля) и Al–Cu–Mn (с добавками титана и циркония). Эти сплавы, химический состав которых представлен в табл. 11, сохраняют высокие механические свойства при температурах 200...300 °С.

*Таблица 11*

**Химический состав жаропрочных алюминиевых сплавов  
(ГОСТ 4784-97)**

| Сплав   | Содержание элементов, % |         |         |           |           |           |         |         |
|---------|-------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|         | Cu                      | Mg      | Mn      | Si        | Ti        | Zr        | Ni      | Fe      |
| АК 4 -1 | 1,9-2,5                 | 1,4-1,8 | –       | 0,33-0,37 | 0,02-0,10 | –         | 1,0-1,5 | 1,0-1,5 |
| Д 20    | 6,0-7,0                 | –       | 0,4-0,8 | 0,25-0,35 | 0,10-0,20 | 0,19-0,21 | –       | –       |

Сплав АК 4-1, кроме основных легирующих компонентов (медь и магний), содержит практически нерастворимые в алюминии железо и никель. Эти элементы при нормальной температуре не только не улучшают механические свойства, а даже несколько снижают пластичность. Но при повышенных температурах они увеличивают гетерогенность структуры, тем самым, повышая механические свойства. Поэтому сплавы системы Al–Cu–Mg с добавками железа и никеля используются в изделиях, работающих при повышенных температурах.

Железо и никель находятся в виде включений фазы Al<sub>9</sub>FeNi, которая в закаленном сплаве, равномерно распределяясь по объему матрицы, увеличивает сопротивление пластической деформации при повышенных температурах.

Сплав АК 4-1 подвергается закалке с температуры 530±5 °С в холодной или горячей (для уменьшения внутренних напряжений) воде с последующим искусственным старением при 190...200 °С в течение 12...24 часов. После термической обработки сплав, как правило, имеет

рекристаллизованную структуру. Железо и никель повышают температуру рекристаллизации деформированных изделий, но гораздо меньше, чем марганец, хром и цирконий. Поэтому пресс-эффект для сплава АК 4-1 практического значения не имеет.

Сплав Д 20 закаливается нагревом до температуры  $535 \pm 5$  °С и охлаждением в воде. После этого производится искусственное старение при температуре 170...190 °С в течение 12...18 часов.

Жаропрочные сплавы используются для изготовления изделий, работающих при температурах до 300 °С: головки и поршни двигателей внутреннего сгорания, лопатки и диски компрессоров турбореактивных двигателей, трубы, обшивка сверхзвуковых самолетов и др.

**Литейные алюминиевые сплавы.** Использование в промышленности того или иного вида алюминиевого сплава определяется его эксплуатационными и технологическими свойствами. К последним относятся литейные свойства, способность к обработке давлением, обрабатываемость резанием, свариваемость и др. Имеются случаи, когда сплав с хорошими эксплуатационными свойствами не находит применения из-за низких технологических свойств.

Для литейных сплавов значение технологических факторов особенно важно. Они должны быть жидкотекучими, обладать низкой усадкой, не иметь склонности к образованию горячих трещин и усадочной пористости. Все дефекты литой структуры, зависящие от литейных свойств, сохраняются в готовом изделии.

Наиболее широкое использование в качестве литейных находят сплавы на основе системы Al–Si (табл. 12).

Таблица 12

**Химический состав литейных алюминиевых сплавов  
(ГОСТ 1583-93)**

| Система сплава | Марка сплава | Содержание элементов, % |            |            |           |         |
|----------------|--------------|-------------------------|------------|------------|-----------|---------|
|                |              | Si                      | Mg         | Mn         | Cu        | Zn      |
| Al–Si          | АЛ 2         | 10...13                 | –          | –          | –         | –       |
|                | АЛ 4         | 8...10,5                | 0,17...0,3 | 0,25...0,5 | –         | –       |
| Al–Si–Cu       | АЛ 5         | 4,5...5,5               | 0,35...0,6 | –          | 1...1,5   | –       |
|                | АЛ 6         | 4,5...6                 | –          | –          | 2...3     | –       |
| Al–Mg          | АЛ 8         | –                       | 9,5...11,5 | –          | –         | –       |
|                | АЛ 13        | 0,8...1,3               | 4,5...5,5  | 0,1...0,4  | –         | –       |
| Al–Cu          | АЛ 7         | –                       | –          | –          | 4...5     | –       |
|                | АЛ 19        | –                       | –          | 0,6...1    | 4,5...5,3 | –       |
| Al–Zn          | АЛ 11        | 6...8                   | 0,1...0,3  | –          | –         | 10...14 |

Из этой группы сплавов важнейшую роль в промышленности играют силумины (система Al–Si), для которых характерны малые температурные интервалы кристаллизации и очень хорошие литейные свойства (рис. 77).

Как видно из табл. 12 и рис. 77 силумины относятся к эвтектическим или доэвтектическим сплавам. Без учета влияния других элементов (кроме кремния) их структура содержит либо эвтектику, состоящую из смеси кристаллов твердого раствора кремния в алюминии Al(Si) и вторичных кристаллов кремния Si<sub>II</sub>, либо эвтектику и первичные кристаллы кремния Эвт[Al(Si) + Si<sub>II</sub>] + Si. Первая структура характерна для сплава АЛ 2, вторая – для сплава АЛ 4.

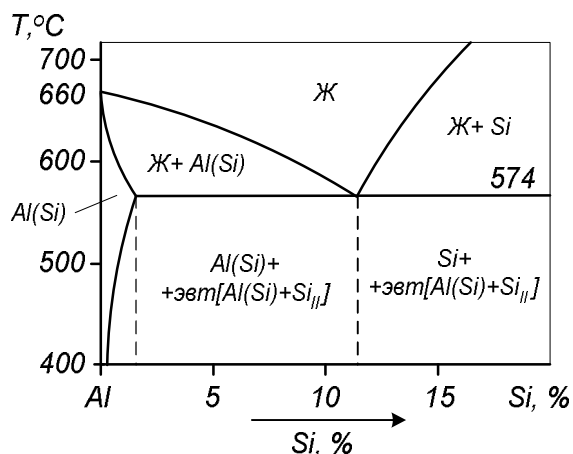


Рис. 77. Диаграмма состояния сплавов Al–Si

Так как кремний имеет переменную растворимость в алюминии, возрастающую до 1,65 % при эвтектической температуре 574 °С, то при нагреве сплава до температуры, близкой к эвтектической, и последующем быстром охлаждении можно получить перенасыщенный твердый раствор Al(Si), который при последующем старении распадается с выделением дисперсных частиц кремния.

Однако упрочняющий эффект при этом получается незначительным и практического значения не имеет. Следовательно, простые (двойные) силумины относятся к термически неупрочняемым сплавам. Несколько повысить их прочность и пластичность можно измельчением эвтектических кристаллов путем увеличения скорости охлаждения при кристаллизации или введением незначительных добавок щелочных металлов (натрия, лития, стронция).

Первый способ дает хорошие результаты, но находит ограниченное применение в основном для тонкостенных деталей, отливаемых в металлический кокиль или методом литья под давлением. Второй путь более универсален, так как в этом случае улучшение структуры происходит не от образования каких-либо новых структурных составляющих, а в результате влияния добавок на величину и форму структурных составляющих, образованных другими компонентами.

На практике широко применяется модифицирование силуминов натрием. Введение 0,01 % натрия в сплавы системы Al–Si ведет к резкому измельчению кристаллов эвтектического кремния.

Из других легирующих компонентов в силуминах наиболее часто используется магний и медь. При их введении сплавы становятся термически упрочняемыми. Магний образует фазу  $Mg_2Si$  являющуюся эффективным упрочнителем при термообработке. При одновременном введении в сплавы добавок магния и меди могут образовываться упрочняющие фазы  $Al_2Mg_5Cu_4Si_4$  и  $Al_2Cu$ .

При закалке сплава АЛ 4 температура нагрева составляет  $535 \pm 5$  °С с выдержкой 2...6 часов. Охлаждение осуществляется в горячей воде 50...95 °С. Искусственное старение проводится в течение 15 часов при температуре 175 °С.

Указанные режимы термообработки используются при необходимости получения максимальных прочностных характеристик. При необходимости получения других характеристик у готовых изделий, применяются другие режимы старения.

Сплавы АЛ 5 и АЛ 6 относятся к низкокремнистым силуминам термически упрочняемым. Кремний и медь в этих сплавах образуют упрочняющие интерметаллидные фазы  $Mg_2Si$  и  $Al_2Cu$ . Эти сплавы используются для производства методом литья крупных нагруженных деталей различных двигателей, головок и рубашек цилиндров, блоков и картеров двигателей и других ответственных деталей.

Наиболее прочными алюминиевыми сплавами являются сплавы системы Al–Mg (магналии). При высокой прочности эти сплавы обладают значительной пластичностью и имеют высокую коррозионную стойкость.

Основным легирующим элементом магналий является магний, большая часть которого находится в твердом растворе. Фазовый состав состоит из твердого раствора  $Al(Mg)$  и интерметаллидов  $Al_3Mg_2$ . Сплавы, содержащие магния до 7...8 %, при термообработке не упрочняются. Незначительное упрочнение наблюдается только у сплавов с более высоким содержанием магния. Поэтому сплавы АЛ 13 обычно используются в литом состоянии без термической обработки. Для улучшения литейных свойств в сплав АЛ 13 вводится кремний.

Сплав АЛ 8 при термообработке упрочняется вследствие растворения магния в алюминии. При последующем старении прочность изменяется незначительно, а пластичность снижается существенно. Поэтому он подвергается только закалке при температуре  $430 \pm 5$  °С с выдержкой 12...20 часов и последующим охлаждением в масле. После закалки сплавы АЛ 8 естественно стареют. Процесс старения идет длительное время (в течение многих лет), что отрицательно сказывается на пластичности при небольшом приросте прочности.

Сплавы на основе системы Al–Cu (АЛ 7, АЛ 19), в которых содержится 4...5,5 % меди, имеют двухфазную структуру ( $\alpha + Al_2Cu$ ) и используются в качестве жаропрочных.

Сплав АЛ 7 имеет широкий температурный интервал кристаллизации (90...100 °С), что ухудшает литейные свойства. В связи с присутствием в сплаве примесей железа и кремния, помимо упрочняющей фазы  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , содержатся нерастворимые фазы  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  и  $\text{Al}(\text{Fe}, \text{S})$ , которые располагаются по границам дендритных ячеек и повышают прочность при повышенных температурах. В сплавах АЛ 19 эту роль играет фаза  $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ .

Закалка сплава АЛ 7 проводится от температуры  $515 \pm 5$  °С с выдержкой 10...15 часов и последующим охлаждением в горячей воде. Искусственное старение проводится в течение 2...4 часов при температуре  $150 \pm 5$  °С. В тех случаях, когда максимальной прочности не требуется, но необходимо сохранить повышенную пластичность, сплав старению не подвергается.

Сплав АЛ 19 при закалке нагревается до температуры  $545 \pm 5$  °С, выдерживается 5...9 часов и охлаждается в горячей воде. Затем следует старение при температуре  $175 \pm 5$  °С в течение 3...5 часов. Поскольку температура нагрева под закалку значительна, а в сплаве могут быть неравновесные эвтектики, плавящиеся при более низкой температуре, нагрев следует проводить ступенчато.

Сплавы АЛ 7 и АЛ 19 используются для изготовления высоконагруженных ответственных деталей, работающих при температурах до 300 °С.

К группе цинковистых силуминов относится сплав АЛ 11 со значительным количеством цинка (10...14 %). Цинк, растворяясь в алюминии, упрочняет твердый раствор и значительно повышает механические свойства. Присутствие в сплаве кремния обеспечивает хорошие литейные свойства. Кроме того, сплав модифицируется натрием. Он используется для изготовления крупных тяжелонагруженных изделий.

При создании подшипниковых алюминиевых сплавов используются такие основные легирующие элементы, как медь, никель, сурьма, кремний. Введение в составы сплавов компонентов с низкой температурой плавления (олово, кадмий) или графита повышает сопротивление к схватыванию при сухом или полужидком трении. Цинк и магний увеличивают прочность сплавов и их нагрузочную способность.

Подшипниковые сплавы на основе алюминия обладают рядом достоинств, благодаря которым они находят широкое применение в промышленности:

- низкий модуль упругости обеспечивает хорошие условия работы машин и механизмов с повышенным прогибом вала;
- высокая теплопроводность обеспечивает высокую сохранность смазочных материалов в узлах трения;
- относительно высокая прочность;

– широкий диапазон легирования дает возможность создания широкой номенклатуры подшипников для разнообразных технических устройств;

– хорошая технологичность позволяет изготавливать подшипники методами литья, прокатки, прессования и т. д.

**Порошковые алюминиевые сплавы** относятся к группе сплавов, изделия из которых не могут быть получены традиционными технологиями – литьем слитка с последующей его обработкой давлением, или фасонным литьем. Для обеспечения заданных свойств таких сплавов применяются специальные технологические процессы – гранульная или порошковая металлургия.

Порошковые алюминиевые сплавы в качестве легирующих компонентов содержат либо  $Al_2O_3$ , либо в значительном количестве тугоплавкие малорастворимые или не растворимые в твердом алюминии металлы (хром, цирконий, железо, никель и т. д.). Нерастворимые твердые фазы таких элементов ( $Al_3Zr$ ,  $Al_7Cr$ ,  $Al_3Fe$ ), в том числе и  $Al_2O_3$  при их достаточной дисперсности и равномерном распределении в матрице позволяют получать уникальные свойства, которые невозможно достичь при обычном механизме упрочнения – с помощью дисперсных фаз, выделяющихся из твердого раствора в результате закалки и старения.

Для изготовления порошковых алюминиевых сплавов (САП) применяется предварительно окисленная алюминиевая пудра, получаемая спеканием и состоящая из чешуек толщиной 1 мкм. Ее количество составляет от 6 до 22 %. Каждая частичка пудры покрыта тонким слоем окиси алюминия. Поэтому чем тоньше пудра, тем больше суммарная поверхность частиц, тем больше в САПе окиси алюминия.

Порошковые алюминиевые сплавы значительно прочнее деформированного алюминия. Однако многие алюминиевые сплавы при нормальной температуре прочнее САПа. Значит при нормальной температуре последние большого интереса не представляют. Основное преимущество порошковых сплавов – их высокая жаропрочность, которая сохраняется при температурах выше 350 °С, т. е. таких температурах, при которых жаропрочные алюминиевые сплавы (Д 16, Д 19, АК 4-1) разупрочняются настолько, что их использование становится невозможным. Сплав САП может работать кратковременно при температуре 1000 °С и длительно – при 550 °С.

По коррозионной стойкости САП равноценен алюминию с добавками железа и никеля и может длительно эксплуатироваться в паровоздушной среде при 350 °С. Он сваривается аргонодуговой сваркой, хорошо обрабатывается резанием. Используется для изготовления дисков компрессоров, лопастей вентиляторов и турбин, болтов, винтов и других изделий.

Гранулированными алюминиевыми сплавами называются сплавы, получаемые из мелких частиц (гранул), отлитых со сверхвысокой скоростью кристаллизации ( $10^3 \dots 10^6$ ) °C/с. Такие высокие скорости охлаждения дают возможность легирования алюминиевых сплавов компонентами, малорастворимыми или нерастворимыми в твердом алюминии. В сплавах, имеющих в составе переходные металлы, образуются пересыщенные твердые растворы, содержащие легирующие элементы в количестве значительно превышающем (4...5 раз) их предельную растворимость. Например, предельная растворимость марганца в алюминии составляет 1,4 %. При охлаждении алюминиево-марганцевых сплавов из жидкого состояния со скоростью  $10^4$  °C/с образуются твердые растворы, содержащие марганца до 5 %. Такие твердые растворы называются аномально пересыщенными. Если обычно при получении алюминиевых сплавов, содержащих марганец, хром, титан, цирконий, ванадий их количество составляет десятые, а иногда и сотые доли процента; то в аномальных пересыщенных твердых растворах содержание увеличивается в несколько раз.

Для получения новых композиций гранулированных сплавов наиболее перспективными являются:

- сплавы алюминия, легированные марганцем, хромом, цирконием, титаном и некоторыми другими переходными металлами, которые имеют в твердом алюминии незначительную растворимость, но при больших скоростях кристаллизации образуют с алюминием аномально пересыщенные твердые растворы:
- сплавы, легированные практически нерастворимыми в алюминии железом, никелем, кобальтом;
- высоколегированные сплавы алюминия с легкоплавкими, практически нерастворимыми в алюминии компонентами – оловом, свинцом, кадмием. Метод гранулирования дает возможность получить в таких сплавах диспергированную гетерогенную структуру с равномерными включениями легирующих компонентов, что важно для подшипниковых материалов;
- термически упрочняемые сплавы на основе систем Al–Zn–Mg–Cu и Al–Cu–Mg с повышенным содержанием переходных металлов. На сплавах этого типа можно получить наиболее высокие значения прочности при хорошей коррозионной стойкости.

### 7.2.3. Термическая обработка алюминиевых сплавов

Равновесные структуры промышленных алюминиевых сплавов представляют собой твердый раствор с небольшим содержанием легирующих элементов с включениями интерметаллидных фаз:  $Al_2Cu$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Mg_2Si$  и др. При такой структуре сплавы зачастую имеют низкую прочность и очень высокую пластичность.

Самой неустойчивой при комнатной температуре структурой, способной к фазовым превращениям в твердом состоянии (в термически упрочняемых сплавах) является пересыщенный твердый раствор легирующих компонентов в алюминии, концентрация которых может в десятки раз превышать равновесную. При такой структуре алюминиевые сплавы также достаточно пластичны, но значительно прочнее, чем в равновесном состоянии.

Для достижения максимальной прочности у термически упрочненных алюминиевых сплавов необходимо получить некоторую промежуточную структуру, которая соответствует начальным стадиям распада перенасыщенного твердого раствора легирующих элементов в алюминии. Формирование требуемых механических и технологических свойств осуществляется путем термической обработки, основными видами которой являются отжиг, закалка и старение (рис. 78).

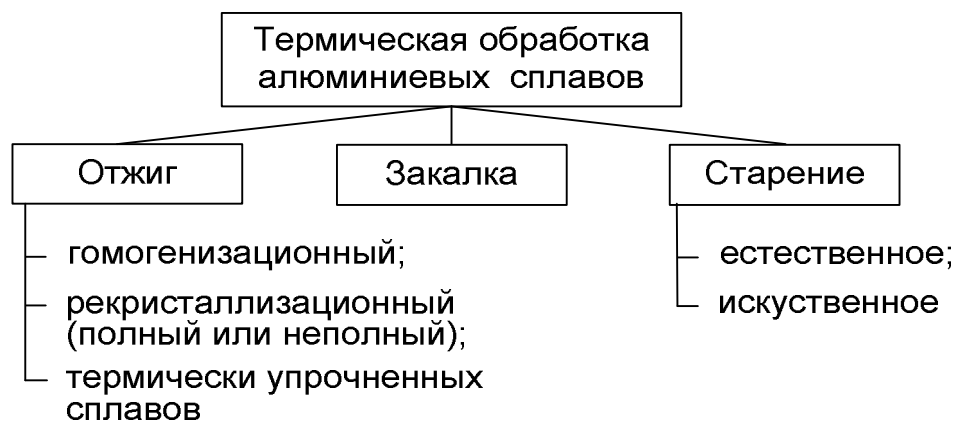


Рис. 78. Виды термической обработки алюминиевых сплавов

Необходимость отжига алюминиевых сплавов появляется тогда, когда возникающая по каким-либо причинам неравновесная структура вызывает появление нежелательных свойств, чаще всего пониженной пластичности. Наиболее распространены три вида неравновесных состояний:

- неравновесное состояние, характерное для литых сплавов, когда скорости охлаждения при литье значительно превышают скорости охлаждения, необходимые для формирования равновесных структур. Это приводит к выделению по границам зерен хрупкой интерметаллидной сетки, которая понижает пластичность литых сплавов и вызывает трудности их деформации;
- неравновесное состояние, вызванное пластической деформацией;
- неравновесное состояние, являющееся результатом предыдущей термической обработки. Основной причиной такого состояния является наличие в сплаве пересыщенного твердого раствора на основе алюминия.

Все отмеченные неравновесные состояния могут быть устранены отжигом, при котором повышается пластичность. Другие свойства при этом изменяются по-разному (в зависимости от исходного состояния сплава). Процессы, происходящие при отжиге литого, деформированного и предварительно термически обработанного сплава различны. Поэтому возникает необходимость выбора определенных видов и режимов отжига.

**Гомогенизационный отжиг** широко применяется для деформируемых алюминиевых сплавов. Он является первым видом термической обработки в технологическом процессе производства листов, профилей, штамповок и т. д. В результате отжига структура становится более однородной, повышается пластичность, что позволяет значительно интенсифицировать последующую обработку давлением и уменьшить технологические отходы.

Рассмотрим сущность гомогенизационного отжига на примере сплава I (Al + 4% Cu). Как видно из рис. 79, в равновесном состоянии сплав состоит из твердого раствора  $\alpha$  и вторичных кристаллов  $(Al_2Cu)_{II}$ . В результате быстрого охлаждения и неравновесной кристаллизации по границам дендритных ячеек выделяется неравновесная эвтектика состоящая из достаточно грубых включений  $Al_2Cu$ .

Если нагреть сплав до температуры гомогенизации  $t_{гом}$  и выдержать при этой температуре, то эвтектические включения  $Al_2Cu$  растворятся в  $\alpha$  и концентрация меди по объему твердого раствора станет более равномерной и сплав приобретет однофазную гомогенную структуру. Следовательно, при выборе температуры гомогенизации следует руководствоваться тем, что она должны быть выше температуры полного растворения легирующих компонентов в алюминии, т. е. выше  $t_1$  и ниже температуры равновесного солидуса  $t_{сол}$ . Кроме того, следует учитывать наличие в слитке неравновесной эвтектики с температурой плавления  $t_{эвт}$ . Если слиток быстро нагреть до температуры выше  $t_{эвт}$ , то эвтектика расплавится и медь из нее продиффундирует в твердый раствор. Однако, как правило, температура гомогенизации выбирается ниже  $t_{эвт}$ . Вообще при любой термической обработке не следует допускать нагрев до появления жидкой фазы, поскольку это сопровождается межзеренным окислением и образованием пористости, что приводит к резкому снижению прочности и пластичности сплавов.

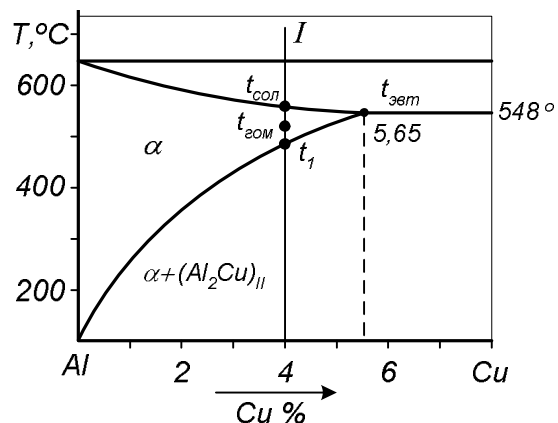


Рис. 79. Виды термической обработки алюминиевых сплавов

Температура нагрева при гомогенизационном отжиге для большинства промышленных сплавов находится в пределах 450...540 °С, а выдержка составляет 4...40 часов. Выдержка должна обеспечить полное растворение неравновесных эвтектических включений и должна быть тем длительнее, чем грубее включения.

Скорость охлаждения при гомогенизации обычно не регламентируется. Слитки охлаждаются вместе с печью или на воздухе. При таком охлаждении растворенные легирующие компоненты вновь выделяются из твердого раствора в виде вторичных кристаллов интерметаллидов. Однако эти кристаллы меньше имевшихся до гомогенизации эвтектических включений и распределены более равномерно. В связи с этим пластичность сплава остается высокой.

**Рекристаллизационный отжиг** часто используется как промежуточная операция между различными этапами холодной деформации или между горячей и холодной деформациями для устранения неравновесности структуры. Иногда этот отжиг используется в качестве окончательной термообработки деформированных заготовок для получения изделий умеренной прочности, но высокой пластичности.

При нагреве деформированных металлов и сплавов до определенной температуры в них начинается процесс образования и роста новых зерен с совершенной кристаллической структурой. Все свойства деформированного металла в результате рекристаллизации меняются в направлении, обратном тому, в каком они менялись при холодной деформации: прочность и твердость уменьшаются, а пластичность растет.

При рекристаллизационном отжиге деформированный сплав нагревается до температуры выше температуры окончания первичной рекристаллизации на 50...150 °С и для промышленных сплавов колеблется в интервале 300...500 °С, с выдержкой при этой температуре 0,5...2,0 ч.

**Дорекристаллизационный отжиг (неполный)** применяется как окончательная операция в тех случаях, когда сплав изделия должен сочетать прочность и пластичность. В этом случае нагрев осуществляется до температуры меньшей, чем температура рекристаллизации, что составляет 200...350 °С. В результате сплав приобретает полигонизационную структуру и упрочнение от холодной деформации полностью не снимается, так как после больших деформаций полигонизация является, как правило, начальной стадией рекристаллизации.

Скорость охлаждения при рекристаллизационном отжиге для сплавов не упрочняемых термической обработкой не играет особой роли и может выбираться произвольно. Для термически упрочняемых сплавов скорость охлаждения должна быть не выше 30 °С/ч до температуры 200...250 °С, а далее может быть произвольной.

**Отжиг термически упрочненных сплавов** с целью разупрочнения используется только в тех случаях, когда изделие упрочненное закалкой и старением требуется разупрочнить, то есть обеспечить полный распад перенасыщенного твердого раствора и получение структуры, близкой к равновесной.

Температура отжига в этом случае должна удовлетворять основному требованию: диффузионные процессы при этой температуре должны проходить интенсивно, чтобы перенасыщенный твердый раствор распался полностью за непродолжительное время (1...2 ч). Для промышленных сплавов эта температура составляет 350...400 °С. Скорость охлаждения не должна превышать 30 °С/ч.

**Закалка.** Целью закалки является формирование неравновесной структуры пересыщенного твердого раствора с максимальным содержанием легирующих элементов. Она основана на переменной растворимости легирующих элементов и применяется для сплавов, претерпевающих фазовые превращения в твердом состоянии.

Для алюминиевых сплавов закалка возможна только для тех из них, у которых содержатся компоненты с растворимостью возрастающей при повышении температуры. К таким компонентам относятся медь, кремний, магний, цинк. Если в сплавы входят только те компоненты, растворимость которых в алюминии отсутствует, то их закалка невозможна.

При закалке алюминиевые сплавы нагреваются до температур, при которых легирующие элементы растворяются в алюминии полностью или частично. После выдержки необходимо быстрое охлаждение до температуры 10...20 °С. В результате этого, структура, соответствующая температуре нагрева, сохраняется до комнатной, так как распад твердого раствора происходить не успевает. Содержание легирующих элементов в твердом растворе после закалки превышает их предельную концентрацию при комнатной температуре. Например, если сплав Al + 4% Cu нагреть до температуры  $t_{\text{гом}}$  (см. рис. 79), выдержать до полного растворения  $\text{Al}_2\text{Cu}$  в алюминии и охладить в воде до комнатной температуры, то твердый раствор, содержащий 4% Cu, будет сохранен при комнатной температуре. Так как растворимость меди в алюминии при комнатной температуре составляет около 0,2 %, то твердый раствор в закаленном сплаве будет пересыщен в 28 раз, что ведет к повышению прочности и возможности его дальнейшего упрочнения. Таким образом, температура нагрева под закалку должна обеспечить возможно более полное растворение интерметаллидных фаз в алюминии. Если содержание легирующих элементов в сплаве не превышает их предельной растворимости при эвтектической температуре  $t_{\text{эвт}}$ , например, 5,65 % Cu в сплавах Al–Cu (рис. 79), то компоненты могут практически полностью раствориться при температуре нагрева под закалку (несколько выше  $t_1$ ). Если содержание легирующих элементов превышает предельную раствори-

мость (например, в сплаве, содержащем 8 % Cu), то полное растворение интерметаллидных фаз невозможно. В этом случае температура нагрева под закалку должна быть на 5...15 °С ниже линии солидуса, при которой эвтектика переходит в жидкое состояние.

Выдержка при температуре нагрева под закалку зависит от величины частиц интерметаллидных фаз и их распределении в объеме изделия. Так в деформированных сплавах последние находятся в основном в виде мелких кристаллов, а в литых – в виде грубых эвтектических включений. Поэтому для деформируемых сплавов выдержка составляет десятки минут, а для литейных – часы или десятки часов.

Охлаждение изделия при закалке необходимо производить с такой скоростью, чтобы не произошел распад твердого раствора. Такая скорость называется критической  $V_{кр}$  – это наименьшая скорость, при которой распад твердого раствора в процессе охлаждения еще не происходит.

**Старение** относится к заключительной операции термической обработки и представляет собой выдержку закаленного сплава при относительно низких температурах для распада пересыщенного твердого раствора или для обеспечения структурных изменений, являющихся подготовительными к такому распаду. Старение сплавов при комнатной температуре называется естественным, а при повышенной (100...200 °С) – искусственным.

Сильная пересыщенность твердых растворов в закаленных алюминиевых сплавах, вызывает в них повышенную свободную энергию. Распад твердого раствора ведет структуру сплава к равновесной и уменьшению свободной энергии системы. Следовательно, распад твердого раствора в закаленном сплаве является произвольно идущим процессом.

При распаде пересыщенного твердого раствора различаются три стадии – зонная, фазовая и коагуляционная.

Зонная стадия характерна тем, что в объеме кристалла перенасыщенного твердого раствора создается химическая неоднородность, т. е. образуются субмикроскопические зоны с повышенным содержанием легирующего элемента. Эти зоны называются зонами Гинье-Престона (Г.П.) по имени исследователей, впервые открывших их в дюралюминах (сплавы Al-Cu). Например, если в твердом растворе содержится 4 % меди, а в химическом соединении  $Al_2Cu$  (которое должно выделиться из твердого раствора) – 52 %, то концентрация меди в зонах Г.П. является промежуточной и возрастает по мере развития процесса. В зависимости от соотношения размеров атомов алюминия и легирующих элементов зоны могут иметь форму дисков или сфер. По мере развития зонной фазы различаются зоны Г.П.1 и Г.П.2. Первые имеют меньшие размеры с хаотичным расположением атомов легирующего компонента. У зон Г.П.2 размеры значительно больше и взаимное расположение атомов алюминия и легирующего элемента упорядоченное.

На фазовой стадии из твердого раствора происходит выделение промежуточной фазы, которая по составу соответствует интерметаллидному соединению со своей кристаллической решеткой когерентно связанной с решеткой твердого раствора. Эта стадия является началом распада последнего, в результате которого происходит образование стабильной фазы интерметаллида с нарушением когерентности его решетки с решеткой твердого раствора.

При дальнейшем повышении температуры старения развивается коагуляционная стадия, при которой образуется некогерентная интерметаллидная фаза, укрупняющаяся по мере развития процесса.

Изменения структур алюминиевых сплавов при распаде перенасыщенных твердых растворов напрямую влияют на физико-механические и эксплуатационные свойства. На рис. 80 приведена типичная зависимость изменения прочности закаленных алюминиевых сплавов от температуры нагрева при старении.

Рост прочности связан с первыми стадиями процесса распада перенасыщенных твердых растворов: образованием зон Г.П.1 и Г.П.2, выделением промежуточных метастабильных фаз интерметаллидов. Последующие стадии: нарушение когерентности выделений метастабильных фаз, образование и коагуляция стабильных фаз, что вызывает снижение прочности сплавов.

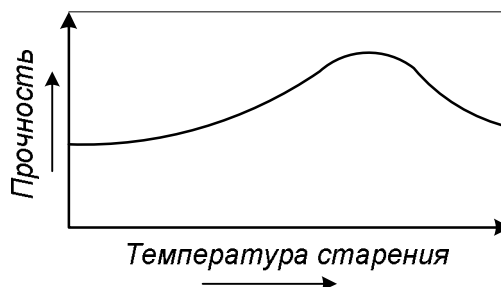


Рис. 80. Зависимость прочности закаленных алюминиевых сплавов от температуры старения (время старения постоянно)

Температура старения алюминиевых сплавов выбирается экспериментально. Обычно она соответствует или образованию в перенасыщенных твердых растворах зон Г.П., или выделению когерентных метастабильных фаз. Температура старения для получения максимальной прочности различных сплавов колеблется от 20 °С (комнатная) до 200 °С.

В тех случаях, когда закаленный и состаренный сплав, обладающий недостаточной пластичностью, необходимо подвергнуть холодной деформации (вытяжке, гибке, отбортовке и др.), его перезакачивают и сразу после закалки осуществляют необходимую деформацию. Аналогичный результат можно получить и обработкой, которая называется «возврат при старении». Она заключается в быстром нагреве, кратковременной выдержке (30...120 с) при температуре 230...270 °С и последующим быстрым охлаждением (в воде).

После такой обработки практически гомогенный твердый раствор и свойства сплава соответствуют свежезакаленному состоянию.

#### 7.2.4. Применение алюминиевых сплавов

В промышленно развитых странах до 20 % всего произведенного алюминия расходуется на нужды электротехники. Высокая электропроводность предопределяет его широкое использование для массивных проводников электрического тока (линии передач, оболочки высоковольтных кабелей, шины распределительных устройств и т. д.), то есть там, где наиболее ощутимы его преимущества перед другими материалами.

Широко используются алюминиевые сплавы в строительстве: гофрированные потолки, перила, оконные проемы, интерьеры.

Доминирующими конструкционными материалами являются алюминиевые сплавы в авиации и космической технологии.

Все более широкое применение алюминиевые сплавы находят в судостроении, так как имеют существенное преимущество перед сталями: алюминиевые корпуса не обрастают ракушками, что снижает обтекаемость корабля и снижает скорость его движения.

Из алюминиевых сплавов изготавливается обшивка и внутренний набор автобусов, троллейбусов, железнодорожных вагонов; железнодорожные и автоцистерны для перевозки некоторых агрессивных химических веществ, нефти и продуктов ее переработки, продуктов питания. Алюминиевые сплавы являются прекрасным конструкционным материалом в производстве двигателей внутреннего сгорания. Широко используются в промышленных и бытовых холодильниках, в аппаратах по переработке продуктов питания и т. д. Пожалуй, трудно назвать область промышленности, где не использовался бы алюминий и сплавы на его основе.

### 7.3. Медные сплавы

#### 7.3.1. Классификация и обозначение медных сплавов

В настоящее время считается, что бронзовому веку предшествовал период, когда оружие и инструменты человек делал из меди. В то же время из употребления не исчезли еще кремниевые орудия, поэтому его называют каменно-медным веком.

Трудно установить точно, когда именно люди начали добывать и обрабатывать металлы. Можно лишь предположить, какие из металлов первыми нашли применение. Очевидно, это были металлы, которые в природе встречаются в виде самородков. К таким наиболее распространенным металлам относятся медь и золото. Скорее всего, золото и было первым металлом, который люди начали использовать. Однако из-за низких механических свойств изготавливать орудия труда или оружие было нецелесообразно. Поэтому, очевидно, первые мелкие изделия, такие как наконечники для стрел и копий, выковывали из найденных само-

родков меди. Было обнаружено, что при холодной ковке медь не только принимает нужную форму, но и становится тверже. Затем люди открыли, что упрочненный ковкой металл можно снова сделать мягким, нагрев его на огне. В дальнейшем люди научились плавить медь и отливать ее в определенные формы.

Однако медь при всех своих достоинствах имела существенный недостаток – медные орудия труда и инструменты быстро затуплялись. Даже в холодноупрочненном состоянии свойства меди были не настолько высоки, чтобы заменить изделия из камня.

Решающую роль в этом направлении сыграли сплавы меди с другими элементами (бронзы). Основными преимуществами сплавов по сравнению с медью были их лучшие литейные свойства, значительно выше твердость и прочность, более сильное упрочнение при холодной деформации.

Наиболее распространенными легирующими элементами в меди являются цинк, алюминий, олово, железо, кремний, марганец, бериллий, никель, которые существенно повышают ее прочностные свойства. На рис. 81 показано влияние некоторых легирующих элементов на предел прочности меди ( $\sigma_B$ , МПа). Легирующие элементы, повышая прочность, практически не снижают, а некоторые из них (алюминий, цинк, олово) даже повышают пластичность.

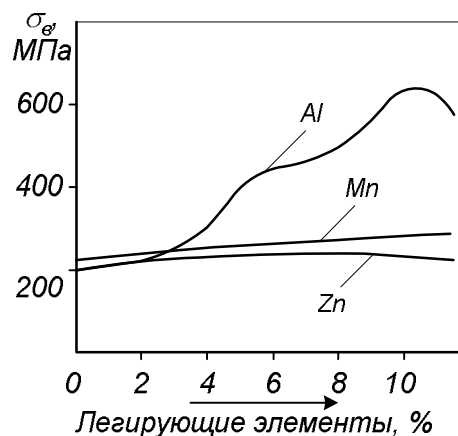


Рис. 81. Влияние легирующих элементов на механические свойства меди

Медные сплавы, как и сплавы на основе алюминия, подразделяются на деформируемые и литейные, термически неупрочняемые. Однако наиболее часто медные сплавы делят на латуни и бронзы (рис. 82).

Латунями называются сплавы на основе меди, в которых главным легирующим элементом является цинк. Бронзы – все сплавы меди (кроме латуней) с легирующими элементами.

**Обозначение медных сплавов.** Медные сплавы маркируются по химическому составу. Для этого используются буквы (табл. 13), обозначающие легирующие элементы и числа, показывающие количество элементов в массовых процентах (мас. %).

Двойные латуни (не содержащие кроме меди и цинка других элементов) обозначаются буквой Л, за которой ставится число, показывающее среднее содержание меди. Например, латунь Л63 содержит 63 % меди и 37 % (остальное) цинка. В специальных латунях (многокомпонентных) после буквы Л ставятся символы легирующих элементов, а затем числа соответствующие содержанию меди и каждого элемента. Например,

ЛК 80-3 содержит 80 % меди, 3 % кремния и 17 % (остальное) цинк. В марках литейных латуней за буквой Л указывается содержание цинка, а количество легирующего элемента проставляется непосредственно за символом, его обозначающим. Например, ЛЦ 23А6ЖЗМц2 – литейная латунь, в составе которой находятся 23 % цинка, 6 % алюминия, 3 % железа, 2 % марганца и 66 % меди (остальное).



Рис. 82. Классификация медных сплавов

Таблица 13

### Обозначения легирующих элементов медных сплавов

| Легирующий элемент | Обозначение элемента | Легирующий элемент | Обозначение элемента |
|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Алюминий           | А                    | Олово              | О                    |
| Бериллий           | Б                    | Свинец             | С                    |
| Железо             | Ж                    | Серебро            | Ср                   |
| Кремний            | К                    | Сурьма             | Су                   |
| Магний             | Мг                   | Фосфор             | Ф                    |
| Марганец           | Мц                   | Цинк               | Ц                    |
| Мышьяк             | Мш                   | Цирконий           | Цр                   |
| Никель             | Н                    | Хром               | Х                    |

Бронзы маркируются буквами Бр, за которыми располагаются буквы легирующих элементов и далее их среднее количество в процентах. Например, бронза Бр ОЦС 4-4-2,5 содержит 4 % олова, 4 % цинка, 2,5 % свинца и 89,5 % (остальное) меди. В литейных бронзах содержание легирующих элементов проставляется сразу за символом, обозначающим этот элемент. Например, Бр ОЗЦ12С5 – литейная бронза, содержащая 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца и 80 % меди.

В некоторых источниках для обозначения литейных латуней и бронз, предназначенных для фасонного литья, к марке добавляется буква Л. Например, ЛАЖ60-1-1Л, ЛМц58-2Л, Бр АЖН 10-4-4Л и др.

### 7.3.2. Латунь

Латуни из сплавов на основе меди наиболее широко используются в технических устройствах. Медь с цинком образует твердый раствор с предельной концентрацией 39 % ( $\alpha$ -фаза). При увеличении содержания цинка в структуре образуется  $\beta$ -фаза, представляющая собой электронное соединение CuZn. В соответствии с изменением структуры меняются и механические свойства латуней (рис. 83). В  $\alpha$ -латунях увеличение содержания цинка ведет к повышению прочности и пластичности. При появлении  $\beta$ -фазы пластичность резко уменьшается, хотя прочность продолжает увеличиваться. При переходе структуры только в  $\beta$ -фазу происходит и резкое снижение прочности. При температуре 454...468 °С наступает упорядочение  $\beta$ -фазы ( $\beta'$ -фаза), которое сопровождается существенным повышением твердости и хрупкости.

Практическое применение находят латуни с содержанием цинка не более 45...47 %. Следовательно, по структуре практически используемые латуни делятся на две основных группы:  $\alpha$ -латуни с содержанием цинка до 39 % и ( $\alpha+\beta'$ )-латуни с содержанием цинка 39...45 %.

В табл. 14 приведен химический состав и механические свойства некоторых деформируемых латуней после отжига.

Латуни со структурой  $\alpha$ -фазы пластичны, имеют хорошую технологичность, легко обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях.

Стабильная при высоких температурах  $\beta$ -фаза очень пластична, но при температурах ниже 468 °С, когда появляется  $\beta'$ -фаза, очень хрупка. Поэтому латуни с содержанием цинка около 50 % и более в промышленности практически не применяются.

Деформация латуней в холодном состоянии существенно повышает их прочность, но одновременно резко снижает пластичность. Наклеп нагартованного сплава снимается отжигом при температуре выше 400 °С.

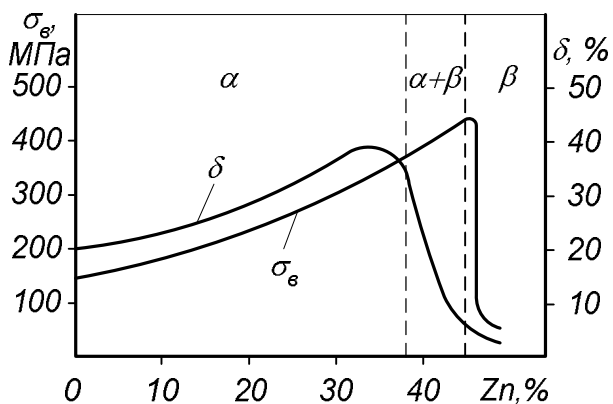


Рис. 83. Влияние цинка на механические свойства латуней

**Химический состав и механические свойства  
деформируемых латуней (ГОСТ 15527-70)**

| Марка латуни | Содержание элементов, % |                                                      | Механические свойства |               |        |                            |     |
|--------------|-------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|---------------|--------|----------------------------|-----|
|              | Cu                      | Прочие                                               | $\sigma_B$ , МПа      | $\delta$<br>% | $\psi$ | KCU,<br>МДж/м <sup>2</sup> | НВ  |
| Л 90         | 88–91                   | –                                                    | 260                   | 45            | 80     | 1,76                       | 53  |
| Л 68         | 67–70                   | –                                                    | 320                   | 55            | 70     | 1,68                       | 55  |
| Л 63         | 62–65                   | –                                                    | 330                   | 50            | 66     | 1,37                       | 56  |
| Л 60         | 59–62                   | –                                                    | 380                   | 25            | 62     | 0,78                       | 77  |
| ЛЖ Мц 59-1-1 | 57–60                   | 0,1–0,4 Al<br>0,6–1,2 Fe<br>0,5–0,8 Mn<br>0,3–0,7 Sn | 450                   | 50            | 58     | 0,18                       | 88  |
| ЛМц 58-2     | 57–60                   | 1–2 Mn                                               | 400                   | 40            | 52     | 1,12                       | 85  |
| ЛК 80-3      | 57–60                   | 2,5–4 Si                                             | 380                   | 58            | 55     | 0,40                       | 100 |

Отрицательным свойством латуней является их самопроизвольное растрескивание во влажной среде. Для устранения такого недостатка деформированные латуни достаточно отжечь при температуре 270...300 °С.

Для повышения свойств латуни дополнительно легируются алюминием, марганцем, железом, никелем, оловом, свинцом, кремнием и другими элементами, которые вводятся в небольших количествах. Комплексное легирование специальных латуней дает возможность увеличить механические свойства, коррозионную и кавитационную стойкость. При этом сохраняется хорошая обрабатываемость давлением.

Временное сопротивление разрыву латуней наиболее эффективно повышают алюминий, олово и марганец. Эти же элементы повышают и коррозионную стойкость латуней. Железо в меди практически нерастворимо и в латунях находится в свободном состоянии в виде частиц, которые увеличивают число центров кристаллизации, а также тормозят рост зерен, чем способствуют их измельчению. Никель уменьшает склонность латуней к коррозионному растрескиванию.

Основной вид термической обработки латуней – отжиг, который проводится для смягчения сплавов перед обработкой давлением, получения в заготовках необходимых свойств, а также для устранения склонности к сезонному растрескиванию. В промышленных условиях отжиг осуществляется при температуре 600...700 °С.

Кроме деформируемых широкое использование находят литейные латуни. Некоторые из них приведены в табл. 15.

**Механические свойства литейных латуней (ГОСТ 17711-93)**

| Марка латуни | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ        |
|--------------|------------------|--------------|-----------|
| ЛЦ 40С       | 215              | 12...20      | 70...80   |
| ЛЦ 40МцЗЖ    | 390...490        | 10...18      | 90...100  |
| ЛЦ 38Мц2С2   | 240...340        | 10...15      | 80...85   |
| ЛЦ 30А3      | 290...390        | 12...15      | 80...90   |
| ЛЦ 16К4      | 290...340        | 12...17      | 100...110 |
| ЛЦ 14КЗСЗ    | 245...290        | 7...15       | 90...100  |

Эта группа имеет ряд существенных недостатков: при плавке теряет большое количество цинка из-за его летучести; при кристаллизации образуются крупные усадочные раковины; латуни с большим количеством  $\beta$ -фазы склонны к сезонному растрескиванию, что требует последующего отжига отливок и др.

Однако, литейные латуни обладают хорошей жидкотекучестью; мало склонны к ликвационным явлениям и газонасыщению; обладают высокими механическими свойствами, в том числе и антифрикционными. В литейных латунях допускается больше примесей, чем в деформируемых, так как при фасонном литье нет необходимости обеспечивать высокую деформируемость.

**7.3.3. Бронзы**

Бронзами называются сплавы с оловом, алюминием, кремнием, свинцом, другими компонентами и в соответствии с основным легирующим элементом относятся к группе оловянных, алюминиевых, бериллиевых и др.

**Оловянные бронзы.** Структура оловянных литых бронз, содержащих менее 8 % олова представляет собой  $\alpha$ -раствор переменной концентрации. Из-за существенной дендритной ликвации зерна в центре обеднены, а на стыке дендритных ветвей обогащены оловом. При содержании олова в бронзах более 8 % структура состоит из первичных кристаллитов  $\alpha$ -раствора переменной концентрации и эвтектоида  $\alpha + \delta$ , где  $\delta$  – промежуточная фаза, относящаяся к соединениям электронного типа ( $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ).

На рис. 84 показано влияние олова на механические свойства литых бронз. При содержании олова более 8 % начинает резко снижаться пластичность по причине появления в структуре  $\delta$ -фазы. Временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$  повышается с увеличением содержания олова до 24 %, а затем резко снижается. Из-за появления слишком большого количества  $\delta$ -фазы сплав становится хрупким.

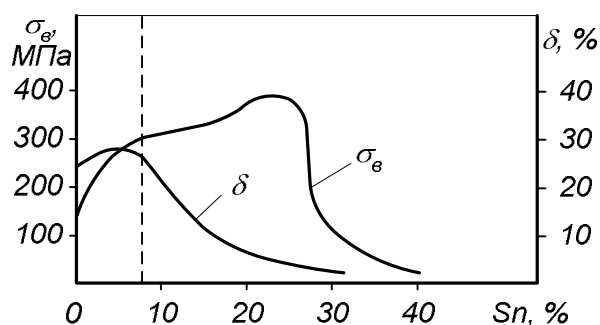


Рис. 84. Зависимость механических свойств литых оловянных бронз от содержания в них олова

Оловянные бронзы отличаются невысокой жидкотекучестью, в них не образуются концентрированные усадочные раковины, обладают незначительной линейной усадкой. Отмеченные свойства дают возможность получения отливок сложной конфигурации с резкими переходами от толстых сечений к тонким. Включения твердого эвтектоида обеспечивают высокую износостой-

кость, что выводит их в группу отличных антифрикционных материалов. Для повышения пластичности бронзы необходимо гомогенизировать при температуре 700...750 °С с последующим быстрым охлаждением.

По коррозионной стойкости в морской воде оловянные бронзы превосходят медь и медноцинковые сплавы.

В оловянные бронзы часто вводится в небольших количествах фосфор с целью раскисления меди, повышения временного сопротивления разрыву и упругости, улучшения жидкотекучести, увеличения сопротивления износу.

Часто оловянные бронзы легируют цинком в значительных количествах, но не превышая его предела растворимости в  $\alpha$ -фазе. В таких количествах цинк повышает жидкотекучесть сплавов, способствует получению более плотного литья, улучшает прочностные свойства. Кроме того, он является неплохим раскислителем.

Никель, вводимый в состав бронз, повышает их коррозионную стойкость, улучшает пластичность и деформируемость, увеличивает плотность, уменьшает ликвации, способствует возрастанию прочности при комнатной и повышенной температурах.

Деформируемые бронзы по сравнению с литейными обладают более высокой прочностью, вязкостью, пластичностью, сопротивлением к усталости (табл. 16). Из цветных сплавов оловянные деформируемые бронзы уступают по усталостным характеристикам лишь бериллиевым бронзам. Основными легирующими элементами в деформируемых бронзах являются олово, фосфор, цинк и свинец, причем олова в них меньше, чем в литейных бронзах.

**Алюминиевые бронзы** получили широкое применение лишь в начале прошлого века. В настоящее время они постепенно вытесняют оловянные бронзы, так как не уступают последним по многим параметрам, а по ряду свойств даже превосходят их. По распространенности в промышленности (в том числе и на железнодорожном транспорте) алюминиевые бронзы занимают одно из первых мест среди медных сплавов.

**Химический состав и механические свойства оловянных бронз**

| Марка бронзы                        | Состав, % |           |           |             | Свойства         |              |    |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------------|--------------|----|
|                                     | Sn        | Pb        | Zn        | Прочие      | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | HB |
| Литейные бронзы (ГОСТ 613-79)       |           |           |           |             |                  |              |    |
| Бр ОЗЦ7С5Н1                         | 2,5...4   | 3...6     | 6...9,5   | 0,5...2 Ni  | 210              | 5            | 60 |
| Бр ОЗЦ12С5                          | 2...3,5   | 3,6       | 8...15    | —           | 210              | 5            | 60 |
| Бр О4Ц4С17                          | 3,5...5,5 | 14...20   | 2...6     | —           | 150              | 6            | 60 |
| Бр О5Ц5С5                           | 4...6     | 4...6     | 4...6     | —           | 180              | 4            | 60 |
| Бр О10Ц2                            | 9...11    | —         | 1...3     | —           | 250              | 5            | 80 |
| Бр О10Ф1                            | 9...11    | —         | —         | 0,4...1,1 Р | 270              | 3...10       | 90 |
| Деформируемые бронзы (ГОСТ 5017-74) |           |           |           |             |                  |              |    |
| Бр ОФ 6,5-0,15                      | 6...7     | —         | —         | 0,1...0,25Р | 400              | 65           | 70 |
| Бр ОФ 6,5-0,4                       | 6...7     | —         | —         | 0,26...0,4Р | 400              | 65           | 80 |
| Бр ОФ 4-0,25                        | 3,5...4   | —         | —         | 0,2...0,3Р  | 340              | 50           | 63 |
| Бр ОЦ 4-3                           | 3,5...4   | —         | 2,7...3,3 | —           | 350              | 40           | 60 |
| Бр ОЦС 4-4-2,5                      | 3...5     | 1,5...3,5 | 3...5     | —           | 350              | 40           | 60 |

В меди растворяется значительное количество алюминия: 7,4 % при  $t=1035^\circ\text{C}$  и около 9 % при комнатной. В сплавах с содержанием алюминия более 7,4 % при температуре ниже  $1035^\circ\text{C}$  из  $\alpha$ -фазы выделяется  $\beta$ -фаза, которая основана на соединении  $\text{Cu}_3\text{Al}$  электронного типа. При  $t=565^\circ\text{C}$   $\beta$ -фаза претерпевает эвтектоидный распад  $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$ .

С увеличением содержания алюминия прочностные свойства бронз повышаются (рис. 85). Сплавы, имеющие  $\alpha$ -структуру, хорошо обрабатываются давлением при высоких и низких температурах. Однако прочность  $\alpha$ -фазы низкая. С другой стороны  $\gamma_2$ -фаза обладает очень высокой твердостью, но ничтожной пластичностью. Поэтому при появлении в структуре  $\gamma_2$ -фазы прочность резко возрастает, а пластичность начинает уменьшаться. Наиболее рациональными механическими свойствами обладают бронзы, содержащие 5...8 % алюминия. Такие сплавы наряду с повышенной прочностью сохраняют высокую пластичность.

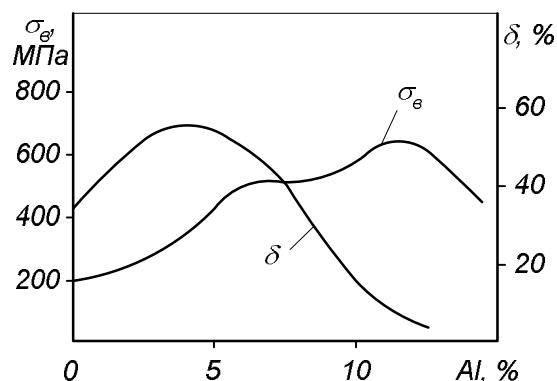


Рис. 85. Зависимость свойств алюминиевых бронз от содержания в них алюминия

Алюминиевые бронзы по сравнению с оловянными обладают целым рядом преимуществ: менее склонны к дендритной ликвации, имеют лучшую жидкотекучесть и большую плотность отливок, более высокопрочны и жаростойки, устойчивы против коррозии и кавитации, меньше склонны к хладноломкости, не дают искр при ударах.

В то же время эти сплавы при кристаллизации дают значительную усадку и формируют крупные столбчатые кристаллы, сильно окисляются в расплавленном состоянии, вспениваются при заливке в формы, затруднена пайка твердыми и мягкими припоями.

Для устранения перечисленных недостатков алюминиевые бронзы дополнительно легируются железом, марганцем, никелем, свинцом.

Железо повышает прочностные свойства при некотором снижении пластичности, замедляет эвтектоидный распад  $\beta$ -фазы, тем самым препятствуя развитию хрупкости. Даже в случаях, когда распад и происходит, вредные последствия проявляются в меньшей степени, так как железо сильно измельчает  $\gamma_2$ -кристаллы и зерна  $\alpha$ -фазы.

Сплавы, легированные алюминием и железом, наиболее пластичны после нормализации при  $t = 600 \dots 700$  °С. После закалки с температуры 950 °С сплавы также обладают высокой пластичностью. После старения при  $t = 250 \dots 300$  °С  $\beta$ -фаза распадается с образованием тонкодисперсной смеси, что повышает твердость и прочность, но понижает пластичность.

Марганец растворяется в алюминиевых бронзах в больших количествах (до 10 %). Он повышает прочность, пластичность, коррозионную стойкость, способность к холодной деформации.

Никель улучшает механические свойства алюминиевых бронз, их коррозионную стойкость и жаропрочность. Сплавы, содержащие алюминий и никель хорошо обрабатываются давлением, имеют высокие антифрикционные свойства, хладнотойки.

Свинец, не растворяясь в меди и бронзах, выделяется в виде почти чистых включений, которые уменьшают временное сопротивление разрыву, но существенно повышают антифрикционные свойства. Такие сплавы нельзя подвергать горячей обработке давлением.

В табл. 17 приведены механические свойства некоторых алюминиевых бронз. Одни из них используются только как литейные, другие – как деформируемые. Большую группу составляют бронзы, которые используются как в качестве литейных, так и в качестве деформируемых (например, Бр АМц 9-2).

Деформируемые и литейные бронзы одной марки различаются по содержанию примесей – в литейных сплавах их допускается большее количество.

## Свойства алюминиевых бронз

| Марка бронзы     | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ, МПа |
|------------------|------------------|--------------|---------|
| Бр А7Ж1,5С1,5    | 300              | 18           | 150     |
| Бр А11Ж6Н6       | 600              | 2            | 250     |
| Бр А9Ж4          | 400              | 10           | 100     |
| Бр А10Мц2        | 500              | 12           | 110     |
| Бр А5            | 380              | 65           | 60      |
| Бр АМц 9-2       | 420              | 25           | 80      |
| Бр АЖ 9-4        | 550              | 40           | 110     |
| Бр АЖМц 10-3-1,5 | 600              | 20           | 130     |
| Бр АЖН 10-4-4    | 650              | 35           | 150     |

Алюминиевые бронзы подвергаются различной термической обработке. Деформируемые полуфабрикаты проходят дорекристаллизационный или рекристаллизационный отжиг, который повышает их упругие свойства. Однако большинство алюминиевых бронз относится к термически неупрочняемым сплавам.

**Бериллиевые бронзы** содержат в среднем 2...2,5 % бериллия и отличаются хорошим сочетанием высоких прочностных и упругих характеристик, электро- и теплопроводности, сопротивления усталости и коррозионной стойкости. Бериллий с медью имеет переменную растворимость (от 2,75 % при  $t = 870^\circ\text{C}$  до 0,2 % при  $t = 300^\circ\text{C}$ ), что дает возможность упрочняющей термической обработки бериллиевых бронз.

На рис. 86 приведена зависимость свойств бериллиевых бронз от содержания в них бериллия после закалки с температуры  $780^\circ\text{C}$  и старения при  $t = 300^\circ\text{C}$  в течение трех часов. Прочность бронз в термически упрочненном состоянии начинает сильно возрастать при содержании бериллия 1,5 %. Наиболее рациональными свойствами обладают сплавы при содержании Be около 2 %. При дальнейшем увеличении бериллия прочность повышается незначительно, а пластичность резко падает.

Бериллиевые бронзы являются теплостойкими сплавами, устойчиво работающими при температурах до  $310...340^\circ\text{C}$ . При  $500^\circ\text{C}$  они имеют такое же временное сопротивление, как оловянно-фосфористые и алюминиевые бронзы при комнатной температуре. Бериллиевые бронзы имеют высокую теплопроводность, при ударах не образуют искр, хорошо обрабатываются резанием, свариваются электроконтактной сваркой.

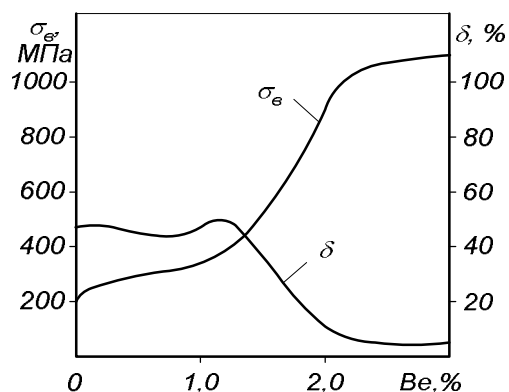


Рис. 86. Влияние бериллия на механические свойства бронз

Для повышения свойств бериллиевые бронзы дополнительно легируются никелем и титаном. Никель с бериллием образует малорастворимый интерметаллид  $\text{NiBe}$  и уменьшает растворимость бериллия в меди. Он замедляет фазовые превращения в бронзах и существенно облегчает их термическую обработку. Никель задерживает рекристаллизационные процессы в сплавах, способствует получению более мелкого зерна, повышает жаропрочность. Титан образует соединения  $\text{TiBe}_2$  и  $\text{Cu}_3\text{Ti}$ , чем обеспечивается дополнительное упрочнение бронз.

Бериллиевые бронзы имеют высокую сопротивляемость малым пластическим деформациям из-за сильного торможения дислокаций дисперсными частицами. Это приводит к увеличению релаксационной стойкости сплавов.

Бериллиевые бронзы, дополнительно легированные никелем и титаном обладают высоким временным сопротивлением разрыву, пределами текучести и усталости, пружинящими свойствами, большей твердостью, отличной износостойкостью. Такие сплавы не склонны к хладноломкости и могут работать в интервале температур от  $-200$  до  $250\text{ }^\circ\text{C}$ .

Отмеченные свойства обусловили использование бериллиевых бронз для изготовления изделий ответственного назначения, где требуется необходимое сочетание ряда уникальных свойств. Широкому применению бериллиевых бронз препятствуют дефицитность и высокая стоимость бериллия, а также его токсичность.

**Кремнистые бронзы.** Кремний имеет значительную растворимость в меди: от 5,3 % при температуре  $842\text{ }^\circ\text{C}$  до 3,9 % при  $t = 356\text{ }^\circ\text{C}$ . Так как  $\gamma$ -фаза сильно уменьшает ковкость сплавов, кремния в бронзы вводится не более 3 %. При повышении содержания кремния до 3,5 % существенно повышаются временное сопротивление разрыву и относительное удлинение (рис. 87). Высокая пластичность бронз сохраняется до сравнительно низких температур. Однако простые кремнистые бронзы (двойные) практического использования не находят. Они дополнительно легируются никелем и марганцем для повышения механических антикоррозионных свойств.

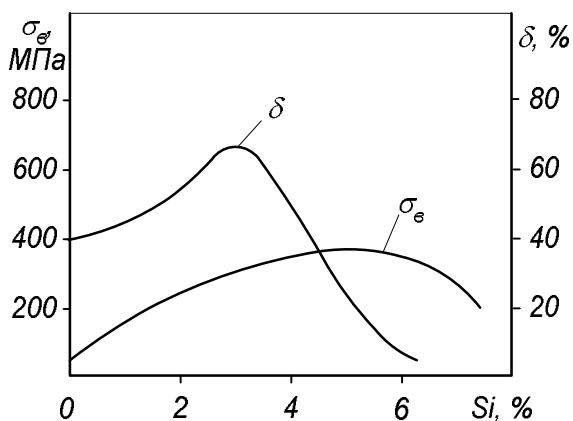


Рис. 87. Влияние кремния на механические свойства литых кремнистых бронз

При введении в сплавы, содержащие кремния до 3 %, небольшого количества марганца (менее 1,5 %) упрочнение происходит за счет его растворения. При повышении количества марганца появляется фаза  $\text{Mn}_2\text{Si}$ .

При легировании сплавов никелем образуется соединение  $\text{Ni}_2\text{Si}$ , растворимость которого резко уменьшается с понижением температуры.

Кремнистые бронзы обладают высокими антифрикционными и пружинящими свойствами, значительной коррозионной стойкостью, отлично обрабатываются горячим и холодным давлением, хорошо свариваются с бронзой и сталью, легко паяются мягкими и твердыми припоями, не дают искр при ударе, имеют высокую жидкотекучесть.

Существенным недостатком кремнистых бронз является большая склонность к поглощению газов.

**Марганцевые бронзы.** Марганец в твердой меди растворяется в больших количествах, а с  $\gamma$ -фазой имеет неограниченную растворимость. Бронзы с содержанием марганца до 22 % имеют однофазную структуру во всем интервале температур, поэтому хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях.

Марганец существенно повышает прочность меди при сохранении высокой пластичности, коррозионную стойкость, жаропрочность.

На основе системы медь–марганец разработаны сплавы высокого демпфирования с большим внутренним трением. Такие бронзы обладают способностью гасить колебания, возникающие в процессе эксплуатации машин и механизмов, что способствует уменьшению вибраций, шума, снижению опасности разрушений изделий из-за резонансных явлений.

Сплавы высокого демпфирования содержат марганца от 60 до 85 %. Наилучшие демпфирующие свойства у них проявляются после закалки из  $\gamma$ -области и старения при температуре 450 °С. При этом одновременно повышается прочность и сохраняется достаточно высокая пластичность.

**Свинцовые бронзы** обладают высокими антифрикционными свойствами, поэтому используются в основном для изготовления подшипников скольжения. О свойствах таких сплавов будет изложено в разделе, посвященном антифрикционным материалам.

#### 7.3.4. Медно-никелевые сплавы

К медно-никелевым сплавам относятся сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом является никель, что значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, электрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы условно можно разделить на две группы: конструкционные и электротехнические.

К конструкционным относятся коррозионно-стойкие и высокопрочные сплавы типа мельхиор, нейзильбер и куниаль. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляются Mn, Zn, Fe, Co, Al, Pb, Cr, Se, Mg, Li.

В табл. 18 приведен состав и механические свойства конструкционных медно-никелевых сплавов.

Таблица 18

**Химический состав конструкционных и механические свойства медно-никелевых сплавов (ГОСТ 492-73)**

| Марка сплава | Содержание, % (остальные Cu) |         |       |         |                   | $\sigma_B$ | $\sigma_T$ | $\sigma$ | $\psi$ | HB      |
|--------------|------------------------------|---------|-------|---------|-------------------|------------|------------|----------|--------|---------|
|              | Fe                           | Mn      | Zn    | Al      | Другие            | МПа        |            | %        |        |         |
| МНЖМц 30-1-1 | 0,5–1                        | 0,5–1   | –     | –       | 29-33 (Ni+Co)     | 343–441    | –          | 25–40    | 50     | 59–69   |
| МНЖ 5-1      | 1–1,4                        | 0,3–0,8 | –     | –       | 5-6,5 (Ni+Co)     | 390–490    | –          | 5–10     | –      | –       |
| МН 19        | –                            | –       | –     | –       | 18-20 (Ni+Co)     | 490–784    | 392–588    | 3–5      | –      | 118     |
| МНЦ 15-20    | –                            | –       | 18–22 | –       | 13,5-16,5 (Ni+Co) | 588–784    | –          | 2–4      | 32     | 157–172 |
| МНА 13-3     | –                            | –       | –     | 2,3–3   | 12-15 (Ni+Co)     | 882–931    | –          | 2–5      | –      | 255     |
| МНА 6-1,5    | –                            | –       | –     | 1,2–1,8 | 5,5-6,5 (Ni+Co)   | 637–735    | –          | 4–7      | 50     | 206     |
| МН 95-5      | –                            | –       | –     | –       | 4,4-5 (Ni+Co)     | 441–490    | 343–392    | 2–6      | –      | –       |

Мельхиоры (МНЖМц 30-1-1, МН 19) имеют высокую коррозионную стойкость в различных средах. Добавки железа и марганца увеличивают стойкость медно-никелевых сплавов против ударной коррозии. Мельхиоры хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях.

Сплавы на основе меди, в которых основными легирующими элементами являются никель и цинк, называются нейзильберами (МНЦ 15-20, МНЦС 16-29-1,8). Они представляют собой твердые растворы на основе меди. Легирование цинком приводит к повышению механических свойств, приданию им красивого серебристого цвета и удешевлению. Нейзильберы отличаются высокой коррозионной стойкостью, обрабатываются в горячем и холодном состояниях (за исключением свинцового нейзильбера). Для улучшения обрабатываемости резанием в них вводится небольшое количество свинца.

Сплавы на основе Cu–Ni–Al называются куниалями (МНА 13-3, МНА 6-1,5). Они отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью при низких температурах, хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии.

К конструкционным медно-никелевым сплавам относятся сплавы МН 95-5, МНЖ 5-1, имеющие высокие механические свойства и коррозионную стойкость. Они не склонны к коррозионному растрескиванию.

### 7.3.5. Применение меди и ее сплавов

Области применения меди определяют ее высокая электро- и теплопроводность, пластичность и коррозионная стойкость. Медь используется для изготовления химической аппаратуры (теплообменники, холодильники, детали плазмотронов и т. д.), проводов высоковольтных линий электропередач, троллейных проводов, коллекторных шин электромашин, печей для дуговой плавки активных металлов, водоохлаждаемых изложниц, кристаллизаторов и т.п. Более 30 % меди применяется в виде медных сплавов – латуней и бронз.

Высокотехнологичные латуни используются для получения изделий, требующих глубокой вытяжки, таких как радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, гибкие шланги, трубы, ленты. Многокомпонентные латуни, обладающие достаточно высокой прочностью и коррозионной стойкостью, применяются в судостроении, электромашиностроении, теплотехнике.

Из бронз наиболее широкое распространение имеют алюминиевые бронзы. Они используются в морском судостроении, общем машиностроении, в локомотиво- и вагоностроении, авто- и авиастроении для изготовления ответственных деталей: шестерен, втулок, седел клапанов, гаек нажимных винтов, пружин и пружинящих изделий.

Оловянные бронзы с фосфором, имеющие высокие антифрикционные и антикоррозионные свойства, находят применение в машиностроении для изготовления подпятников тяжелых кранов, гаек ходовых винтов, шестерен, червячных колес и других деталей, работающих при большом трении. Некоторые сплавы используются для деталей водяной, паровой и газовой арматуры. Группа бронз, легированных фосфором, с высокими упругими свойствами идет для изготовления круглых и плоских пружин.

Бериллиевая бронза используется для наиболее ответственных изделий – плоских пружин, мембран, деталей точного приборостроения, пружинящих элементов электронных приборов, электродов сварочных машин. Поскольку бериллиевые бронзы не образуют искр при ударах, они применяются для изготовления инструмента для работы во взрывоопасных зонах.

### 7.4. Сплавы на основе магния

Магниевые сплавы образуются в результате легирования магния алюминием, цирконием, цинком, марганцем, литием, редкоземельными и другими элементами.

Одним из главных достоинств магневых сплавов является их высокая удельная прочность. Кроме того, они хорошо обрабатываются резанием, легко шлифуются и полируются, удовлетворительно свариваются электроконтактной и дуговой сваркой.

К недостаткам магниевых сплавов относятся низкая коррозионная стойкость, плохие литейные свойства, склонность к газонасыщению, значительная окисляемость и воспламенение при получении.

По способу производства полуфабрикатов магниевые сплавы разделяются на деформируемые и литейные, которые маркируются соответственно буквами МА и МЛ (см. табл. 19).

Таблица 19

### Химический состав и механические свойства магниевых сплавов

| Марка сплава                         | Содержимое элементов, %.<br>(остальное Mg) |            |           |                                            | $\sigma_B$ | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ | $\psi$ | HB |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------------|------------|----------------|----------|--------|----|
| Деформируемые сплавы (ГОСТ 14957-76) |                                            |            |           |                                            |            |                |          |        |    |
|                                      | <i>Al</i>                                  | <i>Mn</i>  | <i>Zn</i> | <i>Другие</i>                              | <i>МПа</i> |                | <i>%</i> |        |    |
| МА 5                                 | 7,8...9,2                                  | 0,15...0,5 | 0,2...0,8 | —                                          | 320        | 220            | 14       | —      | 55 |
| МА 11                                | —                                          | 1,5...2,5  | —         | 2,5...4 Nd;<br>0,1...0,25 Ni               | 280        | 140            | 10       | —      | 50 |
| МА 14                                | —                                          | —          | 5...6     | 0,3...0,9 Zr                               | 350        | 300            | 9        | —      | 60 |
| МА 19                                | —                                          | —          | 5,5...7,0 | 1,4...2 Nd;<br>0,5...1,0 Zr;<br>0,2...1 Cd | 380        | 330            | 5        | —      | 80 |
| МА 21                                | 4...6                                      | 0,1...0,5  | 0,8...2,0 | 7,0...10,0 Li;<br>3,0...5,0 Cd             | 240        | 200            | 18,5     | —      | 75 |
| Литейные сплавы (ГОСТ 2856-79)       |                                            |            |           |                                            |            |                |          |        |    |
| МЛ 5                                 | 7,5...9                                    | 0,15...0,5 | 0,2...0,8 | —                                          | 255        | 120            | 6        | 15     | 25 |
| МЛ 8                                 | —                                          | —          | 5,5...6,6 | 0,7...1,1 Zr;<br>0,2...0,8 Cd              | 255        | 155            | 5        | 13     | 26 |
| МЛ 12                                | —                                          | —          | 4...5     | 0,6...1,1 Zr                               | 270        | 160            | 6        | 12     | —  |
| МЛ 9                                 | —                                          | —          | —         | 0,4...1,0 Zr;<br>1,9...2,6 Nd              | 200        | 95             | 8        | —      | —  |
| МЛ 10                                | —                                          | —          | 0,1...0,7 | 0,4...1,0 Zr;<br>2,2...2,8 Nd              | 200        | 95             | 6        | —      | 26 |
| МЛ 15                                | —                                          | —          | 4...5     | 0,7...1,1 Zr;<br>0,6...1,2 La              | 380        | 150            | 4        | 5      | 28 |
| МЛ 19                                | —                                          | —          | 0,1...0,6 | 0,4...1,0 Zr;<br>1,6...2,3 Nd              | 260        | 170            | 2        | —      | 28 |

По плотности различаются сплавы легкие и сверхлегкие. К сверхлегким относятся сплавы, легированные литием (МА 18, МА 21), а к легким – все остальные.

По возможным температурам эксплуатации магниевые сплавы подразделяются на следующие группы:

- общего назначения (для работы при обычных температурах);
- жаропрочные (для длительной эксплуатации при температурах до 200°C);

– высокожаропрочные (для длительной эксплуатации при температурах 250...300°C);

– для эксплуатации при криогенных температурах.

Кроме того, можно выделить еще две группы – термически упрочняемые и термически неупрочняемые.

Из деформируемых сплавов наиболее широко в промышленности и на транспорте находят сплавы Mg–Al–Zn–Mn, Mg–Zn–Zr и Mg–Mn.

Сплавы Mg–Al–Zn–Mn содержат 3...9,2 % Al, 0,2...1,5 % Zn и 0,15...0,7 % Mn. Алюминий и цинк имеют хорошую растворимость в магнии, чем обеспечивают большой эффект упрочнения.

При понижении температуры растворимость уменьшается, что дает возможность упрочнения сплавов закалкой и старением за счет выделения фаз  $Mg_4Al_3$  и  $Mg_3Zn_3Al_2$ .

Сплавы систем Mg–Al–Zn–Mn склонны к коррозии под напряжением тем сильнее, чем больше содержат алюминия. Цинк не влияет на коррозионную стойкость магниевых сплавов, а марганец ее повышает. В то же время марганец оказывает благоприятное действие, взаимодействуя с вредными примесями, в частности с железом.

Вторая группа сплавов (систем Mg–Zn–Zr) отличается высокими механическими свойствами, обусловленными упрочняющим действием Zn и модифицирующим действием циркония. При введении циркония образуются тугоплавкие соединения  $Zr_2Fe_3$  и  $ZrFe$ , которые оседают на дно расплава, очищая его от вредной примеси – железа. Кроме того, цирконий, связывая водород, препятствует развитию пористости. Оставшийся в растворе цирконий обеспечивает увеличение центров кристаллизации.

Цирконий повышает прочность, пластичность и коррозионную стойкость магниевых сплавов. Однако его введение связано со значительными трудностями из-за малой растворимости.

Сплавы систем Mg–Zn–Zr дополнительно легируются кадмием и редкоземельными элементами, что повышает пластичность и их прочностные свойства, особенно при повышенных температурах.

Сплавы, в которых основным легирующим элементом является марганец (систем Mg–Mn) отличаются повышенной коррозионной стойкостью и свариваемостью. Повышение коррозионной стойкости обеспечивается образованием соединения марганца с железом, которые, имея большую плотность, оседают на дно тигля и очищают расплав от железа.

Для улучшения свойств сплавов Mg–Mn дополнительно вводится церий, который, за счет образования соединения  $Mg_9Ce$ , существенно измельчает зерно. Такие сплавы отличаются высокой технологической пластичностью и коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью. Термической обработкой сплав не упрочняется, и полуфабрикаты поставляются в основном в отожженном состоянии.

Кроме отмеченных групп в промышленности используются магниевые сплавы, в которых главными легирующими элементами являются редкоземельные металлы (МА11, МА12). В этих сплавах основным легирующим элементом является неодим, обеспечивающий высокую жаропрочность.

Литейные магниевые сплавы по химическому составу в большинстве близки к деформируемым. Их преимуществом является существенная экономия при производстве изделий, так как достигаются хорошая чистота поверхности и высокая точность, что почти исключает их дальнейшую обработку резанием. Однако механические свойства литых сплавов ниже деформируемых по причине образования грубозернистой литой структуры. Улучшение механических свойств достигается гомогенизацией отливок, модифицированием, применением особо чистых шихтовых материалов при получении сплавов.

Малая плотность магниевых сплавов, а в отдельных случаях большая удельная прочность дают возможность уменьшить массу агрегатов. Из них изготавливаются колеса и вилки шасси, различные рычаги, корпуса приборов, насосы, коробки передач, двери кабин, детали планеров самолетов. Они успешно используются в конструкциях вертолетов, в ракетной технике, в конструкциях автомобилей (особенно гоночных), в приборостроении. Магниевые сплавы считаются перспективными для широкого применения в горной, текстильной и других отраслях промышленности.

## **7.5. Сплавы на основе титана**

Титан относится к полиморфным металлам и имеет две аллотропические модификации  $\alpha$  и  $\beta$ . Температура полиморфного превращения  $\alpha \leftrightarrow \beta$  составляет 882°C.

Титан обладает малой плотностью, хорошей коррозионной стойкостью, высокими механическими свойствами, жаропрочностью. В атмосферных условиях на поверхности титана образуется плотная и прочная пленка  $\text{TiO}_2$ , которая обуславливает высокое сопротивление коррозии более чем в 130 агрессивных средах, в том числе в морской воде.

Технический титан ВТ 1-00 и ВТ 1-0 (ГОСТ 19807-91) используется для изготовления прессованных и катаных полуфабрикатов: листов, труб, проволоки и др. Он хорошо сваривается всеми видами сварки, но плохо обрабатывается резанием.

Существенно повысить свойства технического титана позволяет легирование его различными металлами: алюминием, хромом, марганцем, железом, оловом, молибденом, ванадием. Обозначаются титановые сплавы буквами ВТ, за которыми следует номер сплава (ВТ 5, ВТ 6, ВТ 14, ВТ 3-1 и др.).

Легирующие элементы образуют с титаном твердые растворы замещения и вместе с примесями изменяют температуру полиморфного превращения  $\alpha \leftrightarrow \beta$ . Те из элементов, которые повышают температуру  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения, называются  $\alpha$ -стабилизаторами (алюминий, кислород, азот). Те, которые понижают (молибден, ванадий, ниобий, хром, марганец, железо) –  $\beta$ -стабилизаторами, так как способствуют стабилизации  $\beta$ -твердого раствора.

Кроме  $\alpha$ - и  $\beta$ -стабилизаторов имеются нейтральные упрочнители (олово, цирконий, гафний), которые не оказывают существенного влияния на аллотропические превращения.

В промышленности применяются титановые сплавы (табл. 20) либо со структурой  $\alpha$ -твердого раствора, либо со смешанной структурой  $(\alpha+\beta)$ -твердые растворы.

Таблица 20

**Химический состав (ГОСТ 19807-91), структура  
и механические свойства некоторых сплавов титана**

| Сплав  | Содержание элементов<br>(остальное Ti), % |           |           |                               | Структура                 | $\sigma_B$  | $\sigma_{0.2}$ | $\delta$ , % |
|--------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-------------------------------|---------------------------|-------------|----------------|--------------|
|        | Al                                        | V         | Mo        | Другие                        |                           | МПа         |                |              |
| BT 5   | 4,5...6,2                                 | 1,2       | 0,9       | 0,3 Zr                        | $\alpha$ -сплавы          | 700...950   | 680...850      | 10...15      |
| BT 5-1 | 4,3...6,1                                 | 1         | —         | 2...3 Sn                      | $\alpha$ -сплавы          | 750...950   | 650...850      | 10...15      |
| OT 4-1 | 1,5...2,5                                 | —         | —         | 0,7...2 Mn                    | Псевдо- $\alpha$ -сплавы  | 600...750   | 470...650      | 20...40      |
| OT 4   | 3,5...5                                   | —         | —         | 0,8...2 Mn                    | Псевдо- $\alpha$ -сплавы  | 700...900   | 550...650      | 12...20      |
| BT 20  | 5,5...7                                   | 0,8...2,5 | 0,5...2   | 1,5...2,5 Zr                  | Псевдо- $\alpha$ -сплавы  | 950...1150  | 850...1000     | 8...10       |
| BT 6   | 5,3...6,8                                 | 3,5...5,3 | —         | —                             | ( $\alpha+\beta$ )-сплавы | 1100...1150 | 1000...1050    | 14...16      |
| BT 14  | 3,5...6,3                                 | 0,9...1,9 | 2,5...3,8 | 0,3 Zr                        | ( $\alpha+\beta$ )-сплавы | 1150...1400 | 1080...1300    | 6...10       |
| BT 16  | 1,6...3,8                                 | 4...5     | 4,5...5,5 | —                             | ( $\alpha+\beta$ )-сплавы | 1250...1450 | 1100...1200    | 4...6        |
| BT 22  | 4,4...5,7                                 | 4...5,5   | 4...5,5   | 0,8...1,2 Cr;<br>0,8...1,2 Fe | ( $\alpha+\beta$ )-сплавы | 1100...1250 | 1050...1100    | 9...11       |

Титановые сплавы с  $\alpha$ -структурой до температуры 650°C сохраняют достаточно высокую прочность и до 1090°C коррозионную стойкость в атмосфере, загрязненной газами. Хорошо свариваются, не охрупчива-

ются после термической обработки. Однако пластичность при изгибе хуже, чем у  $\beta$ -сплавов. Недостатками также являются невозможность получения высокопрочных сплавов и невосприимчивость к закалке и старению.

Сплавы с  $\beta$ -структурой имеют очень хорошую пластичность, сохраняют достаточно высокую прочность до 540°C, упрочняются термической обработкой. Но с другой стороны очень чувствительны к загрязнению атмосферными газами при температурах выше 700°C, часто охрупчиваются при старении.

Титановые  $\alpha+\beta$ -сплавы пластичны; легко куются, штампуются и прокатываются; упрочняются термической обработкой. Существенным недостатком является высокая чувствительность к режимам термической обработки, что при недостаточном их контроле ведет к охрупчиванию.

Благодаря сочетанию ряда ценных свойств титан и его сплавы находят применение во многих областях современной техники. Титановые сплавы широко используются в авиационной и ракетной промышленности. На многих предприятиях цветной металлургии из титана изготавливаются компрессоры и насосы для перекачки агрессивных сред, трубопроводы, запорная арматура, автоклавы, различные емкости, фильтры и т. д. Высокая коррозионная стойкость в морской воде дает возможность использования титана и его сплавов в судостроении для изготовления гребных винтов, обшивки морских судов, подводных лодок, торпед и др. Перспективны титановые сплавы в криогенной технике.

## **7.6. Сплавы на основе никеля**

Характерными свойствами никеля являются его относительно большая температура плавления, достаточно высокая прочность и пластичность, значительная химическая стойкость, ферромагнитность. Он широко используется в современной технике как электротехнический и конструкционный материал. Но наиболее часто никель является основой широкого диапазона жаропрочных сплавов.

Никель образует непрерывные ряды твердых растворов с медью, кобальтом, железом и марганцем. При высоких температурах в больших концентрациях (35...40 %) растворяются многие тугоплавкие металлы – хром, вольфрам, молибден, ванадий, тантал. Значительной растворимостью в никеле (2,5...20 %) обладают алюминий, титан, ниобий, бериллий, кремний. При понижении температуры растворимость элементов, образующих с никелем ограниченные твердые растворы, уменьшается. Это дает предпосылки для дисперсионного твердения сплавов. Твердые растворы на основе никеля часто называются аустенитом и обозначаются  $\gamma$  по аналогии с твердыми растворами на основе  $\text{Fe}_\gamma$ .

Промышленные никелевые сплавы разделяются на жаростойкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие и специальные (с особыми физическими свойствами). Жаропрочные сплавы в свою очередь делятся на деформируемые, литейные, дисперсно-упрочненные.

Маркируются никелевые сплавы условными обозначениями, не имеющими отношения к их химическому составу (например, ЭН 4376, ЭП 742), или используется система обозначений, сходная с системой обозначений для сталей. В последнем случае обозначение начинается с буквы Х, затем проставляется буква Н и число, указывающее среднее содержание никеля. Далее следуют буквы, обозначающие остальные легирующие элементы в порядке уменьшения их содержания. Например, сплав ХН70МВТЮБ (другое его обозначение ЭН 598) содержит, %: 70 Ni; 5 Mo; 3 W; 2,4 Ti; 1,3 Al; 0,9 Nb; остальное (17 %) хром. В некоторых марках после буквы Х указывается содержание хрома (например, Х10Н90).

Никель и никелевые сплавы широко используются в промышленности. Никель применяется в основном как коррозионно-стойкий материал для производства химического, пищевого, медицинского оборудования, в приборостроении, в электровакуумной технике.

Особый приоритет отдается жаростойким никелевым сплавам. Из них изготавливаются камеры сгорания и другие узлы авиационных двигателей, арматура и приспособления для нагревательных печей, рабочие лопатки и диски турбин и т. д.

Жаропрочные никелевые сплавы относятся к перспективным материалам производства ряда узлов турбин промышленных наземных установок, а также двигателей наземного транспорта.

## 7.7. Антифрикционные материалы

Антифрикционные (от анти ... и лат. *friktio* трение) материалы – материалы для деталей, работающих в условиях трения, главным образом скольжения (подшипники, втулки, направляющие, вкладыши подшипников). Они должны обладать низким коэффициентом трения, хорошей прирабатываемостью, малой склонностью к схватыванию, способностью обеспечивать равномерную смазку трущихся поверхностей. Из большого разнообразия антифрикционных материалов, можно выделить следующие основные группы:

- сплавы на основе олова, свинца (баббиты), меди (бронзы и латуни), железа (чугуны), цинка, алюминия;
- спеченные материалы (бронзографит, железографит);
- пластмассы (текстолит, фторопласт, древеснослоистые пластики и др.);
- сложные композиционные материалы типа металл-пластмасса (пористая бронза, поры которой заполнены фторопластом и др.);

- минералы естественные (агат) и искусственные (рубин, корунд);
- стеклокерамические материалы (ситаллы) – для изготовления камневых опор в прецизионных приборах (часы, гироскопы, тахометры и др.).

Структура антифрикционных материалов имеет, как правило, две составляющие: твердую и мягкую (рис. 88). По мере приработки вала к вкладышу подшипника мягкая структура последнего вырабатывается и, тем самым, образуются микроканалы, по которым циркулирует смазка.

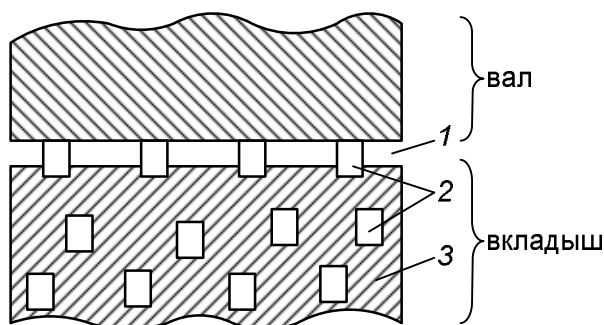


Рис. 88. Схема подшипника скольжения: 1 – пространство для смазки; 2 – твердые включения; 3 – мягкая основа

Вал опирается на выступающие твердые включения вкладыша, которые должны быть менее твердыми, чем самая мягкая структурная составляющая вала. В противном случае твердые включения вкладыша подшипника будут инициировать быстрый износ вала. Мягкая основа вкладыша хорошо поглощает также случайно попавшие в подшипник твердые частицы.

На железнодорожном транспорте в качестве антифрикционных материалов наиболее широко используются баббиты, бронзы, латуни. Характеристики некоторых из них приведены в табл. 21.

Таблица 21

### Характеристики антифрикционных материалов

| Материал                | НВ   | Коэффициент трения по стали |               | Допустимый режим работы |        |                          |
|-------------------------|------|-----------------------------|---------------|-------------------------|--------|--------------------------|
|                         |      | без смазки                  | со смазкой    | P, МПа                  | V, м/с | P <sub>V</sub> , МПа·м/с |
| Баббиты:                |      |                             |               |                         |        |                          |
| Б 83                    | 300  | 0,07...0,12                 | 0,004...0,006 | 15                      | 50     | 75                       |
| Б 16                    | 300  |                             |               | 10                      | 30     | 3                        |
| Б К2                    | 320  |                             |               | 15                      | 15     | 6                        |
| Бронзы:                 |      |                             |               |                         |        |                          |
| Бр О10Ф1                | 1000 | 0,1...0,2                   | 0,004...0,009 | 15                      | 10     | 15                       |
| Бр О5Ц5С5               | 600  |                             |               | 8                       | 3      | 12                       |
| Бр С30                  | 250  |                             |               | 25                      | 12     | 30                       |
| Латуни:                 |      |                             |               |                         |        |                          |
| ЛЦ16К4                  | 1000 | 0,15...0,24                 | 0,009...0,016 | 12                      | 2      | 10                       |
| ЛЦ38Мц2С2               | 800  |                             |               | 10,6                    | 1      | 10                       |
| Алюминиевый сплав АО9-2 | 310  | 0,1...0,15                  | 0,008         | 25                      | 20     | 100                      |

**Баббиты** – это мягкие антифрикционные сплавы на основе олова или свинца. Обозначаются они буквой Б и цифрой, указывающей на содержание олова в процентах. Например, Б 83, Б 16, Б 6 означает, что эти сплавы содержат 83,16 и 6 % олова соответственно. Если за буквой Б стоят другие буквы, то это означает, что в составе баббитов находятся другие элементы (БТ – баббиты с теллуром, БН – с никелем, БК – свинцово кальциевые и др.). Как видно из отмеченного, обозначение носит условный характер, не показывая полностью состав сплава. Так баббит Б 83 содержит 83 % олова, 11 % сурьмы и 6 % меди.

Для получения антифрикционного сплава на основе олова, в его состав вводятся элементы, упрочняющие олово за счет образования твердых включений. Для этой цели в олово добавляются сурьма и медь. Сурьма, растворяясь в олове, формирует твердый раствор  $\alpha$ , который имеет большую твердость и прочность, чем олово, но с сохранением пластичности последнего. Это мягкая фаза баббита (на рис. 89 она имеет темный фон). Твердые включения сплава представляют химические соединения  $SbSn$  и  $Cu_3Sn$ . Кроме того, медь, препятствуя ликвации легких кристалликов  $SbSn$ , обеспечивает равномерное распределение твердой фазы в мягкой матрице.

В связи с тем, что олово является дорогим и дефицитным элементом, оловянистые баббиты используются только в особо ответственных конструкциях. Для подшипников более широкого применения в баббиты в значительных количествах вводится свинец, а содержание олова понижается до 6...10 %. Для упрочнения свинца и формирования твердых частиц в состав баббита вводятся сурьма и медь.

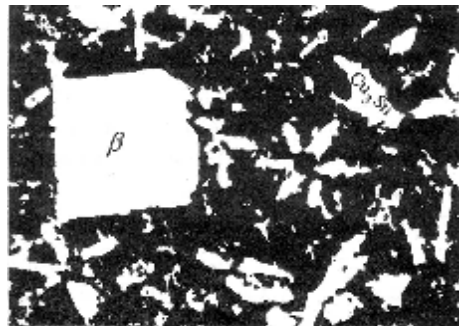


Рис. 89. Микроструктура баббита Б83.  $\times 400$

Мягкой основой свинцовистых баббитов является эвтектика, образуемая свинцом и сурьмой. Твердыми фазами являются тройной твердый раствор свинца и олова в сурьме  $Sb(Pb, Sn)$ , а также химическое соединение  $Cu_3Sn$ .

Вводимые в некоторые баббиты никель (марка БН) и теллур (марка БТ) улучшают форму твердых включений и измельчают структуру.

Бронзы используются для изготовления подшипниковых узлов, работающих при повышенных удельных давлениях и больших скоростях. К лучшим антифрикционным сплавам относятся оловянистые и оловянисто-цинково-свинцовистые бронзы Бр О10Ф1, Бр О10Ц2, Бр О5Ц5С5, Бр О6Ц6С3. Их используют при изготовлении подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров.

Широкое использование в промышленности находят безоловянные бронзы (ГОСТ 493-79), которые имеют высокую прочность, хорошие антифрикционные свойства, коррозионностойкие. Некоторые из сплавов по свойствам не уступают, а иногда и превосходят оловянные бронзы. В тяжело нагруженных трущихся деталях применяются высокопрочные алюминиевые бронзы. В качестве антифрикционных используются так называемые кремнистые и марганцовистые латуни, а также алюминиево-железные латуни.

В последние годы бронзы широко используются в качестве компонентов порошковых антифрикционных материалов или тонкостенных пористых покрытий, пропитываемых твердыми смазочными материалами.

Сплавы на основе алюминия (ГОСТ 14113-78). Эти сплавы обладают достаточным сопротивлением усталости, коррозионной стойкостью в маслах, хорошими антифрикционными свойствами. Такие свойства наметили тенденцию к замене ими антифрикционных сплавов на свинцовой и оловянной основах, а также свинцовистой бронзе.

Алюминиевые сплавы подразделяются преимущественно по структурному признаку, что отражает их антифрикционные свойства. К группе I относятся сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих ( $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{AlSb}$ , Si и др.) в пластичной основе металла. В сплавах группы II наряду с твердыми составляющими имеются мягкие включения.

В табл. 22 приведены сплавы некоторых применяемых антифрикционных сплавов на алюминиевой основе.

Таблица 22

#### Химический состав алюминиевых антифрикционных сплавов

| Марка сплава     | Состав, % |           |           |      |      |      |            |
|------------------|-----------|-----------|-----------|------|------|------|------------|
|                  | Ni        | Mg        | Sb        | Cu   | Si   | Sn   | Ti         |
| Сплавы I группы  |           |           |           |      |      |      |            |
| АН-2,5           | 2,7...3,3 | —         | 3,5       | —    | —    | —    | —          |
| АСМ              | —         | 0,3...0,7 | 3,5...6,5 | —    | —    | —    | —          |
| Сплавы II группы |           |           |           |      |      |      |            |
| АО 9-1           | —         | —         | —         | 1,0  | —    | 9,0  | —          |
| АО 3-1           | 0,4       | —         | —         | 1,0  | 1,85 | 3,0  | —          |
| АО 9-2           | 1,0       | —         | —         | 2,25 | 0,5  | 9,0  | —          |
| АО 9-2Б          | —         | —         | —         | 1,75 | —    | 9,0  | 0,02...0,1 |
| АО 20-1          | —         | —         | —         | 1,0  | —    | 20,0 | 0,02...0,1 |
| Остальное Al     |           |           |           |      |      |      |            |

В последние годы в России получил распространение алюминиевый сплав ДО10С2, содержащий, масс. %: 10 Sn; 2Pb; 0,3Zn; 1,5Cu; 1,5Si. Этот сплав обладает повышенной усталостной прочностью и задиростойкостью.

Сплавы на основе цинка. Эти сплавы обладают низкой температурой плавления (около 400 °С). Поэтому они больше, чем бронзы и алюминиевые сплавы размягчаются при нагреве, благодаря чему легче прирабатываются и меньше изнашивают сопряженные поверхности. В табл. 23 приведены химический состав и механические свойства стандартных цинковых сплавов (ГОСТ 21437-91).

Таблица 23

**Состав и свойства стандартных литых цинковых сплавов**

| Марка сплава | Содержание элементов, %<br>(остальное Zn) |           |             | Механические свойства<br>(не менее) |              |     |
|--------------|-------------------------------------------|-----------|-------------|-------------------------------------|--------------|-----|
|              | Al                                        | Cu        | Mg          | $\sigma_B$ , МПа                    | $\sigma$ , % | НВ  |
| ЦАМ 9-1,5    | 9,0...11,0                                | 1,0...2,0 | 0,03...0,06 | 250                                 | 1,0          | 95  |
| ЦАМ 10-5     | 9,0...12,0                                | 4,0...3,5 | 0,03...0,06 | 250                                 | 0,4          | 100 |

Цинковые сплавы являются весьма технологичными при изготовлении как монометаллических, так и биметаллических трущихся деталей. Содержание цинкового сплава со сталью легко осуществляется литьем и совместной прокаткой, чем с помощью слоя жидкого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Латуни по антифрикционным свойствам значительно уступают бронзам и чаще всего используются в качестве заменителей последних. Латуни марок ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и др. применяются при малых скоростях скольжения и невысоких давлениях, например, для опор трения приборов.

Антифрикционные материалы на основе полимеров наиболее часто используются для работы с жидкостями, не обладающими смазочными свойствами и в условиях без смазки. Для повышения антифрикционных свойств, износостойкости в состав полимеров вводятся различные наполнители. Часто полимеры используются в виде составной части антифрикционных материалов, заполняющей их поры.

Антифрикционные самосмазывающиеся пластмассы (АСП). Преимуществами применения подшипников из АСП вместо традиционных является упрощение конструкций подшипниковых узлов, снижение трудоемкости при изготовлении и эксплуатации, уменьшения размеров и массы, экономии смазочных материалов.

По составу АСП можно разделить на несколько групп:

– композиции, которые содержат в полимере антифрикционные добавки – наполнители со слоистой анизотропной структурой (графит, дисульфит молибдена, нитрид бора и др.), антифрикционные полимеры (полиэтилен, фторопласт-4 и др.), жидкие или пластичные смазочные материалы (типа маслянистых);

– композиции с комплексными наполнителями. Наряду с антифрикционными добавками в них содержатся прочные наполнители (кокс, стеклянные, углеродные, металлические или полимерные волокна, ткани, древесная крошка, металлические или минеральные порошки). Введение подобных комплексных наполнителей существенно повышает свойства АСП;

– комбинированные материалы типа металлофторопластовой ленты, которые совмещают в себе преимущества составных частей: прочность и теплопроводность металлической основы; высокие теплопроводность, прочность и противозадирные свойства пористого слоя из сферических частиц антифрикционного сплава; антифрикционные свойства заполняющей поры и образующей поверхностный слой смеси полимера с наполнителем. В России выпускаются комбинированные материалы для работы без смазки (с фторопластом-4) и со смазкой (с полиформальдегидом).

В качестве связующего АСП используются термопластичные и термоактивные полимеры. Из термопластичных наиболее часто применяются высокопрочные кристаллические полиамиды (П6, П12, П66, П610, ПА610), капрон, нейлон, полиакрилаты и другие фторполимеры. Из терморезистивных связующих используются почти все известные полимеры этого типа: фенолформальдегидные, эпоксидные, фурановые и др.

Наполненные фторполимеры. Фторопласт-4 обладает уникальными антифрикционными свойствами. Без смазки по самому себе, металлам и другим твердым телам при малых скоростях скольжения коэффициент трения составляет сотые доли единицы. Однако механическая прочность, износостойкость и теплопроводность – низкие. Введение во фторопласт-4 наполнителей, не изменяя коэффициента трения в сотни (и даже тысячи) раз повышает его износостойкость и механические свойства.

В России выпускаются композиционные антифрикционные материалы на основе фторопласта-4 с различными наполнителями: Ф4 Г21 М7 (21 % графита и 7 % дисульфида молибдена), Ф4 Г20 М5 С10 (20 % графита, 5 % дисульфида молибдена, 10 % рубленного стекловолокна), Ф4 К20 (20 % кокса), Ф4 Г3 (3 % графита), Ф4 С15 (15 % стекловолокна) и ряд других.

Композиционные материалы на основе фторопласта-4 могут работать без смазки при скоростях скольжения не более 0,5...1,0 м/с.

Металлофторопластовые материалы. Подшипники из этих материалов изготавливаются штамповкой из ленточного металлофторопластового комбинированного композита. Они успешно могут работать без смазки в различных газовых средах и в вакууме, а также при недостаточной смазке в диапазоне температур от -200 до + 300 °С. Металлофторопластовый материал состоит из стальной основы (стали

08КП, 10КП), тонкого напеченного пористого слоя из высокооловянистой бронзы (0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласт-4 с дисульфидом молибдена.

Подшипники скольжения из металлофторопластового материала применяются в авиации, в легкой и пищевой промышленности, автомобилестроения, электротехнической промышленности. Перспективно их использование в сельскохозяйственном машиностроении, в станкостроении.

По типу металлофторопластового выпускается промышленностью ленточный комбинированный материал для работы со смазкой.

Его отличие заключается в использовании вместо фторопласта-4 другого полимера (полиформальдегида) и наполнителя.

**Углеродистые антифрикционные материалы.** Эти материалы нашли применение при работе без смазки в различных газовых (исключая инертные газы, осушенные газы и воздух, вакуум) и жидких агрессивных средах в диапазоне температур от -200 до +2000 °С.

По технологическим признакам графитовые антифрикционные материалы делятся на следующие группы:

- обожженные твердые (АО);
- графитированные (АГ);
- обожженные и графитированные, пропитанные смолами;
- обожженные и графитированные, пропитанные металлами;
- с полимерным связующим.

Графитовые антифрикционные материалы изготавливаются из нефтяного кокса с добавками природного графита или пекового кокса, сажи и антрацита. Для получения обожженного материала заготовки обжигаются в восстановительной атмосфере при температуре 1000...1500 °С.

В процессе обжига идет коксование связующего без структурных изменений основного твердого сырья. Полученные таким образом материалы – пористые. При заполнении пор материалами или полимерами повышаются плотность и прочностные характеристики.

Разработаны и другие материалы на основе углерода: углеситалл, силицированный графит, углеграфитовые материалы с различными пропитками.

Углеграфитовые антифрикционные материалы используются при изготовлении поршневых колец компрессоров и холодильных агрегатов, подвижных уплотнений для герметизации газовых и жидких сред, подшипников скольжения различных направляющих.

## **7.8. Фрикционные материалы**

Тормозные устройства из фрикционных материалов предназначены для превращения кинетической энергии движущихся масс в теплоту при сохранении их работоспособности.

Фрикционные материалы разработаны для различных условий эксплуатации: для весьма легких (температура на поверхности трения до 100 °С), легких (до 250 °С), средних (до 600 °С), тяжелых и сверхтяжелых (до 1000 °С и более).

Для легких условий эксплуатации используются стали, чугуны и бронзы. Для устройств, работающих в условиях эксплуатации средней тяжести, применяются асбофрикционные и спеченные на основе бронз материалы. Для тяжелых и сверхтяжелых условий – спеченные материалы на железной основе, углеродные или графитовые волокна в углеродной матрице.

Фрикционные материалы разделяются на две группы: металлические и неметаллические.

В тяжелых условиях эксплуатации при работе без смазки наиболее износостойкими являются легированные чугуны.

Например, срок службы тормозных колодок железнодорожного транспорта из чугуна с содержанием фосфора до 3 % по сравнению с серым чугуном, не содержащим фосфора, увеличивается на 12 %. При этом интенсивность износа колес уменьшается.

Перспективно использование спеченных фрикционных материалов на основе железа и меди. Из материалов на железной основе наибольшее распространение получили материалы, приведенные в табл. 24.

*Таблица 24*

**Состав и свойства фрикционных материалов на железной основе**

| Материал | Состав, % |    |    |   |                  |         | Другие добавки                                    |        | σ <sub>в</sub> | σ <sub>сж</sub> | Износ за одно торможение, мкм |
|----------|-----------|----|----|---|------------------|---------|---------------------------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|
|          | Fe        | Cu | Ni | C | SiO <sub>2</sub> | Ас–бест |                                                   | НВ     | МПа            |                 |                               |
| ФМК–8    | 45        | –  | 25 | 7 | –                | –       | Cr, W, Cu <sub>2</sub> S                          | 60–90  | 9–100          | 450–500         | 5–8                           |
| ФМК–11   | 64        | 15 | –  | 9 | 3                | 3       | BaSO <sub>4</sub>                                 | 80–100 | 50–70          | 300–350         | 16                            |
| МКВ–50А  | 64        | 10 | –  | 8 | –                | 3       | FeSO <sub>4</sub> , SiC, B <sub>4</sub> C         | 8–100  | 30–40          | 150–210         | 6                             |
| СМК–80   | 48        | 23 | –  | – | –                | –       | Mn, BN, B <sub>4</sub> C<br>SiC, MoS <sub>2</sub> | 8–100  | –              | 200–250         | 1,25                          |

Фрикционные спеченные материалы на основе меди широко используются при работе без смазки. В табл. 25 приведены некоторые марки фрикционных материалов на медной основе.

В тормозах железнодорожного транспорта широкое применение имеют асбофрикционные материалы, главным компонентом которых является хризотил-асбест (ГОСТ 18711-97). Асбест способствует очищению поверхности трения от загрязнений. В качестве армирующих компонентов используются шлаковая или минеральная вата; стеклянные, ба-

зальтовые, углеродные и другие волокна. В качестве наполнителей применяются седрик, баритовый концентрат, оксиды хрома, глинозем, каолин, мел и др.

Таблица 25

**Состав фрикционных материалов на медной основе, %**

| Cu      | Sn     | Pb     | Fe    | C<br>(графит) | Асбест | SiO <sub>2</sub> | Другие добавки                               |
|---------|--------|--------|-------|---------------|--------|------------------|----------------------------------------------|
| 68...76 | 8...10 | 7...9  | 3...5 | 6...8         | —      | —                | —                                            |
| 60...75 | 6...10 | 20     | 5     | 1...8         | —      | —                | Ti, V, Si, As, MoS <sub>2</sub>              |
| 18      | 2      | 3      | 3     | 3             | 30     | —                | 40 стеклянной фриты,<br>10-сульфида алюминия |
| 68...86 | 5...10 | 5...10 | 2     | 4...8         | 3      | 3                | Ni                                           |
| 75      | 8      | 5      | 4     | 1...20        | —      | —                | Si, Zn                                       |

Связующими в таких материалах являются каучуки и смолы, а также их комбинации. Наибольшее распространение нашли бутадиеновые (СББ, СББСР, СКД), бутадиен-нитрильные (СКН-26 м) и другие. Используется и натуральный каучук.

Фрикционные асбополимерные материалы крепятся к металлическому каркасу различными способами: механически (заклепки, винты, болты), приклеиванием, приформовыванием в процессе изготовления.

В связи с тем, что асбест небезопасен для здоровья, в настоящее время ведутся исследования по созданию безасбестовых фрикционных материалов.

Одним из возможных заменителей асбеста в перспективе является высокопрочное и теплостойкое волокно кевлар, нашедшее применение за рубежом. Износостойкость фрикционных колодок с кевларом может быть выше асбестовых при сохранении стабильных характеристик при высоких температурах.

## 7.9. Припои

Припоями называются присадочные металлы или сплавы предназначенные для заполнения зазора между соединяемыми поверхностями изделий в процессе пайки. Они обладают более низкой температурой плавления, чем материал соединяемых деталей.

Припои подразделяются на две группы:

- мягкие, имеющие температуру плавления менее 300 °С (сплавы на основе Sn, Pb с добавками Cd, Bi и др.);
- твердые, с температурой плавления более 300 °С и отличающиеся высокой прочностью (сплавы на основе Cu, Ag, Ni, Zn).

На практике припои выбираются согласно типу паяемого металла или металлов (если они разнородны), требуемой механической прочностью, коррозионной стойкости, удельной электропроводности, стоимости.

Название припоя определяется металлами, которые входят в него в наибольшем количестве. В случае содержания в припоях драгоценных металлов название происходит от этих металлов.

Маркировка припоев начинается с буквы П – припой. Далее следуют наименования входящих основных элементов по первой букве их названия: О – олово, Су – сурьма, С – свинец, А – алюминий, Ср – серебро, Н – никель, Пд – палладий, Ин – индий, М – медь, Зл – золото, Г – германий, Кр – кремний, Ви – висмут, К – кадмий, Т – титан. После букв идут цифры, указывающие процентное содержание элементов.

Для получения хорошего соединения, припой должен иметь более низкую температуру плавления, чем металл. В расплавленном состоянии он должен хорошо смачивать поверхности. В этих случаях используются припои на основе олова, свинца, цинка, серебра. Например, в приборостроении для низкотемпературной пайки используются оловянно-свинцовые и оловянно-цинковые припои (ГОСТ 21931-76).

Сплавы олова и цинка имеют самую низкую температуру плавления из всех сплавов этой системы (199 °С). Сплавы ПОЦ-70, ПОЦ-60, ПОЦ-40 используются для пайки алюминия и его сплавов.

В тех случаях когда требуется очень низкая температура нагрева (менее 100 °С) применяются сплавы висмута со свинцом.

Припои для высокотемпературной пайки обеспечивают более прочные соединения, чем для низкотемпературной, так как вследствие высокой температуры нагрева происходит взаимная диффузия элементов основного металла и припоя. Так для пайки наружных деталей и сборочных единиц электровакуумных приборов из меди и ее сплавов, нержавеющей и углеродистой стали используются твердые серебряные припои ПСр-2,5; ПСр-3; ПСр-15; ПСр-40; ПСр-45. Для латунных соединений, не подвергаемых ударным нагрузкам, применяется медно-цинковый припой ПМц-3.

Твердые медно-фосфорные припои (ПМФ1, ПМФ2, ПМФ3) используются для пайки медных, латунных и бронзовых деталей работающих в условиях небольших статических нагрузок.

Пайка алюминия и его сплавов производится специально разработанными для этой цели припоями и флюсами. Основным препятствием при пайке алюминия является пленка оксида, мгновенно образующаяся при ее удалении механическим способом. Для пайки алюминия применяются мягкие (АВИА1 и АВИА2) и твердые (П 425А, П 34А, ПСИЛО) припои. При пайке мягкими припоями поверхность алюминия предварительно покрывается никелем.

Для исключения окисления кислородом воздуха припоев и металла соединяемых деталей во время пайки используются вспомогательные вещества, которые называются флюсами. Последние должны иметь температуру плавления на 50...100 °С ниже температуры плавления припоя, хорошо растекаться по поверхности основного металла и припоя, не изменять своего состава при пайке, легко удаляться с поверхности детали после пайки, не вызывать коррозии.

При пайке и лужении мягкими припоями латуни, меди, никеля и металлов, покрытых оловом, серебром, кадмием или сплавами олово-свинец, олово-висмут, в качестве флюса используется канифоль (ФК) и флюсы на ее основе с добавлением этилового спирта. Для пайки меди, латуни, бронзы, константана, серебра, платины и ее сплавов используется флюс ФТСП на основе этилового спирта (94...95 %) с добавлением салициловой кислоты (4...4,5 %) и триэтаноламина (1...1,5 %). При пайке и лужении стали и хромоникелевых сплавов между собой и в соединении с медью и ее сплавами применяется ФДФс на основе этиленгликоля (50...60 %), ортофосфорной кислоты и солянокислого диэтиламина в равных пропорциях.

При пайке твердыми припоями используются флюсы на основе галогенидов (хлоридов, фторидов) щелочных металлов (Li, Na, K).

### **Контрольные вопросы**

1. На какие группы подразделяются цветные металлы по физическим и химическим свойствам?
2. Какими основными свойствами обладают медь, титан, никель, вольфрам, молибден, хром, ванадий?
3. На какие основные группы делятся алюминиевые сплавы?
4. Как маркируются алюминиевые сплавы?
5. Какие алюминиевые сплавы называются порошковыми?
6. Какие существуют основные виды термической обработки алюминиевых сплавов?
7. Назовите области применения алюминиевых сплавов.
8. Как классифицируются и обозначаются медные сплавы?
9. Какие сплавы называются латунями? Назовите их виды и свойства.
10. Какие сплавы называются бронзами? Назовите их виды и свойства.
11. Приведите области применения сплавов на основе меди.
12. На какие группы подразделяются сплавы на основе магния, титана, никеля? Каковы их характерные свойства?
13. Какие материалы называются антифрикционными? Назовите их характерные свойства.
14. На какие виды подразделяются антифрикционные сплавы? Приведите области их использования.

## 8. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### 8.1. Пластмассы

Пластмассы – материалы на основе природных или синтетических полимеров, способные приобретать заданную форму при нагревании под давлением и устойчиво сохранять ее после охлаждения.

Полимеры (от греч. *polymeres* состоящий из многих частей, многообразный, от *poly* много и *meros* доля, часть) – это соединения, молекулы которых (макромолекулы) состоят из большого числа регулярно или нерегулярно повторяющихся структурных единиц (звеньев) одного или нескольких типов. Различаются гомополимеры – образуемые соединением друг с другом исходных молекул одного вещества и сополимеры – когда в образовании участвует не одно исходное вещество, а два (иногда три).

Пластические массы помимо полимера, могут содержать наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, пигменты, смазки и другие компоненты. Изделия из пластмасс отличаются малой плотностью, высокими диэлектрическими свойствами, хорошими теплоизоляционными характеристиками, устойчивостью к атмосферным воздействиям и резким сменам температур, стойкостью в агрессивных средах, высокой механической прочностью. Они являются важнейшим конструкционным материалом современных технических устройств, в том числе и на железнодорожном транспорте.

В общем случае пластмассы можно подразделить на две большие группы (рис. 90):

- термопластичные, или термообратимые (термопласты);
- термореактивные, или термонеобратимые (реактопласты).

**Термопласты** находят в промышленности более широкое применение и производятся в больших количествах. Они хорошо сопротивляются усталости, поэтому их долговечность выше, чем у многих металлических сплавов. Однако они быстро разрушаются при знакопеременных нагрузках с частотой выше 20 Гц. При нагревании способны переходить из твердого состояния в вязкое. При охлаждении происходит обратный процесс.

Эта группа пластиков находит в производстве наиболее широкое использование несмотря на ряд особенностей. Они резко меняют механические свойства при изменении внешних условий и скоростей деформирования. Под нагрузкой в изделиях из термопластов развивается высокоэластичная деформация, которая приводит к искажению размеров. При нагреве выше 20...25 °С ускоряется ползучесть, растет остаточная деформация.

В табл. 26 приведены свойства некоторых марок термопластов.

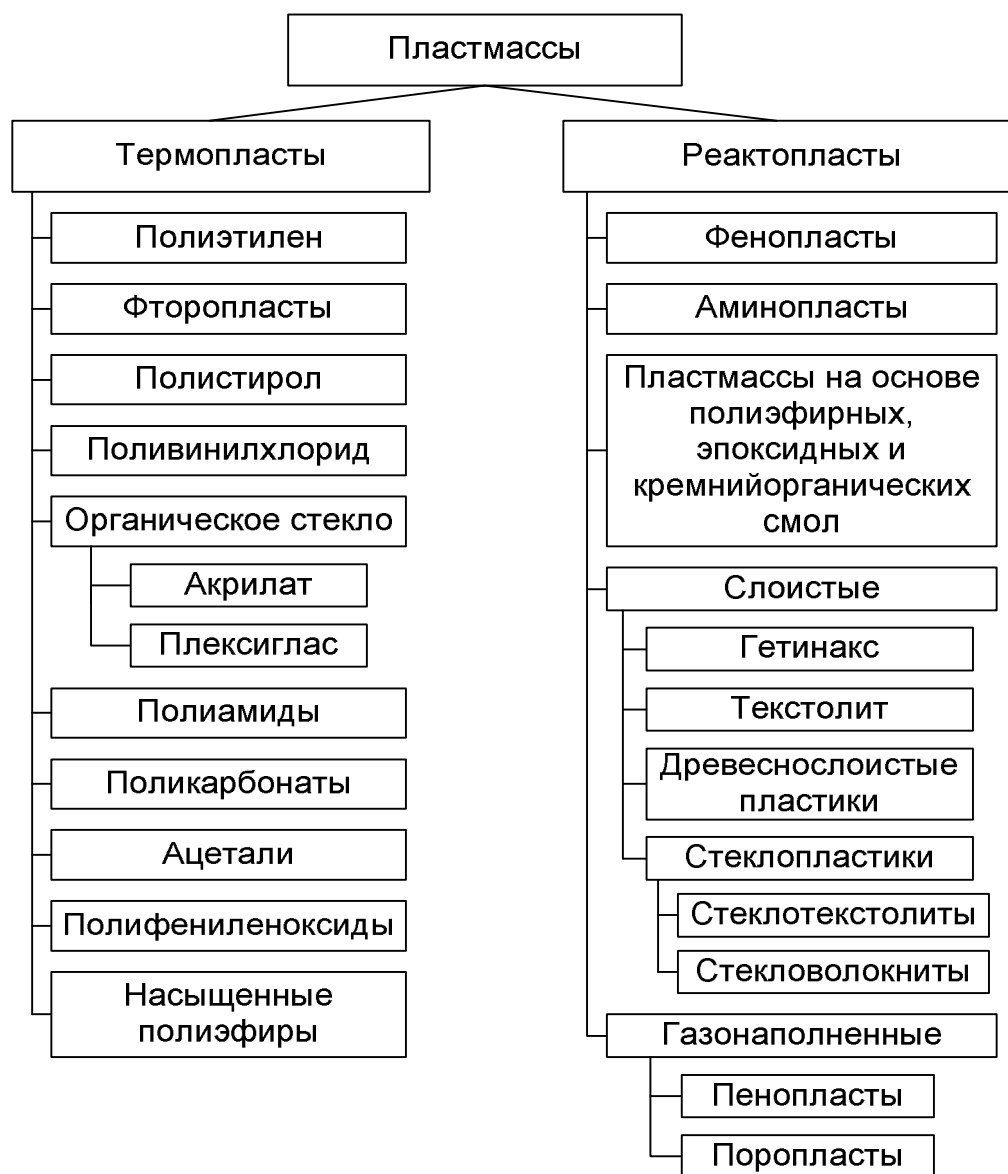


Рис. 90. Виды пластических масс

Полиэтилен является одним из важнейших представителей группы термопластов. Он обладает отличными диэлектрическими свойствами; химически стоек; практически не взаимодействует с влагой, топливом, маслами; не охрупчивается в интервале температур от -60 до +60 °С; хорошо сваривается. Однако склонен к старению под воздействием атмосферных условий, имеет недостаточно высокую прочность и теплостойкость.

Используется для изоляции кабелей, в электро- и радиоаппаратуре, в качестве упаковочного материала. Из него изготавливается волокно, трубы, различные пористые материалы.

## Свойства термопластичных масс

| Материал                                                        | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | КС, кДж/м <sup>2</sup> | Максимальная температура эксплуатации без нагрузки, °С |
|-----------------------------------------------------------------|------------------|--------------|------------------------|--------------------------------------------------------|
| Полиэтилен:<br>низкой плотности<br>( $<0,94$ т/м <sup>3</sup> ) | 10...18          | 300...1000   | не ломается            | 60...75                                                |
| высокой плотности<br>( $<0,94$ т/м <sup>3</sup> )               | 18...32          | 100...600    | 5...20                 | 70...80                                                |
| Полипропилен                                                    | 26...38          | 200...800    | 3...15                 | 90...100                                               |
| Полистирол                                                      | 40...60          | 3...4        | 2...3                  | 50...70                                                |
| Поливинилхлорид:<br>жесткий                                     | 50...65          | 20...50      | 2...4                  | 65...85                                                |
| пластикат                                                       | 10...40          | 50...350     | не ломается            | 50...55                                                |
| Фторопласт-3                                                    | 30...40          | 160...190    | 8...10                 | 65...90                                                |
| Фторопласт-4                                                    | 20...40          | 250...500    | 14...16                | 250...255                                              |
| Поликарбонат                                                    | 60...65          | 80...120     | 20...30                | 130...135                                              |
| Капрон                                                          | 75...85          | 50...130     | 3...10                 | 80...100                                               |

Фторопласты – полимеры производных этилена, очень стойкие против любых агрессивных сред, имеют высокие антифрикционные свойства, низкий коэффициент трения. Являются отличными высокочастотными диэлектриками.

К недостаткам следует отнести их высокую стоимость, токсичность газов при разложении, низкую стойкость против радиации.

Используются фторопласты в качестве электроизоляционного материала (особенно в технике высоких и сверхвысоких частот); для стыков труб; изготовления манжет, сальников и др.

Полистирол – аморфный полимер, используемый в интервале температур от -40 до +60 °С. Водостоек, медленно стареет на открытом воздухе. Является хорошим диэлектриком в высокочастотных цепях. Прозрачен, легко перерабатывается, относительно дешевый. Однако хрупок, имеет низкую теплостойкость, горюч, склонен к растрескиванию.

Широко используется в радиотехнике, а также при изготовлении химической и оптической аппаратуры.

Поливинилхлорид – это полимер, называемый винипластом (если изготавливается без пластификаторов) или пластикатом (при наличии пластификаторов). Положительными качествами является его стойкость к щелочам, кислотам, топливу, смазкам; негорючесть, свариваемость. Однако при пониженных температурах хрупок, при температуре 40...60 °С разупрочняется, склонен к разложению.

Применяется для изготовления водопроводных и сточных труб; шлангов; линолеума; искусственной кожи для пассажирских вагонов, автомобилей, самолетов; наружной изоляции электропроводов.

Органическое стекло широко используется в технике и быту, так как обладает рядом ценных свойств: легче и прочнее силикатного стекла; легко окрашивается и обрабатывается; является хорошим диэлектриком; стоек к воде, топливу, смазкам, слабым растворам кислот и щелочей.

Из органического стекла изготавливаются окна самолетов, судов, автомобилей, троллейбусов; предохранительные очки; стоп-сигналы; подфарники; светофильтры; стекла для часов и др.

В последние десятилетия в машиностроении помимо обычных термoplastов находят массовое применение новые материалы, которые лучше обеспечивают постоянство размеров нагруженных деталей: полиамиды, поликарбонаты, ацетали, полифениленоксид, насыщенные полиэфирсы.

Изделия из полиамидов могут эксплуатироваться длительное время при температуре до 150 °С. Имеют повышенную прочность, активно сопротивляются абразивному изнашиванию, обладают малым коэффициентом трения в паре со сталью, что дает возможность их использования в качестве антифрикционных материалов.

Поликарбонаты выдерживают значительные ударные нагрузки. Их ударная вязкость (250...500 кДж/м<sup>2</sup>) близка к ударной вязкости среднеуглеродистых сталей. Однако существенным недостатком поликарбонатов является склонность к растрескиванию.

Ацетали и их сополимеры отличаются повышенной прочностью и жесткостью; стойки против растрескивания и изнашивания; имеют малый коэффициент трения, который почти не изменяется при нагреве до 100 °С.

Термореактивные пластмассы производятся на основе эпоксидных, полиэфирных, полиуретановых, фенолформальдегидных и кремнийорганических полимеров. Они имеют сетчатую структуру и поэтому при нагреве не плавятся. Устойчивы против старения и не взаимодействуют с топливом и смазочными материалами. Все термореактивные полимеры имеют низкую ударную вязкость в связи с чем используются с наполнителями. Они более надежны, чем термoplastы, обладают большой стабильностью механических свойств, малой зависимостью от температуры, скорости деформирования и длительности нагрузки.

К группе термореактивных пластических масс относятся фенопласты; аминопласты; пластмассы на основе полиэфирных, эпоксидных и кремнийорганических смол; слоистые и газонаполненные (см. рис. 90). В табл. 27 приведены свойства некоторых термореактивных пластмасс.

## Свойства термореактивных пластмасс

| Материал                                   | $\sigma_v$ , МПа | $\delta$ , % | КС,<br>кДж/м <sup>2</sup> | Максимальная температура эксплуатации без нагрузки, °С |
|--------------------------------------------|------------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| Термореактивные полимеры без наполнителей: |                  |              |                           |                                                        |
| феноло-формальдегидные                     | 15...35          | 1...5        | < 1                       | 200...230                                              |
| полиэфирные                                | 42...70          | 2...3        | < 1                       | 95...120                                               |
| эпоксидные                                 | 28...70          | 3...6        | < 1                       | 150...175                                              |
| кремнийорганические                        | 22...42          | 5...10       | < 1                       | 345...350                                              |
| Волокниты                                  | 30...90          | 1...3        | 10...20                   | 120...140                                              |
| Гетинаксы                                  | 60...70          | —            | 4...5                     | 120...125                                              |
| Текстолиты                                 | 65...100         | 1...3        | 20...35                   | 90...105                                               |
| Стеклотекстолиты                           | 200...600        | 1...3        | 20...50                   | 200...400                                              |
| Пористые пластмассы                        | 0,5...2,5        | —            | ~ 1                       | —                                                      |

**Фенопласты** изготавливаются на основе фенольноальдегидных смол и используются для деталей автомобилей, самолетов, телефонных аппаратов, радиоприемников, шестерен, роликов, клапанов и др.

**Аминопласты**, основой которых являются аминоальдегидные смолы, относятся к слоистым материалам. Из них изготавливаются прессовочные порошки, пенопласты, клеи, лаки. Достоинствами таких пластмасс являются их высокая твердость и механическая прочность; хорошие диэлектрические свойства; значительная теплостойкость; химическая устойчивость к действию воды, топлива, смазки, растворителей (ацетон, спирт, бензин и др.); не горят.

**Волокниты** — это пластмассы с волокнами в качестве наполнителей. Они отличаются повышенной прочностью и ударной вязкостью. Волокниты с асбестовым волокном сочетают теплостойкость (до 200 °С) с высоким коэффициентом трения в паре со сталью и поэтому используются в тормозных устройствах для обкладок и колодок.

**Слоистые пластики** являются самыми прочными и универсальными по применению конструкционными пластмассами. Свойства слоистых пластиков зависят от вида полимера, наполнителя, способа укладки листов.

По виду наполнителя слоистые пластики подразделяются на следующие виды:

- текстолиты (с хлопчатобумажными тканями);
- гетинаксы (с бумагой);
- древесно-слоистые (с древесным шпоном);
- стеклотекстолиты (с тканями из стеклянного волокна).

Наименее прочными являются гетинаксы, наиболее прочными – стеклотекстолиты.

Из текстолита изготавливают шестерни, вкладыши подшипников, кулачки. Он обладает хорошими изоляционными свойствами, что дает возможность его использования в электротехнике.

Древеснослоистые пластики используются для изготовления подшипников, втулок, шестерен, блоков, электротехнических изделий. Широкое применение находят в качестве отделочных материалов.

Стеклопластики имеют высокую прочность и жесткость, но малую плотность. По способности поглощать вибрации они превосходят стали, сплавы титана и алюминия. По тепловому расширению стеклопластики близки к сталям. Пластики со стеклянным волокном могут выдерживать температуру свыше 3000 °С в течение десятков секунд, что дает возможность их использования в качестве теплозащитных материалов.

## **8.2. Резины**

**Резина** (от лат. *resina* смола) – материал, получаемый из каучука, серы и других компонентов специальной технологией – вулканизацией. В результате вулканизации повышаются прочность, твердость, эластичность, тепло- и морозостойкость каучука, снижается степень его набухания в органических растворителях.

Резина обладает целым комплексом уникальных свойств, из которых важнейшим является высокая эластичность, то есть, способность к большим обратимым деформациям растяжения в широком интервале температур. К числу ценных свойств (которые определяются в первую очередь типом каучука) относятся тепло-, масло-, бензо-, морозостойкость, стойкость к действию радиации, агрессивных сред (кислот, щелочей, кислорода, озона и др.), газопроницаемость.

У резин общего назначения интервал рабочих температур составляет -50...+150 °С. При нагреве выше 150 °С резина быстро разрушается, а при охлаждении ниже -50 °С теряет эластичность. Для более низких и более высоких температур изготавливаются специальные резины – морозостойкие и теплостойкие.

На железнодорожном транспорте основными видами резинотехнических изделий являются шины, приводные ремни, эбонитовые изделия, прорезиненные ткани, тормозные рукава и др.

Значительная часть резины применяется в качестве изоляции и защитных оболочек кабельных изделий.

Номенклатура резиновых изделий очень велика. Для машиностроительного производства большое значение имеют приводные ремни, различные прокладки и манжеты, подшипники скольжения. Резина используется в качестве материала штампов для листовой штамповки.

## Контрольные вопросы

1. На какие группы подразделяются пластмассы?
2. Какие материалы относятся к термопластам? Где они используются?
3. Какие материалы относятся к реактопластам? Область их применения?
4. Что такое вулканизация и для каких целей она используется?
5. Назовите области применения резинотехнических изделий на железнодорожном транспорте?

## 9. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Железнодорожный транспорт имеет многоотраслевое хозяйство, использующее значительное количество материалов различного назначения. Только металлов и металлопродукции Российские железные дороги ежегодно потребляют 1,6 млн тонн. Кроме того, из-за проведения реорганизации и модернизации парка подвижного состава и железнодорожных путей (а металлоемкость этого процесса просто колоссальна) потребность постоянно будет возрастать.

Важнейшее место среди материалов (84...87 %) занимают железоуглеродистые сплавы (стали и чугуны), к которым предъявляются дополнительные требования, отражающие специфические условия работы конструкций – вибрации, значительные ударные воздействия, интенсивное изнашивание, влияние внешней среды.

Особое место в этой группе сталей занимают рельсовая, осевая, бандажная, колесная, мостовая и др.

Стали для рельсов должны обладать высокой контактной прочностью и износостойкостью. Для их изготовления используются марки М74, М74Т, М74Ц (рельсы типа Р50); М76, М76В, М76ВТ, М76Т, М76Ц (рельсы типа Р65, Р75) с содержанием углерода 0,67...0,82 %. Для изготовления рельсов железнодорожных типов Р65 и Р65К повышенной износостойкости и контактной выносливости применяется сталь Э90АФ.

После изготовления рельсы подвергаются термической обработке одним из следующих способов:

- закалка с 850 °С с обрызгиванием головки рельсов водой с температурой 35...50 °С и последующим самоотпуском при температуре 500 °С;
- объемная закалка с температуры 850 °С в масле имеющем температуру 60...90 °С и последующим отпуском при температуре 450...480 °С.

Концы рельсов подвергаются поверхностной закалке на твердость 320...400 НВ на глубину 8...10 мм.

Крестовины стрелочных переводов изготавливаются из стали 110Г13Л, обладающей высокой износостойкостью и способностью упрочняться во время эксплуатации от воздействия ударных нагрузок от колесных пар.

Оси локомотивов и вагонов изготавливаются из специальной осевой стали с содержанием углерода 0,35...0,45 % с нормализацией на твердость 160...170 НВ.

Цельнокатаные колеса вагонов – из колесной стали близкой по составу к стали 60Г (0,57...0,65 % С). Колеса подвергаются закалке с температуры 825...860 °С в подогретой воде и отпуску при температуре 600...650 °С в течение 2...3 часов на твердость 250 НВ.

Для рам и других деталей подвижного состава применяются стали 09Г2Д, 09Г2С, 12Г2Ф, 12Г2ФД. В настоящее время осваиваются перспективные стали повышенной прочности для несущих элементов кузовов 14Г2ФАЮД, 12ХГ2СМФАЮД, 08Г2МФБД и для ограждающих элементов кузовов 10ХНДПФ, 12ХДПФ, 14ДПФ и др. такие стали имеют предел текучести 450...720 МПа при относительном удлинении 19...20 %.

Котлы железнодорожных цистерн в зависимости от перевозимых материалов выпускаются из обычных углеродистых сталей и высоколегированных типа 10Х17Н13М3Т, 12Х18НЮТ, 08Х22Н6Т и др.

Для изготовления оборудования рефрижераторных вагонов применяются среднеуглеродистые стали 45 и 45Х, алюминий и его сплавы АК12, АК5М, АМг5 и др.

В мостостроении используются стали с высокой ударной вязкостью не только при нормальной, но и при пониженной температурах. Кроме того, для сварных мостов они должны обладать и хорошей свариваемостью. Для клепанных мостов используется сталь Ст3 мостовая, а для сварных – сталь марки М16С.

В качестве рессорно-пружинных сталей на железнодорожном транспорте используются недорогие и достаточно технологичные стали с содержанием углерода 0,5...0,7 %, которые подвергаются закалке и отпуску при температуре 420...450 °С. Для пружин и рессор толщиной до 18 мм применяются стали 5С2,60С2, 70С3А. Для крупных, тяжело нагруженных и особо ответственных пружин и рессор – 70С3А, 60С2ХА, 60С2Н2А со следующими свойствами:  $\sigma_b \geq 1800$  МПа;  $\sigma_{0,2} \geq 1600$  МПа;  $\delta \geq 5$  %;  $\psi \geq 20$  %. Их предел упругости составляет  $\sigma_{0,01} = 880...1150$  МПа, а твердость 38...48 НРС. Для уменьшения чувствительности к концентраторам напряжений готовые пружины и листы рессор подвергаются поверхностному наклепу обдувкой дробью. После упрочнения предел выносливости увеличивается в 1,5...2 раза.

Широко используются при выпуске подвижного состава и других технических устройств железнодорожного транспорта чугуны различных марок.

Так, серые чугуны СЧ10, СЧ15 находят применение при изготовлении слабо- и средненагруженных деталей: крышек, фланцев, маховиков, корпусов редукторов, подшипников, насосов и др. Чугуны марок СЧ20, СЧ25 – для изделий, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках – блоков цилиндров тепловозных дизелей, картеров двигателей, поршней цилиндров, зубчатых колес и т. д. Серые модифицированные чугуны СЧ30, СЧ35 используются для деталей, работающих при высоких нагрузках или в условиях интенсивного износа: зубчатые колеса, гильзы блоков цилиндров, распределительные валы и др. Широко применяются легированные серые чугуны. Так, например, чугун марки ЧН1ХМД используется для изготовления блоков, головок и гильз цилиндров, поршней тепловозных дизелей.

Высокопрочные чугуны применяются в дизелестроении (коленчатые валы, поршни и другие наиболее ответственные детали).

Ковкие чугуны нашли широкое применение в вагоно- и тепловозостроении. Из них изготавливаются детали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки.

Медь и сплавы на ее основе используются для изготовления электрических машин различного назначения (в том числе и для подвижного состава), приборов, проводов, топливной аппаратуры, вкладышей подшипников скольжения и т. д.

Среди медных сплавов оловянные бронзы имеют самую низкую литейную усадку (0,8 % при литье в песчаные формы и 1,4 % при литье в металлические формы), поэтому они используются для получения сложных фасонных отливок. Например, в узлах трения тепловозов применяются подшипники из бронзы БрОЗЦ12С5 с заливкой баббитом БК2, БрО10С10, БрО4Ц4С17, БрО5Ц5С5 др. Из деформируемых бронз изготавливаются токопроводящие детали (БрОФ 2-0,25), подшипниковые детали (БрОФ 6,5-0,15), прокладки во втулках и подшипниках (Бр ОЦС 4-4-2,5; Бр ОЦС 4-4-4).

Высокими механическими и антифрикционными свойствами обладают алюминиевые бронзы. Кроме того, они имеют меньшую стоимость по сравнению с оловянными. Из алюминиево-железоникелевых бронз (Бр АЖН 10-4-4) изготавливаются детали, работающие в тяжелых условиях износа при высоких температурах (400...500 °С): седла клапанов, направляющие втулки выпускных клапанов, шестерни и др.

Широкое применение находят бериллиевые бронзы, которые отличаются высокими пределами упругости, временным сопротивлением, твердостью и коррозионной стойкостью. Двойные бериллиевые бронзы содержат в среднем 2,0...2,5 % Ве. Бериллиевые бронзы являются теплостойкими материалами, обладают высокой теплопроводностью и

электрической проводимостью, при ударах не образуют искр, хорошо обрабатываются резанием, свариваются электроконтактной сваркой. Из бериллиевых бронз изготавливают детали ответственного назначения: пружинные контакты; кулачки; шестерни; червячные передачи; подшипники, работающие при высоких скоростях, больших давлениях и повышенных температурах.

Из латуней сравнительно широкое применение на железнодорожном транспорте находят марки ЛМц 58-2, ЛЖМц 59-1-1, ЛС 59-1 при изготовлении стержней короткозамкнутых роторов асинхронных электродвигателей, деталей соединителей, пружинящих контактов и других токоведущих частей. Латунь марок ЛЦ16К, ЛЦ16КУ, ЛЦ40С, ЛЦ30А3 используются при изготовлении литых токоведущих деталей электрических машин и аппаратов.

Алюминий и алюминиевые сплавы используются как проводниковые материалы, так и в качестве конструкционных. Из материалов первой группы изготавливаются электротехническая проволока, шины, фольга и другие изделия (сплавы АВЕ).

Сплавы второй группы (например, АМц и АМг) – предназначены для изделий, получаемых глубокой вытяжкой (заклепки, переборки, обшивка и рамы вагонов). Для блоков цилиндров и головок блоков двигателей внутреннего сгорания применяется сплав АК8М.

Помимо металлических железнодорожным транспортом потребляется значительное количество неметаллических материалов, которые используются как в качестве конструкционных, так и в качестве отделочных. К ним относятся пластические массы (термопласты, реактопласты), резиновые и кожаные материалы, неорганические полимерные материалы (графит, неорганическое стекло, ситаллы, керамические материалы, сульфиды) и др. К примеру для остекления транспортных средств применяются преимущественно триплексы, термопан и закаленные стекла. Силикатные триплексы представляют собой два листа закаленного стекла (толщиной 2...3 мм) склеенные прозрачной эластичной полимерной пленкой. При разрушении триплекса образовавшиеся осколки удерживаются на полимерной пленке.

Как и большая часть отраслей промышленности предприятиями железных дорог потребляется значительное количество инструментальных материалов. Преобладают твердые сплавы на основе карбидов вольфрама, титана, тантала. В последнее время осваиваются перспективные материалы на основе металлокерамики с многослойным покрытием градиентной структуры, состоящее из чередующихся слоев ( $TiN + Ti + \dots + TiN + Ti$ ) с микротвердостью 18 ГПа и микропластичностью 1000 МПа, используемые для обточки колесных пар вагонов и бандажей локомотивов.

Для чистовой обработки деталей находят применение на предприятиях железных дорог новый керамический инструментальный материал на основе  $Al_2O_3$  с покрытиями переходными металлами IV группы Периодической системы (Ti, Zr, Hf), которые резко снижают хрупкость керамики за счет образования в поверхностном слое интерметаллидов и сложных оксидов.

## 10. ЗАДАНИЯ НА САМОСТОЯТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

### 10.1. Общие требования

Работы выполняются согласно вариантам, приведенным в табл. 28. Для студентов очной формы обучения вариант назначается преподавателем. Для студентов интегрированных форм обучения номер варианта должен соответствовать двум последним цифрам шифра, указанного в зачетной книжке.

Таблица 28

Варианты заданий

| Две последние цифры шифра |    |    |    |    | Номер   |        |
|---------------------------|----|----|----|----|---------|--------|
|                           |    |    |    |    | вопроса | задачи |
| 01                        | 21 | 41 | 61 | 81 | 1       | 21     |
| 02                        | 22 | 42 | 62 | 82 | 2       | 22     |
| 03                        | 23 | 43 | 63 | 83 | 3       | 23     |
| 04                        | 24 | 44 | 64 | 84 | 4       | 24     |
| 05                        | 25 | 45 | 65 | 85 | 5       | 25     |
| 06                        | 26 | 46 | 66 | 86 | 6       | 26     |
| 07                        | 27 | 47 | 67 | 87 | 7       | 27     |
| 08                        | 28 | 48 | 68 | 88 | 8       | 28     |
| 09                        | 29 | 49 | 69 | 89 | 9       | 29     |
| 10                        | 30 | 50 | 70 | 90 | 10      | 30     |
| 11                        | 31 | 51 | 71 | 91 | 11      | 31     |
| 12                        | 32 | 52 | 72 | 92 | 12      | 32     |
| 13                        | 33 | 53 | 73 | 93 | 13      | 33     |
| 14                        | 34 | 54 | 74 | 94 | 14      | 34     |
| 15                        | 35 | 55 | 75 | 95 | 15      | 35     |
| 16                        | 36 | 56 | 76 | 96 | 16      | 36     |
| 17                        | 37 | 57 | 77 | 97 | 17      | 37     |
| 18                        | 38 | 58 | 78 | 98 | 18      | 38     |
| 19                        | 39 | 59 | 79 | 99 | 19      | 39     |
| 20                        | 40 | 60 | 80 | 00 | 20      | 40     |

При выполнении каждой работы необходимо письменно ответить на вопрос, соответствующий заданному варианту и решить технологическую задачу.

При оформлении работ тексты вопросов и условий задач необходимо приводить полностью, ответы иллюстрировать эскизами, схемами,

графиками, таблицами и др. Эскизы следует выполнять аккуратно, с применением чертежного инструмента. Не допускается использование ксерокопий, кальки, вырезок из литературных источников и т. д.

Работу рекомендуется выполнять в такой последовательности:

- по таблице вариантов выбрать номера вопроса и задачи;
- ознакомиться с рабочей программой дисциплины и методическими рекомендациями настоящего пособия;
- письменно ответить на поставленный вопрос;
- привести подробное решение технологической задачи, строго придерживаясь требований методических указаний.

В конце работы приводится список использованной литературы. На каждой странице работы необходимо оставлять поля для замечаний рецензента.

## **10.2. Работа № 1 по разделу «Железоуглеродистые сплавы»**

### **10.2.1. Вопросы к работе № 1**

1. Опишите процесс первичной кристаллизации. От каких факторов зависит величина зерна?

2. В чем отличие спокойной стали от кипящей? В каких случаях применяются те или другие?

3. Что такое металлы? Их характерные свойства? Чем металлы отличаются от неметаллов?

4. Что называется элементарной кристаллической ячейкой металлов? Охарактеризуйте основные типы ячеек. Каково их практическое значение?

5. Что называется полиморфизмом металлов? Поясните сущность на примере железа. Каково практическое значение полиморфизма?

6. Какие дефекты строения кристаллов относятся к точечным? Опишите их сущность.

7. Какие дефекты кристаллов относятся к линейным? Опишите их сущность.

8. Что такое диффузия в металлах и сплавах? Каково влияние диффузии на свойства? Приведите примеры.

9. Какое влияние на механические свойства металлов оказывают деформации? Приведите виды деформаций.

10. Что называется степенью переохлаждения при кристаллизации металлов? Каково практическое значение она имеет? Приведите примеры.

11. Что такое дендрит? Как он формируется? Опишите строение стального слитка.

12. Что называется сплавом? Приведите виды сплавов. Дайте характеристику основным видам сплавов.

13. Что называется диаграммой состояния сплавов. Опишите порядок построения диаграмм двойных сплавов.

14. С помощью кривых охлаждения постройте диаграмму состояний сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состояниях. На примере диаграммы объясните правило отрезков.

15. Какова связь между строением двухкомпонентных сплавов, видом диаграмм состояний и свойствами этих сплавов?

16. Что такое критические точки на диаграмме состояний? Как они определяются?

17. Приведите диаграмму состояний двухкомпонентных сплавов, образующих ограниченные твердые растворы. Поясните, как ограниченная растворимость оказывает влияние на структуру и свойства сплавов?

18. Приведите диаграмму состояния железо–цементит. Опишите компоненты входящих в нее сплавов.

19. Приведите диаграмму состояния железо–цементит. Дайте характеристику фаз диаграммы.

20. Приведите диаграмму состояния железо–цементит. Охарактеризуйте линии и точки диаграммы. В чем практическое значение диаграммы?

#### 10.2.2. Задачи к работе № 1

Таблица 29

#### Исходные данные для решения задач

| Номер задачи | Кол-во углерода, % | Температура, °C | Номер задачи | Кол-во углерода, % | Температура, °C |
|--------------|--------------------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|
| 21           | 0,01               | 650             | 31           | 3,00               | 650             |
| 22           | 0,30               | 600             | 32           | 3,50               | 900             |
| 23           | 0,40               | 750             | 33           | 3,70               | 1250            |
| 24           | 0,50               | 730             | 34           | 4,30               | 600             |
| 25           | 0,70               | 1450            | 35           | 4,80               | 1000            |
| 26           | 0,80               | 650             | 36           | 5,00               | 650             |
| 27           | 1,00               | 750             | 37           | 5,50               | 1155            |
| 28           | 1,50               | 650             | 38           | 5,80               | 780             |
| 29           | 1,70               | 800             | 39           | 6,30               | 1000            |
| 30           | 2,00               | 1350            | 40           | 6,50               | 650             |

При решении задачи необходимо:

1. Начертить диаграмму состояний «железо–цементит», провести на ней ординату, соответствующую заданному сплаву, обозначить на ней все критические точки.

2. Рядом с диаграммой справа начертите кривую охлаждения данного сплава, показав связь критических точек на диаграмме и кривой охлаждения.

3. Опишите сущность превращений, происходящих в сплаве при медленном охлаждении от температуры в жидком состоянии до комнатной. Обязательно поясните причины, вызывающие превращения.

4. На ординате сплава отметьте точку, соответствующую заданной температуре и проведите через нее коноду. Пользуясь правилом отрезков, определите фазы, составляющие сплав при заданной температуре; их количество (в %) и состав (содержание компонентов в %).

### **10.3. Работа № 2 по разделу «Термическая обработка стали»**

#### **10.3.1. Вопросы к работе № 2**

1. Опишите сущность превращения аустенита в перлит при непрерывном охлаждении эвтектоидной стали. Какое практическое значение имеет это превращение? Приведите примеры.

2. Какие факторы и почему влияют на выбор температуры нагрева стали, времени выдержки и скорости охлаждения стали при ее термической обработке?

3. Каковы цель и технология азотирования и цианирования стали? Какие детали подвергаются азотированию и цианированию? Какие структурные превращения претерпевает сталь при азотировании и цианировании?

4. Опишите сущность превращения перлита в аустенит при нагреве эвтектоидной стали. В чем состоит практическое значение этого превращения? Приведите примеры.

5. С какой целью применяется термическая обработка чугуна? В чем ее практическое значение? Опишите технологию и структурные превращения. Приведите примеры.

6. По каким причинам и каким образом возникают термические и структурные напряжения при закалке стали на мартенсит. Каково их практическое значение?

7. Опишите цели и технологию нормализации и гомогенизации стали. Приведите примеры.

8. Опишите назначение и порядок построения диаграммы изотермического распада аустенита эвтектоидной стали. Охарактеризуйте структуры, получаемые в результате распада.

9. Приведите диаграммы изотермического распада аустенита для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей. Как углерод влияет на положение кривых начала и конца распада? В чем заключается практическое значение этого влияния?

10. Что называется мартенситом и как он образуется в стали? Каково влияние углерода на положение области начала и конца образования мартенсита? Чем отличается мартенсит, полученный при критической скорости закалки и при скорости выше критической?

11. На диаграмме изотермического распада аустенита покажите критическую скорость закалки. От чего она зависит? На что оказывает влияние? В чем ее практическое значение?

12. Опишите назначение и технологии полного и неполного отжига углеродистой стали. Какие структурные изменения в стали происходят при этих видах отжига? Приведите примеры отжига.

13. Опишите назначение и технологию закалки доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей на мартенсит. Какие структурные изменения при этом происходят в сталях? Приведите примеры закалки изделий подвижного состава.

14. Опишите назначение и технологию поверхностной закалки сталей. Какие структурные изменения происходят в поверхностном слое? Приведите примеры.

15. Опишите назначение и технологию отпуска сталей, закаленных на мартенсит. Какие превращения происходят в структуре закаленной стали при отпуске? Приведите примеры.

16. Объясните сущность, назначение, способы и технологию термомеханической обработки стали. Какие изменения претерпевает сталь при такой обработке?

17. Опишите назначение, сущность и технологию цементации и нитроцементации сталей. Какие изменения структуры происходят в поверхностном слое при цементации? Приведите примеры цементации сталей подвижного состава.

18. Опишите особенности закалки легированных сталей. Как легирующие элементы влияют на кривые начала и конца распада переохлажденного аустенита? Каким образом изменяется критическая скорость закалки?

19. На примере быстрорежущей стали P6M5 поясните назначение и технологию ее закалки. Какие структурные превращения она претерпевает в процессе закалки и последующего отпуска?

20. Что понимается под закаливаемостью и прокаливаемостью? Каково их влияние на механические свойства стали?

### 10.3.2. Задачи к работе № 2

Таблица 30

#### Исходные данные для решения задач

| Номер задачи | Наименование детали | Марка стали | Требуемая твердость, HRC |
|--------------|---------------------|-------------|--------------------------|
| 21           | Зубило              | У7          | 58                       |
| 22           | Напильник           | У12         | 65                       |
| 23           | Сверло              | P6M5        | 63                       |
| 24           | Шестерня            | 20          | 60                       |

| Номер задачи | Наименование детали              | Марка стали | Требуемая твердость, HRC |
|--------------|----------------------------------|-------------|--------------------------|
| 25           | Валик                            | 15          | 42                       |
| 26           | Ось                              | 45          | 40                       |
| 27           | Болт стяжной                     | 50          | 21                       |
| 28           | Протяжка                         | ХВГ         | 65                       |
| 29           | Пружина                          | 60С2Г       | 43                       |
| 30           | Болт крышки шатуна               | 40ХН        | 28                       |
| 31           | Коленчатый вал дизеля            | 60ХФА       | 23                       |
| 32           | Шестерня распределительного вала | 35          | 25                       |
| 33           | Шатун                            | 40ХН2МА     | 29                       |
| 34           | Карданный вал                    | 40Х         | 30                       |
| 35           | Штанга толкателя клапана         | 45          | 28                       |
| 36           | Фланец                           | 40          | 19                       |
| 37           | Штамп горячего деформирования    | 5ХНМ        | 39                       |
| 38           | Штамп горячего деформирования    | 2Х9В6       | 46                       |
| 39           | Штамп холодного деформирования   | 7ХГ2М       | 60                       |
| 40           | Втулка распорная                 | 10          | 62                       |

При решении требуется:

1) выбрать и обосновать наиболее рациональный вид термической или химико-термической обработки, дающий возможность получения требуемой твердости материала заданной детали. Изложить его сущность;

2) подробно изложить основные этапы технологического процесса обработки:

- выбрать и обосновать необходимую температуру нагрева;
- назначить время выдержки;
- выбрать и обосновать охлаждающую среду;

3) начертить необходимый участок диаграммы «железо-цементит» и нанести на нем ординату сплава заданного изделия. На ординате отметить температуры нагрева для соответствующих этапов принятого технологического процесса термообработки;

4) начертить график разработанного технологического процесса термообработки в координатах «температура-время». Масштаб времени допускается принимать условно;

5) описать структурные превращения, происходящие в обрабатываемой стали на каждом этапе технологического процесса.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Производство самых разнообразных технических устройств, используемых на железнодорожном транспорте, является одним из самых металлоемких. Инженеры, связанные с проектированием, изготовлением и эксплуатацией железнодорожной техники должны иметь необходимые знания о строении металлов, методах улучшения их физико-химических и эксплуатационных свойств. Особенно это актуально в последние годы в связи с существенным повышением скоростей движения поездов, увеличением их веса, что вызывает необходимость обеспечения более высокого уровня надежности узлов и агрегатов, реализации требований экологической безопасности и т. д.

В учебном пособии приведены основные сведения о распространенных на железнодорожном транспорте конструкционных и инструментальных материалах, о взаимодействии системы «состав – структура – свойства – технология», областей их использования. Освоение изложенных сведений даст возможность будущим инженерам квалифицированно решать вопросы повышения ресурса технических устройств за счет наиболее рационального использования свойств конструкционных материалов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст]: учеб. для вузов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Лахтин, Ю.М. Материаловедение [Текст] : учеб. для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с., ил.
3. Металловедение и технология металлов [Текст]: учеб. для вузов / Ю.П. Солнцев [и др.] – М. : Металлургия, 1988. – 512 с.
4. Материаловедение [Текст] : учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.] – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 384 с., ил.
5. Основы материаловедения [Текст] : учеб. для вузов / И.И. Сидорин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1976. – 436 с.
6. Материаловедение [Текст] : учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 6-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 648 с.: ил.
7. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин 2-е изд., испр. и доп. М. : Металлургия, 1981. – 416 с.
8. Андреева, А.В. Основы физикохимии и технологии композитов [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.В. Андреева – М. : ИТРЖР, 2001. – 192 с. : ил.
9. Тылкин, М.А. Справочник термиста ремонтной службы. [Текст] / М.А. Тылкин. – М. : металлургия, 1981. – 647 с.
10. Основы трибологии [Текст] : (А.Н. Буше, гл. 9 Триботехнические материалы и триботехнология) : учеб. для технических вузов / под ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2001. – 664 с.
11. Справочник по конструкционным материалам: справ. / Б.Н. Арзамасов [и др.]; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 640 с.
12. Материаловедение и технология конструкционных материалов для железнодорожной техники [Текст] : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Н.Н. Воронин [и др.] ; под общ. ред. Н.Н. Воронина. – М. : Маршрут, 2004. – 456 с.
13. Технология вагоностроения и ремонта вагонов [Текст] : учеб. для вузов / В.С. Герасимов [и др.] ; под общ. ред. В.С. Герасимова. – 2-е изд. перераб. и доп. М. : Транспорт, 1988. – 381 с.
14. Марочник сталей и сплавов [Текст] / М.М. Колосков [и др.], под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.
15. Жуковец, И.И. Механические испытания металлов [Текст] : учеб. для сред. ПТУ / И.И. Жуковец. – М. : Высш. шк., 1986. – 199 с.

16. Металловедение [Текст] : учебн. для техникумов / А.И. Самохоцкий [и др.]. – М. : Металлургия, 1990. – 416 с.
17. Д.К. Чернов и наука о металлах [Текст] / под ред. Г.З. Нессельштрауса. – М.-Л. : Гос. науч.-техн. изд-во, 1950. – 564 с.
18. Бартельс, Н.А. Металлография и термическая обработка металлов [Текст] / Н.А. Бартельс. – М.-Л. : Гос. науч.-техн. изд-во, 1932. – 376 с.
19. Золотаревский, В.С. Механические свойства металлов [Текст] : учеб. для вузов / В.С. Золотаревский 2-е изд., испр. и доп. М. : Изд-во МИСиС, 1998. – 393 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### 1. ЕВРОПЕЙСКАЯ СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЯ СТАЛЕЙ

#### 1.1. Наименования сталей

##### 1.1.1. Первая группа

Стандарт EN 10027 регламентирует систему обозначения сталей, которая состоит из двух частей:

- часть 1 – определяет порядок наименований (присвоения сталям буквенно-цифровых обозначений);

- часть 2 – правила присвоения сталям порядковых номеров.

Согласно части 1 стандарта EN 10027 стали, по порядку присвоения им наименований, подразделяются на две группы:

- стали, наименования которых определяются их назначением и физическими или механическими свойствами;

- стали, наименования которых определяются их химическим составом.

Наименования состоят из одной или более букв, указывающих на назначение стали, и последующих цифр, обозначающих свойства (табл. 1). За цифрами могут следовать символы, определяющие состояние поставки стали и ее назначение.

Таблица 1

Первая группа сталей по стандарту EN 10027

| Наименование стали (начальная буква)                                                    | Свойство, обозначаемое цифрами                                                                  | Дополнительные символы      |       |       |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                         |                                                                                                 | Первая подгруппа            |       |       | Вторая подгруппа |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Конструкционные стали:<br>S;<br>G – стальное литье (ставится в начале, если необходимо) | Например: S355JO<br>Свойство: минимальный предел текучести (Re) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры) | Работа разрушения при ударе |       |       | Температура      | С – с повышенной пластичностью в холодном состоянии;<br>D – для нанесения покрытий в горячем состоянии;<br>E – для эмалирования;<br>F – дляковки и штамповки;<br>L – для работы при низких температурах;<br>M – термомеханически упрочненная;<br>N – нормализованная;<br>O – для шельфовых конструкций;<br>Q – термообработанная;<br>S – для судостроения;<br>T – для труб;<br>W – стойкая к атмосферной коррозии;<br>G – другие качества (если необходимо) с одной или двумя цифрами. |
|                                                                                         |                                                                                                 | 27 Дж                       | 40 Дж | 60 Дж | °C               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                         |                                                                                                 | JR                          | KR    | LR    | +20              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                         |                                                                                                 | JO                          | KO    | LO    | 0                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                         |                                                                                                 | J2                          | K2    | L2    | -20              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                         |                                                                                                 | J3                          | K3    | L3    | -30              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                         |                                                                                                 | J4                          | K4    | L4    | -40              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                         |                                                                                                 | J5                          | K5    | L5    | -50              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                         |                                                                                                 | J6                          | K6    | L6    | -60              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

## Продолжение прил. 1

### Продолжение табл. 1

| Наименование стали (начальная буква)                                                                          | Свойство, обозначаемое цифрами                                                                                                    | Дополнительные символы                                                                                                                                                                                                         |                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                               |                                                                                                                                   | Первая подгруппа                                                                                                                                                                                                               | Вторая подгруппа                                                                 |
| Стали для котлов и сосудов высокого давления:<br>P;<br>G – стальное литье (ставится вначале, если необходимо) | Например: P265B<br>Свойство: минимальный предел текучести (Re) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры)                                    | M – термомеханически упрочненная;<br>N – нормализованная;<br>Q – термообработанная;<br>B – баллоны со сжатым газом;<br>S – обычные сосуды под давлением;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами | H – высокая температура;<br>L – низкая температура;<br>R – комнатная температура |
| Стали для трубопроводов:<br>L                                                                                 | Например: L360Q<br>Свойство: минимальный предел текучести (Re) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры)                                    | M – термомеханически упрочненная;<br>N – нормализованная;<br>Q – термообработанная;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами                                                                      | Буква и цифра, если необходимо                                                   |
| Стали для машиностроения:<br>E                                                                                | Например: E 295<br>Свойство: минимальный предел текучести (Re) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры)                                    | G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами                                                                                                                                                             | –                                                                                |
| Арматурные стали:<br>B                                                                                        | Например: B 500 N<br>Свойство: минимальный предел текучести (Re) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры)                                  | N – нормальной вытяжки;<br>H – высокой вытяжки;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами                                                                                                          | –                                                                                |
| Стали для предварительно напряженных конструкций:<br>Y                                                        | Например: Y1770 S<br>Свойство: минимальное временное сопротивление (Rm) в Н/мм <sup>2</sup> (четыре цифры)                        | S – холоднотянутая проволока;<br>H – горячекатаные или предварительно напряженные прутки;<br>Q – термообработанная проволока;<br>S – тонкий трос;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами        | –                                                                                |
| Рельсовые стали:<br>R                                                                                         | Например: R0880Mn<br>Свойство: минимальное временное сопротивление (Rm) в Н/мм <sup>2</sup> (четыре цифры, возможен ноль впереди) | Mn – высокое содержание марганца;<br>Cr – легированная хромом;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами                                                                                           | Q – термообработанная проволока                                                  |

Продолжение прил. 1

Окончание табл. 1

| Наименование стали (начальная буква)                                                                                                                                     | Свойство, обозначаемое цифрами                                                                                                                                                                    | Дополнительные символы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
|                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                   | Первая подгруппа                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Вторая подгруппа |
| Холоднокатаный листовой прокат из высокопрочных сталей для холодной штамповки:<br>Н – если установлен предел текучести;<br>НТ – если установлено временное сопротивление | Например: Н420М<br>Свойство: минимальный предел текучести (Re) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры);<br>НТ 510 В<br>Свойство: минимальное временное сопротивление (Rm) в Н/мм <sup>2</sup> (три цифры) | М – термомеханически упрочненная;<br>В – закаленная в печи;<br>Р – легированная фосфором;<br>Х – двухфазная;<br>У – с малым содержанием элементов внедрения (С и N) ;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами                                                                                                                                                                                                       | –                |
| Листовой прокат для холодной штамповки:<br>D                                                                                                                             | Например: DC12ЕК<br>Свойство:<br>С – холоднокатаный;<br>D – горячекатаный;<br>Х – состояние проката (две буквы или цифры)                                                                         | D – для нанесения покрытий в горячем состоянии;<br>ЕК – для эмалирования;<br>DK – для безгрунтового эмалирования;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами                                                                                                                                                                                                                                                           | –                |
| Электротехнические стали:<br>М                                                                                                                                           | Например: М400-50А<br>Свойство: предельно допустимые потери на перемагничивание в Вт/кг, в сотых долях (три цифры)                                                                                | Для магнитной индукции от 1,5 Тесла (при 50Гц):<br>А – с неориентированным зерном;<br>D – нелегированные, без заключительного отжига;<br>Е – легированные, без заключительного отжига;<br>N – с нормальными потерями на перемагничивание.<br>Для магнитной индукции от 1,7 Тесла (при 50Гц):<br>S – с ориентированным зерном и ограниченными потерями на перемагничивание;<br>Р – с ориентированным зерном и низкими потерями на перемагничивание | –                |

Расшифровка примеров марок сталей, приведенных в табл. 1.

**S 355 JO** – конструкционная сталь с минимальным пределом текучести 355 Н/мм<sup>2</sup> и работой разрушения при ударе 27 Дж, измеренной при температуре 0°C.

**P 265 B** – сталь для баллонов со сжатым газом и минимальным пределом текучести 265 Н /м<sup>2</sup>.

**L 360 Q** – сталь для магистральных трубопроводов, термообработанная, с минимальным пределом текучести 360 Н/мм<sup>2</sup>

## Продолжение прил. 1

**Е 295** – машиностроительная сталь с минимальным пределом текучести 295 Н/мм<sup>2</sup>.

**В 500 N** – арматурная сталь с пределом текучести 500 Н/мм<sup>2</sup> нормальной вытяжки.

**Y 1770 C** – холоднотянутая проволока из стали для предварительно напряженных конструкций с минимальным временным сопротивлением 1770 Н/мм<sup>2</sup>.

**R 0880 Mn** – рельсовая сталь с высоким содержанием марганца и минимальным временным сопротивлением 880 Н/мм<sup>2</sup>.

**H 420 M** – листовая высокопрочная сталь для холодной штамповки, термомеханически упрочненная и с минимальным пределом текучести 420 Н/мм<sup>2</sup>.

**HT 510 B** – листовая высокопрочная сталь для холодной штамповки, закаленная в печи с минимальным временным сопротивлением 510 Н/мм<sup>2</sup>.

**DC12 EK** – холоднокатаная листовая сталь для холодной штамповки, для эмалирования.

**M 400-50 A** – электротехническая сталь с предельно допустимыми потерями на перемагничивание 4 Вт/кг для магнитной индукции от 1,5 Тл при частоте 50Гц с неориентированным зерном.

### 1.1.2. Вторая группа

В эту группу включены стали, наименования которых определяются их химическим составом. Группа 2 разделена на подгруппы в зависимости от назначения и содержания легирующих элементов (табл. 2).

Таблица 2

**Вторая группа сталей по стандарту EN 10027**

| Наименование стали (начальная буква)                                                                                                      | Свойство, обозначаемое цифрами                                                      | Дополнительные символы                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нелегированные стали со средним содержанием Mn < 1 % (кроме автоматных):<br>C;<br>G – стальное литье (при необходимости ставится впереди) | Например:<br>C 35 E 4<br>Первое число – среднее содержание углерода в сотых долях % | E – заданное максимальное содержание серы в сотых долях;<br>R – заданный интервал содержания серы в сотых долях;<br>D – для тянутой проволоки;<br>C – с повышенной пластичностью;<br>S – пружинная;<br>T – инструментальная;<br>W – для сварочной проволоки;<br>G – другие качества, (при необходимости) с одной или двумя цифрами |

Продолжение прил. 1

Окончание табл. 2

| Наименование стали<br>(начальная буква)                                                                                                                                                                                                                                            | Свойство, обознача-<br>емое цифрами                                                                                                   | Дополнительные символы                                                                                                                                                                                                                      |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Нелегированные стали с<br>содержанием<br>Mn > 1 %, нелегирован-<br>ные автоматные стали,<br>легированные стали<br>(кроме быстрорежущих)<br>с содержанием каждого<br>легирующего элемента<br>до 5 %:<br>без буквы;<br>Г – стальное литье (при<br>необходимости ставится<br>впереди) | Например:<br>13 Cr Mo 4–5<br>Первое число –<br>среднее содержа-<br>ние углерода в со-<br>тых долях процента<br>(до трех цифр)         | Легирующие элементы:<br>буквы – символы химических элементов;<br>цифры – отделенные тире, соответствуют сред-<br>нему содержанию элемента, умноженному на<br>следующие коэффициенты                                                         |             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                       | Элемент                                                                                                                                                                                                                                     | Коэффициент |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                       | Cr, Co, Mn, Ni, Si, W                                                                                                                                                                                                                       | 4           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                       | Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ti, Ta, V, Zr                                                                                                                                                                                                       | 10          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                       | Ge, N, P, S                                                                                                                                                                                                                                 | 100         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                       | B                                                                                                                                                                                                                                           | 1000        |
| Легированные стали<br>(кроме быстрорежущих)<br>со средним содержа-<br>нием по меньшей мере<br>одного легирующего<br>элемента более 5 %:<br>Х;<br>Г – стальное литье (при<br>необходимости ставится<br>впереди)                                                                     | Например:<br>Х5 Cr Ni 18–10<br>Первое число –<br>среднее содержа-<br>ние углерода в со-<br>тых долях процента<br>(до трех цифр)       | Легирующие элементы:<br>буквы – символы химических элементов, выстро-<br>енные по убыванию их содержания (при одина-<br>ковом содержании – в алфавитном порядке);<br>цифры – соответствуют среднему содержанию<br>элемента (отделены тире). |             |
| Быстрорежущие стали:<br>НС                                                                                                                                                                                                                                                         | Например:<br>НС 2–9–1–8<br>Числа, отделенные<br>тире – содержания<br>легирующих эле-<br>ментов в следую-<br>щем порядке:<br>W–Mo–V–Co | Дополнительные символы не предусмотрены                                                                                                                                                                                                     |             |

Расшифровка примеров марок сталей, приведенных в табл. 2.

**С 35 Е 4** – нелегированная сталь со средним содержанием углерода 0,35 % и содержанием марганца менее 1 %. Максимальное содержание серы – 0,04 %.

**13 Cr Mo 4-5** – нелегированная сталь со средним содержанием: угле-  
рода – 0,13 %; хрома – 1 %; молибдена – 0,5 % и марганца более 1 %.

**Х5 Cr Ni 18-10** – легированная сталь со средним содержанием: угле-  
рода – 0,05 %; хрома – 18,0 %; никеля – 10,0 %.

**НС 2-9-1-8** – быстрорежущая сталь со средним содержанием: угле-  
рода – 0,9...1,0 %; вольфрама – 2,0 %; молибдена – 9,0 %; ванадия –  
1,0 %; кобальта – 8,0 %.

## 1.2. Порядковые номера

Европейский стандарт EN 10027 (часть 2) устанавливает следующую систему присвоения сталям порядковых номеров. Номер стали представляется в виде 1.XXXX, где цифра 1. показывает, что данный материал относится к сталям. В дальнейшем при расширении принятой системы нумерации предполагается использовать последующие цифры для обозначения других материалов (например, в немецкой системе нумерации, являющейся прообразом Европейской, символ О. используется для обозначения чугунов, 2. – для обозначения жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта, 3. – для обозначения цветных металлов и сплавов). Следующие две цифры после 1. определяют номер группы сталей, а две последние – порядковый номер стали в группе, по которому можно определить, к какому типу относится та или иная сталь.

В табл. 3 показаны интервалы номеров, используемых для различных типов сталей. Более подробная классификация приведена непосредственно в стандарте EN 10027 (часть 2).

Таблица 3

Нумерация сталей по стандарту EN 10027

| Стали          |                                      | Порядковые номера |
|----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Нелегированные | Обыкновенного качества               | 1.00XX            |
|                | Качественные                         | 1.01XX – 1.09XX   |
|                | Высококачественные                   | 1.10XX – 1.13XX   |
|                | Инструментальные                     | 1.15XX – 1.18XX   |
| Легированные   | Инструментальные                     | 1.20 XX – 1.28 XX |
|                | Быстрорежущие                        | 1.32 XX – 1.33 XX |
|                | Износостойкие                        | 1.34 XX           |
|                | Подшипниковые                        | 1.35 XX           |
|                | Материалы со специальными свойствами | 1.36 XX – 1.39 XX |
|                | Коррозионно-стойкие                  | 1.40 XX – 1.45 XX |
|                | Жаростойкие и жаропрочные            | 1.46 XX – 1.49 XX |
|                | Высококачественные конструкционные   | 1.50 XX – 1.85 XX |
|                | Свариваемые высококачественные       | 1.87 XX – 1.89 XX |

## 1. СИСТЕМЫ МАРКИРОВКИ СТАЛЕЙ В США

В США используется несколько систем обозначения сплавов, связанных с существующими организациями по стандартизации, из которых наиболее известными являются:

- AISI** – Американский Институт Чугуна и стали;
- ACI** – Американский Институт Литья;
- ANSI** – Американский Национальный Институт Стандартизации;
- AMS** – Спецификация Аэрокосмических Материалов
- ASME** – Американское Общество Инженеров-Механиков;
- ASTM** – Американское Общество Испытания Материалов;
- AWS** – Американское Общество Сварщиков;
- SAE** – Общество Инженеров-Автомобилистов.

Использование различными организациями той или иной системы обозначений регламентируется их историческим развитием и развитием конкретных отраслей промышленности. Наиболее популярными из систем являются: **AISI**, **ASTM** и универсальная **UNS**.

### 1.1. Система обозначений AISI

**Углеродистые и легированные стали** обозначаются четырьмя цифрами: первые две показывают номер группы, а две последние – среднее содержание углерода в сотых долях процента (табл. 1).

Таблица 1

#### Обозначения углеродистых и легированных сталей в системе AISI

| Обозначение               | Группа сталей                                       |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| <i>Углеродистые стали</i> |                                                     |
| 10 XX                     | Нересульфированные: Mn < 1 %                        |
| 11 XX                     | Ресульфированные                                    |
| 12 XX                     | Рефосфорированные и ресульфированные                |
| 15 XX                     | Нересульфенированные: Mn > 1 %                      |
| <i>Легированные стали</i> |                                                     |
| 13 XX                     | 1,75 % Mn                                           |
| 40 XX                     | 0,2; 0,25 % Mo или 0,25 % Mo и 0,042 % S            |
| 41 XX                     | 0,50; 0,80 или 0,95 % Cr и 0,12; 0,20 или 0,30 % Mo |
| 43 XX                     | 1,83 % Ni; 0,50...0,80 % Cr; 0,25 % Mo              |
| 46 XX                     | 0,85 или 1,83 % Ni и 0,20 или 0,25 % Mo             |
| 47 XX                     | 1,05 % Ni; 0,45 % Cr и 0,20 или 0,35 % Mo           |

| Обозначение | Группа сталей                                    |
|-------------|--------------------------------------------------|
| 48 XX       | 3,50 % Ni и 0,25 % Mo                            |
| 51 XX       | 0,80; 0,88; 0,93; 0,95 или 1,00 % Cr             |
| 51 XXX      | 1,03 % Cr                                        |
| 52 XXX      | 1,45 % Cr                                        |
| 61 XX       | 0,60 или 0,95 % Cr и 0,13 % min или 0,15 % min V |
| 86 XX       | 0,55 % Ni; 0,50 % Cr и 0,20 % Mo                 |
| 87 XX       | 0,55 % Ni; 0,50 % Cr и 0,25 % Mo                 |
| 88 XX       | 0,55 % Ni; 0,50 % Cr и 0,35 % Mo                 |
| 92 XX       | 2,00 % Si или 1,40 % Si и 0,70 % Cr              |
| 50 BXX      | 0,28 или 0,50 % Cr                               |
| 51 BXX      | 0,80 % Cr                                        |
| 81 BXX      | 0,30 % Ni; 0,45 % Cr и 0,12 % Mo                 |
| 94 BXX      | 0,45 % Ni; 0,40 % Cr и 0,12 % Mo                 |

Примеры обозначения сталей:

**1045** – сталь относится к группе 10 XX качественных конструкционных нересульфенированных с содержанием углерода 0,45 % и марганца менее 1 %;

**4032** – легированная сталь (группа 40 XX) со средним содержанием: углерода 0,32 % и 0,2 или 0,25 % молибдена;

**8625** – легированная сталь (группа 86 XX) со средним содержанием: углерода 0,25 %; 0,55 % никеля; 0,5 % хрома и 0,2 % молибдена.

Кроме четырех цифр в наименованиях сталей могут встречаться и буквы. Буквы В и L означают, что сталь легирована соответственно бором (0,0005...0,03 %) или свинцом (0,15...0,35 %). Буквы ставятся между второй и третьей цифрой обозначения, например, 51 В 60 или 15 L 48. Буквы М и Е ставятся впереди наименования стали и означают, что сталь предназначена для производства неответственного сортового проката (буква М) или выплавлена в электропечи (буква Е). В конце наименования может присутствовать буква Н, означающая, что сталь имеет высокую прокаливаемость.

Коррозионно-стойкие стали обозначаются тремя цифрами и следующими за ними одной, двумя или более буквами. Первая цифра показывает класс стали. Так, например, аустенитные коррозионно-стойкие стали начинаются с цифр 2 XX и 3 XX, а ферритные или мартенситные – 4 XX. Последние две цифры определяют порядковый номер стали в группе.

Значения букв, следующих за цифрами, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Дополнительные буквы и цифры в обозначениях  
коррозионно-стойких сталей по системе обозначений AISI**

| Символ AISI | Описание                                                  |
|-------------|-----------------------------------------------------------|
| XXX L       | Низкое содержание углерода (менее 0,03 %)                 |
| XXX S       | Нормальное содержание углерода (менее 0,08 %)             |
| XXX N       | Добавлен азот                                             |
| XXX LN      | Низкое содержание углерода (менее 0,03 %) и добавлен азот |
| XXX F       | Повышенное содержание серы и фосфора                      |
| XXX Se      | Добавлен селен                                            |
| XXX B       | Добавлен кремний                                          |
| XXX H       | Расширенный интервал содержания углерода                  |
| XXX Cu      | Добавлена медь                                            |

Примеры обозначений:

**304** – сталь аустенитного класса, с содержанием углерода менее 0,08 %;

**410** – сталь феррито-мартенситного класса, с содержанием углерода менее 0,15 %;

**410 S** – сталь феррито-мартенситного класса, с содержанием углерода менее 0,08 %.

## 1.2. Система обозначений ASTM

В системе ASTM обозначение сталей включает:

- букву А, означающую, что речь идет о черном металле;
- порядковый номер нормативного документа ASTM (стандарта);
- собственно обозначения марки стали.

Обычно в стандартах ASTM принята американская система обозначений физических величин. В том случае, когда в стандарте приводится метрическая система обозначений, после его номера ставится буква М.

Стандарты ASTM, как правило, определяют не только химический состав стали, но и полный перечень требований к металлопродукции.

Например, в стали A516/A516M-90 Grade 70 буква А указывает на то, что материал относится к черным металлам; 516 – это порядковый номер стандарта ASTM (516M – тот же стандарт, но в метрической системе обозначений); 90 – год издания стандарта; Grade 70 – марка стали (здесь 70 показывает минимальный предел прочности при испытаниях на растяжение, в ksi, что составляет около 485 Н/мм<sup>2</sup>).

Для обозначения собственно марок сталей и определения их химического состава может быть использована как собственная система обозначений ASTM (в этом случае химический состав и их маркировка указываются непосредственно в стандарте), так и другие системы обозначений, например, AISI – для прутков, проволоки, заготовки и др. или ACI – для отливок из коррозионно-стойких сталей.

### 1.3. Универсальная система обозначений UNS

Универсальная система UNS была создана в 1975 г. для унификации различных систем обозначений, используемых в США. Согласно UNS обозначения сталей состоят из буквы, определяющей группу сталей и пяти цифр (табл. 3).

Таблица 3

**Обозначения сталей в системе UNS**

| Символ  | Группа сталей                                                   |
|---------|-----------------------------------------------------------------|
| D XXXXX | Стали с предписанными механическими свойствами                  |
| G XXXXX | Углеродистые и легированные стали AISI (кроме инструментальных) |
| H XXXXX | То же, но для прокаливаемых сталей                              |
| J XXXXX | Литейные стали                                                  |
| K XXXXX | Стали, не включенные в систему AISI                             |
| S XXXXX | Жаростойкие и коррозионно-стойкие стали                         |
| T XXXXX | Инструментальные стали                                          |
| W XXXXX | Сварочные материалы                                             |

В системе UNS проще всего классифицировать стали AISI. Для конструкционных и легированных сталей, входящих в группу G, первые четыре цифры – это обозначение стали в системе AISI, а последняя цифра заменяет буквы, которые встречаются в обозначениях по AISI. Так, например, буквам В и L, означающим, что сталь легирована бором или свинцом, соответствуют цифры 1 и 4. Букве Е, показывающей, что сталь выплавлена в электропечи – цифра 6.

Наименования коррозионно-стойких AISI – сталей (табл. 2) начинаются с буквы S и включают обозначение стали по AISI (первые три цифры) и две дополнительные цифры, соответствующие дополнительным буквам в обозначении по AISI (табл. 4).

Таблица 4

**Соответствие символов AISI и UNS**

|             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Символ AISI | XXXL  | XXXS  | XXXN  | XXXLN | XXXF  | XXXSe | XXXB  | XXXH  | XXXCu |
| Символ UNS  | XXX01 | XXX08 | XXX51 | XXX53 | XXX20 | XXX23 | XXX15 | XXX09 | XXX30 |

**Примеры обозначения сталей в системе UNS.** Углеродистая сталь 1045 имеет обозначение в системе UNS G10450, а легированная сталь 4032 – G 40320. Сталь 51B60 (легированная бором) называется в системе UNS G 51601, а сталь 15 L 48 (легированная свинцом) – G 15484. Коррозионно-стойкие стали обозначаются: 304L – S30401, 304H – S30409, а 304 Cu – S30430 и т. д.

## 1. СИСТЕМА МАРКИРОВКИ СТАЛЕЙ В ЯПОНИИ

### 1.1. Конструкционные стали

#### 1.1.1. Углеродистые стали обычного качества

Наименования марок сталей, как правило, состоят из ряда букв и цифр. Буквы определяют группу, к которой относится сталь, а цифры – ее порядковый номер в группе или какое-либо свойство (например, содержание углерода, предел прочности и др.).

Наименование начинается с букв SS, за которыми следуют три цифры (SSXXX), указывающие минимальный предел прочности в Н/мм<sup>2</sup>. Например, SS 330 – углеродистая сталь обычного качества с пределом прочности 330 Н/мм<sup>2</sup>.

#### 1.1.2. Углеродистые качественные стали

Эти стали обозначаются буквой S, за которой следуют две цифры, показывающие среднее содержание углерода в сотых долях процента. За цифрами следует буква C (SXXC). Например: S12C – углеродистая качественная сталь с содержанием углерода 0,1...0,15 %.

Если сталь имеет пониженное содержание серы и фосфора, то в конце ее наименования проставляется буква K (S15CK).

#### 1.1.3. Стали для поковок

Обозначение начинается с букв SF. Далее, в зависимости от назначения поковок, следует несколько буквенных символов и цифра, указывающая на порядковый номер стали в группе (в скобках приведены примеры):

- поковки для сосудов высокого давления из углеродистых сталей – SFVC x (SFVC 1, SFVC 2A и т. д.);
- поковки для сосудов высокого давления из легированных сталей – SFVA F x (SFVA F9, SFVA F21 A и др.);
- поковки для сосудов высокого давления для работы при низких температурах – SFL x (SFL 1, SFL 3 и др.);
- высокопрочные поковки из хромомолибденовых легированных сталей для работы при высоких температурах SFVCM Fx (SFVCM F 22 B, SFVCM F3 V и т. д.).

#### 1.1.4. Стали для производства листового проката

Маркировка начинается с букв SP. Далее, в зависимости от типа, могут следовать другие буквы и цифры:

- горячекатаный лист – SPHx, где x – C, D, E определяет различные модификации стали (SPHC, SPHE и т. д.);
- холоднокатаный лист – SPCx, где x – C, D, E – различные модификации стали (SPCD, SPCE и т. д.);
- горячекатаный лист для производства труб – SPHT x, где x – порядковый номер стали в группе (SPHT 1, SPHT 3 и др.).

#### 1.1.5. Стали для производства труб

Обозначаются буквами ST, далее следуют буквы, определяющие назначение стали и цифры:

- трубы из углеродистых сталей общего назначения – STK xxx, где xxx – цифры, показывающие предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STK 290, STK 450 и т. д.);
- трубы из углеродистых сталей для машиностроения – STKM x, где x – порядковый номер стали в группе (STKV 12A, STKM 16C и др.);
- трубы для работы при высоких давлениях из углеродистых сталей STPG xxx или STS xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STPG 410, STS 480 и др.);
- трубы для работы при высоких температурах из углеродистых сталей STPT xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STPT 410, STPT 480 и др.);
- трубы из легированных сталей STPA x, где x – порядковый номер стали в группе (STPA12, STPA 24 и др.);
- трубы для работы при низких температурах – STPL xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STPL 380, STPL 450 и т. д.);
- трубы для котлов и теплообменников из углеродистых сталей – STB xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STB 410, STB 520 и др.);
- трубы для котлов и теплообменников из легированных сталей – STBA x, где x – порядковый номер стали в группе (STBA 20, STBA 25 и др.);
- трубы для теплообменников для работы при низких температурах – STBL xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STBL 380, STBL 440 и др.);
- трубы для нагревателей нелегированные – STF xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STF 260, STF 430 и др.);

- трубы для нагревателей легированные – STFA x, где x – порядковый номер стали в группе (STFA 8, STFA 24 и т. д.);
- квадратные трубы – STKR xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (STKR 400, STKR 490 и др.).

#### 1.1.6. Арматурные стали

Маркируются SR xxx или SD xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup>. Буквы R и D определяют положение ребер на поверхности прутка (SR 235, SD 295 и др.).

#### 1.1.7. Стали для производства катанки

Обозначаются буквами SWR, за которыми следуют другие буквы и цифры:

- низкоуглеродистые стали – SWRM x, где x – порядковый номер в группе (SWRM 6, SWRM 17 и т. д.);
- высокоуглеродистые стали SWRH x, где x – порядковый номер в группе (SWRH 32, SWRH 62 B и др.);
- катанка для последующей холодной обработки (штамповка, волочение) – SWRCH x, где x – порядковый номер в группе. Если показывается степень раскисления, то в конце обозначения добавляются буквы R – кипящая, K – спокойная, A – успокоенная добавлением алюминия (SWRCH 8R, SWRCH 19A, SWRCH 40K и др.);
- катанка для последующей холодной обработки (штамповка, волочение), легированная бором – SWRCHB xxx, где xxx – предел прочности в Н/мм<sup>2</sup> (SWRCHB 231, SWRCHB 734 и т. д.);

#### 1.1.8. Автоматные стали

Маркируются буквами SUM, за которыми следуют две цифры, показывающие порядковый номер стали в группе – SUM xx. В случае легирования стали свинцом к ее обозначению добавляется буква L (SUM 12, SUM 31L и др.).

#### 1.1.9. Стали для заклепок

Обозначаются SV xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (SV 330, SV 400 и др.)

1.1.10. Стали для цепей

Маркируются SBC xxx, где xxx – предел прочности, Н/мм<sup>2</sup> (SBC 300, SBC 450 и т. д.)

1.1.11. Пружинные стали

Обозначаются буквами SUP с последующим порядковым номером в группе (SUP 6, SUP 14 и др.).

1.1.12. Легированные стали

Наименования включают буквы и цифры. Первой буквой всегда является буква S, за которой следуют буквы, определяющие наличие основных легирующих элементов. Для этого могут использоваться как общепринятые их символы, так и заглавные буквы их наименований (С – хром, М – молибден, N – никель, S – кремний, А – алюминий). После букв следуют одна, две или три цифры. Если цифр одна или две, то они определяют номер стали в группе. Если цифр три, то первая из них – порядковый номер, а две последних – среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Примеры обозначений:

**SNC 815** – сталь легированная никелем и хромом, восьмой номер, со средним содержанием углерода 0,15 %;

**SACM 645** – сталь легированная алюминием, хромом и молибденом. Среднее содержание углерода 0,45 %. Порядковый номер 6.

**SMN 18** – сталь легированная молибденом и никелем. Порядковый номер 18. В конце наименования может присутствовать буква Н, указывающая на особенности прокаливаемости (SMnC 443Н).

1.2. Инструментальные стали

1.2.1. Инструментальные углеродистые

Обозначение состоит из букв SK и порядкового номера стали в группе (SK 2, SK 6 и др.).

1.2.2. Инструментальные легированные

Маркируются буквами SKD, SKS или SKT и порядковым номером стали в группе (SKD 6, SKS 42, SKT 5 и т. д.)

### **1.2.3. Быстрорежущие стали**

Обозначаются буквами SKH, за которыми следуют порядковые номера (SKH 3, SKH 54).

### **1.3. Подшипниковые стали**

Обозначение состоит из букв SUJ и порядкового номера (SUJ 2, SUJ 7).

### **1.4. Коррозионно-стойкие стали**

Для обозначения коррозионно-стойких сталей в Японии используется система обозначений AISI. При этом к цифровым обозначениям AISI добавляются в начале буквы SUS (SUS 410, SUS 316L, SUS 321H и др.).

После букв SUS или в конце наименования могут быть добавлены другие буквы:

F – сталь используется для производства поковок (SUS F 321, SUS F 304 L);

Y – сталь для изготовления сварочной проволоки (SUS Y 308 L, SUS Y 321 и др.);

TP – сталь для производства труб (SUS 304 TP, SUS 321 HTP и т. д.).

### **1.5. Жаропрочные стали**

Эта группа обозначается буквами SUH, за которыми может следовать номер стали (одна или две цифры) или обозначение в системе AISI в виде трех цифр (SUH 4, SUH 21, SUH 310 и т. д.).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                   | 3  |
| 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ .....                                                                                                    | 6  |
| 1.1. Определение и классификация металлов .....                                                                                                 | 6  |
| 1.2. Строение металлов .....                                                                                                                    | 7  |
| 1.3. Полиморфные превращения металлов .....                                                                                                     | 11 |
| 1.4. Дефекты строения кристаллов .....                                                                                                          | 13 |
| 1.4.1. Точечные дефекты .....                                                                                                                   | 13 |
| 1.4.2. Линейные дефекты.....                                                                                                                    | 14 |
| 1.4.3. Поверхностные дефекты .....                                                                                                              | 16 |
| 1.5. Диффузия в металлах и сплавах.....                                                                                                         | 17 |
| 1.6. Деформации и механические свойства металлов .....                                                                                          | 18 |
| 1.6.1. Механические свойства, определяемые<br>при статических нагрузках .....                                                                   | 20 |
| 1.6.2. Механические свойства, определяемые<br>при динамических нагрузках.....                                                                   | 23 |
| 1.7. Кристаллизация металлов.....                                                                                                               | 24 |
| 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ СПЛАВОВ .....                                                                                                      | 32 |
| 2.1. Виды сплавов.....                                                                                                                          | 32 |
| 2.2. Диаграммы состояния двойных сплавов.....                                                                                                   | 36 |
| 2.2.1. Общие положения .....                                                                                                                    | 36 |
| 2.2.2. Порядок построения диаграмм.....                                                                                                         | 37 |
| 2.2.3. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой образуют<br>механические смеси (I рода) .....                                            | 40 |
| 2.2.4. Правило отрезков .....                                                                                                                   | 41 |
| 2.2.5. Диаграмма состояния сплавов, компоненты<br>которой неограниченно растворимы в жидком<br>и твердом состояниях (II рода).....              | 43 |
| 2.2.6. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой<br>неограниченно растворимы в жидком состоянии<br>и ограничено в твердом (III рода)..... | 44 |
| 2.2.7. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой<br>в твердом виде образуют устойчивые химические<br>соединения (IV рода).....            | 48 |
| 2.2.8. Связь между диаграммами состояний и свойствами<br>двухкомпонентных сплавов .....                                                         | 50 |
| 3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ .....                                                                                                              | 51 |
| 3.1. Диаграмма состояния железо-цементит ( $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ ) .....                                                              | 51 |
| 3.1.1. Общие положения .....                                                                                                                    | 51 |
| 3.1.2. Компоненты, фазы, линии и точки диаграммы $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ .....                                                          | 55 |
| 3.1.3. Перитектическое превращение .....                                                                                                        | 60 |
| 3.1.4. Эвтектоидное превращение .....                                                                                                           | 62 |
| 3.1.5. Эвтектическое превращение .....                                                                                                          | 67 |
| 3.2. Стали .....                                                                                                                                | 70 |
| 3.2.1. Общая классификация.....                                                                                                                 | 70 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.2. Углеродистые стали .....                                            | 72  |
| 3.2.3. Легированные стали .....                                            | 79  |
| 3.2.4. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами .....               | 91  |
| 3.3. Конструкционные чугуны .....                                          | 92  |
| 3.3.1. Серые чугуны .....                                                  | 93  |
| 3.3.2. Высокопрочные чугуны.....                                           | 95  |
| 3.3.3. Ковкие чугуны.....                                                  | 96  |
| 3.3.4. Специальные чугуны .....                                            | 97  |
| 4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....                                        | 98  |
| 5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ.....                                       | 102 |
| 5.1. Общие положения .....                                                 | 102 |
| 5.2. Превращения в стали при нагреве .....                                 | 104 |
| 5.3. Превращения в стали при охлаждении .....                              | 106 |
| 5.3.1. Перлитное превращение аустенита .....                               | 106 |
| 5.3.2. Мартенситное превращение.....                                       | 108 |
| 5.3.3. Промежуточное (бейнитное) превращение аустенита.....                | 110 |
| 5.4. Технология термической обработки стали.....                           | 110 |
| 5.4.1. Отжиг.....                                                          | 110 |
| 5.4.2. Нормализация .....                                                  | 112 |
| 5.4.3. Закалка .....                                                       | 113 |
| 5.4.4. Отпуск закаленной стали .....                                       | 115 |
| 5.5. Особенности закалки легированных сталей .....                         | 116 |
| 6. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ .....                                | 118 |
| 6.1. Общие сведения.....                                                   | 118 |
| 6.2. Цементация.....                                                       | 118 |
| 6.3. Азотирование.....                                                     | 120 |
| 6.4. Насыщение поверхностного слоя одновременно<br>углеродом и азотом..... | 121 |
| 6.5. Диффузионная металлизация.....                                        | 121 |
| 7. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ .....                                          | 122 |
| 7.1. Общие сведения.....                                                   | 122 |
| 7.2. Алюминиевые сплавы.....                                               | 135 |
| 7.2.1. Классификация алюминиевых сплавов.....                              | 135 |
| 7.2.2. Состав, структура и свойства алюминиевых сплавов.....               | 138 |
| 7.2.3. Термическая обработка алюминиевых сплавов.....                      | 149 |
| 7.2.4. Применение алюминиевых сплавов .....                                | 156 |
| 7.3. Медные сплавы .....                                                   | 156 |
| 7.3.1. Классификация и обозначение медных сплавов.....                     | 156 |
| 7.3.2. Латуни .....                                                        | 159 |
| 7.3.3. Бронзы .....                                                        | 161 |
| 7.3.4. Медно-никелевые сплавы.....                                         | 167 |
| 7.3.5. Применение меди и ее сплавов .....                                  | 169 |
| 7.4. Сплавы на основе магния.....                                          | 169 |
| 7.5. Сплавы на основе титана .....                                         | 172 |
| 7.6. Сплавы на основе никеля .....                                         | 174 |
| 7.7. Антифрикционные материалы .....                                       | 175 |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.8. Фрикционные материалы .....                                 | 181 |
| 7.9. Припои.....                                                 | 183 |
| 8. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ .....                               | 186 |
| 8.1. Пластмассы.....                                             | 186 |
| 8.2. Резины.....                                                 | 191 |
| 9. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ<br>ТРАНСПОРТЕ..... | 192 |
| 10. ЗАДАНИЯ НА САМОСТОЯТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ.....                       | 196 |
| 10.1. Общие требования.....                                      | 196 |
| 10.2. Работа № 1 по разделу «Железоуглеродистые сплавы».....     | 197 |
| 10.2.1. Вопросы к работе № 1.....                                | 197 |
| 10.2.2. Задачи к работе № 1 .....                                | 198 |
| 10.3. Работа № 2 по разделу «Термическая обработка стали».....   | 199 |
| 10.3.1. Вопросы к работе № 2.....                                | 199 |
| 10.3.2. Задачи к работе № 2 .....                                | 200 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                 | 202 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....                                    | 203 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Европейская система обозначения сталей .....       | 205 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Системы маркировки сталей в США .....              | 211 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Система маркировки сталей в Японии.....            | 216 |

Учебное издание

**Бабенко** Эдуард Гаврилович

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ  
ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Учебное пособие

Редактор *Г.Ф. Иванова*  
Технический редактор *А.А. Курилко*

---

План 2014 г. Поз. 1.8. Подписано в печать 21.01.0214.  
Уч.-изд. л. 14,0. Усл. печ. л. 13,0. Зак. 5. Тираж 145 экз. Цена 342 руб.

---

Издательство ДВГУПС  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.