

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Курс лекций

г. Архангельск

2009

Введение

Материаловедение — наука о связях между составом, строением и свойствами материалов и закономерностях их изменений при внешних физико-химических воздействиях.

Все материалы по химической основе делятся на две основные группы — *металлические и неметаллические*. К металлическим относятся металлы и их сплавы. Металлы составляют более 2/3 всех известных химических элементов.

В свою очередь, металлические материалы делятся на черные и цветные. К *черным* относятся железо и сплавы на его основе — стали и чугуны. Все остальные металлы относятся к *цветным*. Чистые металлы обладают низкими механическими свойствами по сравнению со сплавами, и поэтому их применение ограничивается теми случаями, когда необходимо использовать их специальные свойства (например, магнитные или электрические).

Практическое значение различных металлов не одинаково. Наибольшее применение в технике приобрели черные металлы. На основе железа изготавливают более 90% всей металлопродукции. Однако цветные металлы обладают целым рядом ценных физико-химических свойств, которые делают их незаменимыми. Из цветных металлов наибольшее промышленное значение имеют алюминий, медь, магний, титан и др.

Кроме металлических, в промышленности значительное место занимают различные неметаллические материалы — пластмассы, керамика, резина и др. Их производство и применение развивается в настоящее время опережающими темпами по сравнению с металлическими материалами. Но использование их в промышленности невелико (до 10%) и предсказание тридцатилетней давности о том, что неметаллические материалы к концу века существенно потеснят металлические, не оправдалось.

1. Качество и свойства материалов

1.1 Качество материалов и его оценка

Качеством материала называется совокупность его свойств, удовлетворяющих определенные потребности в соответствии с назначением. Уровень качества определяется соответствующими *показателями*, представляющими собой количественную характеристику одного или нескольких свойств материалов, которые определяют их качество применительно к конкретным условиям изготовления и использования. По количеству характеризующих свойств показатели качества подразделяются на единичные и комплексные. *Единичный* показатель качества характеризуется только одним свойством (например, твердость стали). *Комплексный* показатель характеризуется несколькими свойствами продукции. При этом продукция считается качественной только в том случае, если весь комплекс оцениваемых свойств удовлетворяет установленным требованиям качества. Примером комплексного показателя качества стали могут служить оценка химического состава, механических свойств, микро- и макроструктуры. *Комплексные* показатели качества устанавливаются государственными стандартами.

Методы контроля качества могут быть самые разнообразные: визуальный осмотр, органолептический анализ и инструментальный контроль. По стадии определения качества различают контроль предварительный, промежуточный и окончательный.

При предварительном контроле оценивается качество исходного сырья, при промежуточном — соблюдение установленного технологического процесса. Окончательный контроль определяет качество готовой продукции, ее годность и соответствие стандартам. Годной считается продукция, полностью отвечающая требованиям стандартов и технических условий. Продукция, имеющая дефекты и отклонения от стандартов, считается браком.

Качество материала определяется главным образом его свойствами, химическим составом и структурой. Причем свойства материала зависят от структуры, которая, в свою очередь, зависит от химического состава. Поэтому при оценке качества могут определяться свойства, состав и оцениваться структура материала. Свойства материалов и методы определения некоторых из них изложены в следующих разделах. Химический состав может определяться химическим анализом или спектральным анализом.

Существуют различные методы изучения структуры материалов. С помощью макроанализа изучают структуру, видимую невооруженным глазом или при небольшом увеличении с помощью лупы. Макроанализ позволяет выявить различные особенности строения и дефекты (трещины, пористость, раковины и др.). Микроанализом называется изучение структуры с помощью оптического микроскопа при увеличении до 3000 раз. Электронный микроскоп позволяет изучать структуру при увеличении до 25000 раз.

Рентгеновский анализ применяют для выявления внутренних дефектов. Он основан на том, что рентгеновские лучи, проходящие через материал и через дефекты, ослабляются в разной степени. Глубина проникновения рентгеновских лучей в сталь составляет 80 мм. Эту же физическую основу имеет просвечивание гамма-лучами, но они способны проникать на большую глубину (для стали — до 300мм). Просвечивание радиолучами сантиметрового и миллиметрового диапазона позволяет обнаружить дефекты в поверхностном слое неметаллических материалов, так как проникающая способность радиоволн в металлических материалах невелика.

Магнитная дефектоскопия позволяет выявить дефекты в поверхностном слое (до 2 мм) металлических материалов, обладающих магнитными свойствами и основана на искажении магнитного поля в местах дефектов.

Ультразвуковая дефектоскопия позволяет осуществлять эффективный контроль качества на большой «дубине». Она основана на том, что при наличии дефекта интенсивность проходящего через материал ультразвука меняется.

Капиллярная дефектоскопия служит для выявления невидимых глазом тонких трещин. Она использует эффект заполнения этих трещин легко смачивающими материал жидкостями.

1.2 Механические свойства материалов

Механические свойства характеризуют способность материалов сопротивляться действию внешних сил. К основным механическим свойствам относятся прочность, твердость, ударная вязкость, упругость, пластичность, хрупкость и др.

Прочность — это способность материала сопротивляться разрушающему воздействию внешних сил.

Твердость — это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела под действием нагрузки.

Вязкость называется свойство материала сопротивляться разрушению под действием динамических нагрузок.

Упругость — это свойство материалов восстанавливать свои размеры и форму после прекращения действия нагрузки.

Пластичность называется способность материалов изменять свои размеры и форму под действием внешних сил, не разрушаясь при этом.

Хрупкость — это свойство материалов разрушаться под действием внешних сил без остаточных деформаций.

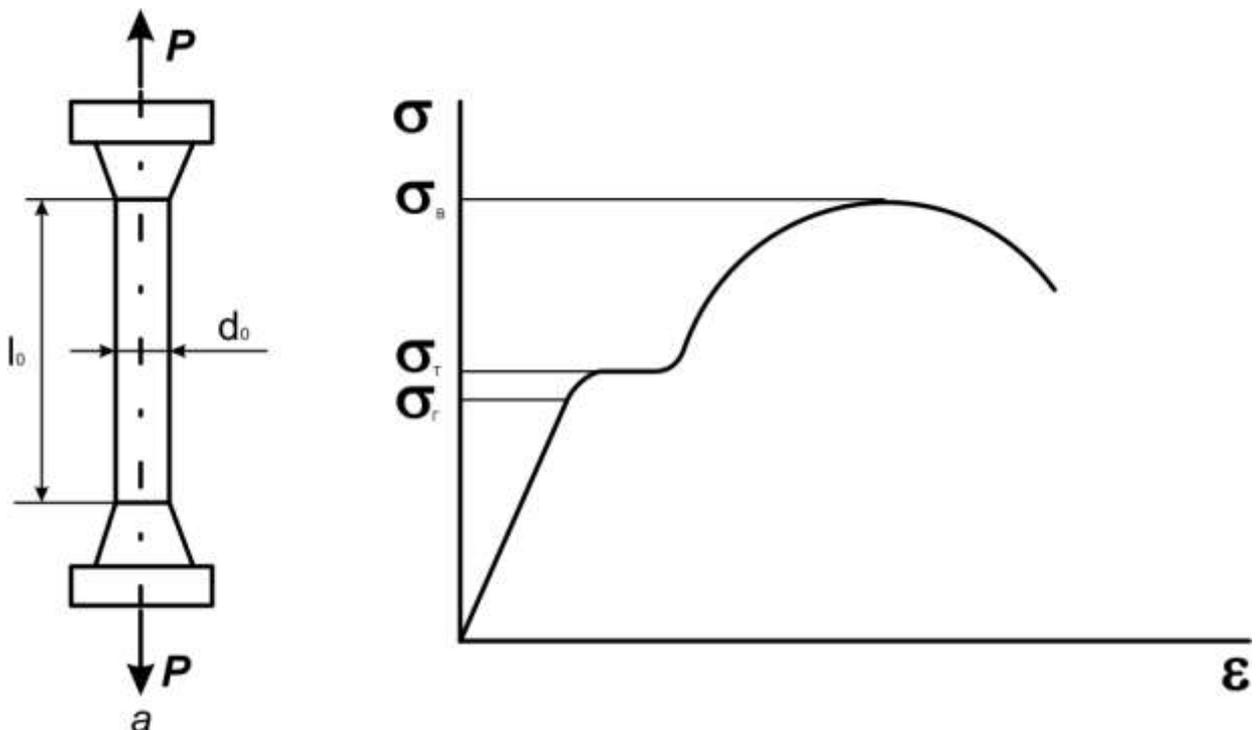


Рис. 1 Статические испытания на растяжение:

а – схема испытания; б – диаграмма растяжения

При статических испытаниях на растяжение определяют величины, характеризующие прочность, пластичность и упругость материала. Испытания производятся на цилиндрических (или плоских) образцах с определенным соотношением между длиной l_0 и диаметром d_0 . Образец растягивается под действием приложенной силы P (рис. 1,а) до разрушения. Внешняя нагрузка вызывает в образце напряжение и деформацию. Σ — это отношение силы P к площади поперечного сечения F , МПа:

$$\sigma = \frac{P}{F},$$

Деформация характеризует изменение размеров образца под действием нагрузки, %:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где: l — длина растянутого образца.

Деформация может быть упругой (исчезающей после снятия нагрузки) и *пластической* (остающейся после снятия нагрузки).

При испытаниях строится диаграмма растяжения, представляющая собой зависимость напряжения от деформации. На рис. 1,б приведена такая диаграмма для низкоуглеродистой стали. После проведения испытаний определяются следующие характеристики механических свойств.

Предел упругости σ_y — это максимальное напряжение при котором в образце не возникают пластические деформации.

Предел текучести σ_T — это напряжение, соответствующее площадке текучести на диаграмме растяжения (рис. 1,б). Если на диаграмме нет площадки текучести (что наблюдается для хрупких материалов), то определяют *условный предел текучести* $\sigma_{0,2}$ — напряжение, вызывающее пластическую деформацию, равную 0,2%.

Предел прочности (или временное сопротивление) σ_b — это напряжение, отвечающее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец при испытании.

Относительное удлинение после разрыва δ — отношение приращения длины образца при растяжении к начальной длине l_0 , %:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где l_k — длина образца после разрыва.

Относительным сужением после разрыва ψ называется уменьшение площади поперечного сечения образца, отнесенное к начальному сечению образца, %:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100,$$

где F_k — площадь поперечного сечения образца в месте разрыва. Относительное удлинение и относительное сужение характеризуют пластичность материала.

Твердость металлов измеряется путем вдавливания в испытуемый образец твердого наконечника различной формы.

Метод Бринелля основан на вдавливании в поверхность металла стального закаленного шарика под действием определенной нагрузки. После снятия нагрузки в образце остается отпечаток. Число твердости по Бринеллю НВ определяется отношением нагрузки, действующей на шарик, к площади поверхности полученного отпечатка.

Метод Роквелла основан на вдавливании в испытуемый образец закаленного стального шарика диаметром 1,588 мм (шкала В) или алмазного конуса с углом при вершине 120° (шкалы А и С). Вдавливание производится под действием двух нагрузок — предварительной равной 100 Н и окончательной равной 600, 1000, 1500 Н для шкал А, В и С соответственно. Число твердости по Роквеллу HRA, HRB и HRC определяется по разности глубин вдавливания.

В методе Виккерса применяют вдавливание алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136° . Число твердости по Виккерсу HV определяется отношением приложенной нагрузки к площади поверхности отпечатка.

Ударная вязкость определяется работой A , затраченной на разрушение образца, отнесенной к площади его поперечного сечения F ; Дж/м²:

$$KV = \frac{A}{F}$$

Испытания проводятся ударом специального маятникового копра. Для испытания применяется стандартный надрезанный образец, устанавливаемый на опорах копра. Маятник определенной массы наносит удар по стороне противоположной надрезу.

1.3 Технология материалов и технологические свойства

Технология материалов представляет собой совокупность современных знаний о способах производства материалов и средствах их переработки в целях изготовления изделий различного назначения. Металлы и сплавы производят путем выплавки при высоких температурах из различных металлических руд. Отрасль промышленности, занимающаяся производством металлов и сплавов, называется металлургией. Полимеры (пластмассы, резина, синтетические волокна)

изготавливаются чаще всего с помощью процессов органического синтеза. Исходным сырьем при этом служат нефть, газ, каменный уголь.

Готовые изделия и заготовки для дальнейшей обработки из металлов и сплавов производятся путем литья или обработки давлением. Литейное производство занимается изготовлением изделий путем заливки расплавленного металла в специальную форму, внутренняя полость которой имеет конфигурацию изделия. Различают литье в песчаные формы (в землю) и специальные способы литья. Песчаные литейные формы изготавливаются путем уплотнения формовочных смесей, основой которых является кварцевый песок. К специальным способам относится литье в кокиль, литье под давлением, центробежное литье, литье в оболочковые формы, литье по выплавляемым моделям. Кокиль — это специальная металлическая форма. При литье под давлением заливка металла в металлическую форму и его застывание происходит под избыточным давлением. При центробежном литье металл заливается во вращающуюся металлическую форму. Оболочковые формы состоят из мелкого песка со связующим. При литье по выплавляемым моделям керамическая форма изготавливается путем погружения модели из легкоплавкого материала (парафина, стеарина) в керамическую суспензию и последующей выплавки модели из формы. Сплавы, предназначенные для получения деталей литьем, называются *литейными*.

Обработкой металлов давлением называют изменение формы заготовки под воздействием внешних сил. К видам обработки металлов давлением относятся прокатка, прессование, волочение, ковка и штамповка. *Прокатка* заключается в обжатии заготовки между вращающимися валками. При *прессовании* металл выдавливается из замкнутого объема через отверстие. *Волочение* заключается в протягивании заготовки через отверстие. *Ковкой* называется процесс свободного деформирования металла ударами молота или давлением пресса. **Штамповкой** получают детали с помощью специального инструмента — штампа, представляющего собой металлическую разъемную форму, внутри которой расположена полость, соответствующая конфигурации детали. Сплавы, предназначенные для получения деталей обработкой давлением, называют *деформируемыми*.

Сравнительно новым направлением производства металлических деталей является **порошковая металлургия**, которая занимается производством деталей из металлических порошков путем прессования и спекания.

Изделия из пластмасс получают путем **прессования, литья или выдавливания**. Резиновые изделия получают обработкой между валами (каландрированием), выдавливанием, прессованием или литьем с последующей. Изделия из керамических материалов получают путем формования и обжига или прессования и спекания.

Сваркой называется технологический процесс получения неразъемных соединений материалов путем установления межатомных связей между свариваемыми частями при их нагреве или пластическом деформировании или совместном действии того и другого. Сваркой соединяют однородные и разнородные металлы и их сплавы, металлы с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом), а также пластмассы.

Заключительной стадией изготовления изделий часто является обработка резанием, заключающаяся в снятии с заготовки режущим инструментом слоя материала в виде стружки. В результате этого заготовка приобретает правильную форму, точные размеры, необходимое качество поверхности.

Технологические свойства определяют способность материалов подвергаться различным видам обработки. Литейные свойства характеризуются способностью металлов и сплавов в расплавленном состоянии хорошо заполнять полость литейной формы и точно воспроизводить ее очертания (жидкотекучестью), величиной уменьшения объема при затвердевании (усадкой), склонностью к образованию трещин и пор, склонностью к поглощению газов в расплавленном состоянии.

Ковкость — это способность металлов и сплавов подвергаться различным видам обработки давлением без разрушения.

Свариваемость определяется способностью материалов образовывать прочные сварные соединения.

Обрабатываемость резанием определяется способностью материалов поддаваться обработке режущим инструментом.

1.4 Физические, химические и эксплуатационные свойства материалов

К **физическим свойствам** материалов относятся плотность, температура плавления, электропроводность, теплопроводность, магнитные свойства, коэффициент температурного расширения и др.

Плотностью называется отношение массы однородного материала к единице его объема. Это свойство важно при использовании материалов в авиационной и ракетной технике, где создаваемые конструкции должны быть легкими и прочными.

Температура плавления — это такая температура, при которой металл переходит из твердого состояния в жидкое. Чем ниже температура плавления металла, тем легче протекают процессы его плавления, сварки и тем они дешевле.

Электропроводностью называется способность материала хорошо и без потерь на выделение тепла проводить электрический ток. Хорошей электропроводностью обладают металлы и их сплавы, особенно медь и алюминий. Большинство неметаллических материалов не способны проводить электрический ток, что также является важным свойством, используемым в электроизоляционных материалах.

Теплопроводность — это способность материала переносить теплоту от более нагретых частей тел к менее нагретым. Хорошей теплопроводностью характеризуются металлические материалы.

Магнитными свойствами т.е. способностью хорошо намагничиваться обладают только железо, никель, кобальт и их сплавы.

Коэффициенты линейного и объемного расширения характеризуют способность материала расширяться при нагревании. Это свойство важно учитывать при строительстве мостов, прокладке железнодорожных и трамвайных путей и т.д.

Химические свойства характеризуют склонность материалов к взаимодействию с различными веществами и связаны со способностью материалов противостоять вредному действию этих веществ. Способность металлов и сплавов сопротивляться действию различных агрессивных сред называется коррозионной стойкостью, а аналогичная способность неметаллических материалов — *химической стойкостью*.

К эксплуатационным (служебным) свойствам относятся жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, радиационная стойкость, коррозионная и химическая стойкость и др.

Жаростойкость характеризует способность металлического материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре.

Жаропрочность характеризует способность материала сохранять механические свойства при высокой температуре.

Износостойкость — это способность материала сопротивляться разрушению его поверхностных слоев при трении.

Радиационная стойкость характеризует способность материала сопротивляться действию ядерного облучения.

2. Металлы и сплавы

2.1 Строение металлов

В технике под металлами понимают вещества, обладающие комплексом металлических свойств: характерным металлическим блеском, высокой электропроводностью, хорошей теплопроводностью, высокой пластичностью.

Кристаллические решетки. Все вещества в твердом состоянии могут иметь кристаллическое или аморфное строение. В аморфном веществе атомы расположены хаотично, а в кристаллическом — в строго определенном порядке. Все металлы в твердом состоянии имеют кристаллическое строение.

Для описания кристаллической структуры металлов пользуются понятием кристаллической решетки. Кристаллическая решетка — это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой расположены атомы. Наименьшая часть кристаллической решетки, определяющая структуру металла, называется элементарной кристаллической ячейкой.

На рис. 2 изображены элементарные ячейки для наиболее распространенных кристаллических решеток. В кубической объемно-центрированной решетке (рис. 2,а) атомы расположены в узлах ячейки и один атом в центре куба. Такую решетку имеют хром, вольфрам, молибден и др.

В кубической гранецентрированной решетке (рис. 2,б) атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани. Эту решетку имеют алюминий, медь, никель и другие металлы. В гексагональной плотноупакованной решетке (рис. 2,в) атомы расположены в вершинах и центрах оснований шестигранной призмы и три атома в середине призмы. Такой тип решетки имеют магний, цинк и некоторые другие металлы.

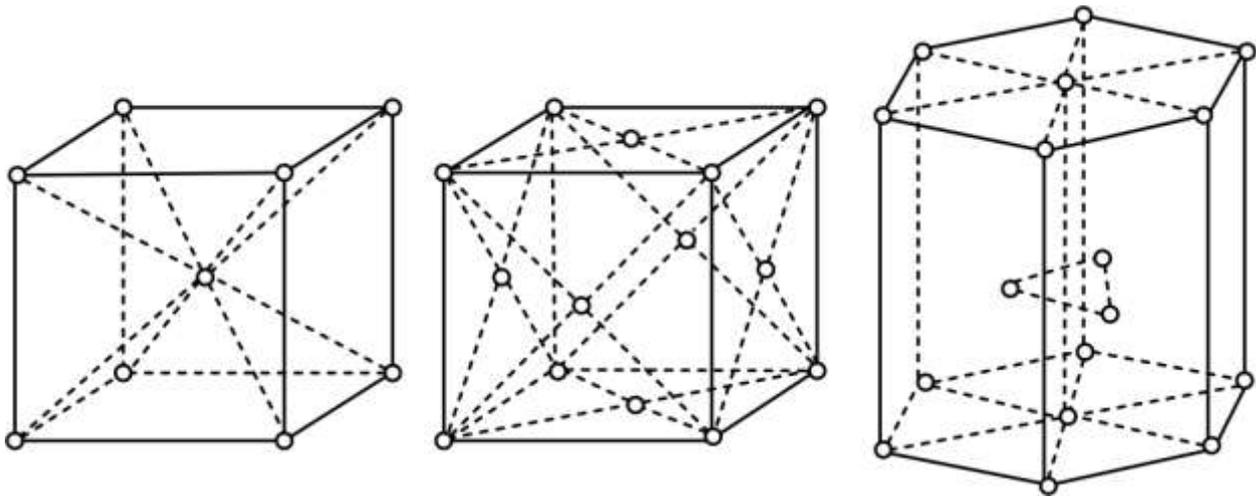


Рис. 2. Основные виды кристаллических решеток.

Кристаллизация металлов. Процесс образования в металлах кристаллической решетки называется кристаллизацией. Для изучения процесса кристаллизации строят кривые охлаждения металлов, которые показывают изменение температуры (t) во времени (τ). На рис. 3 приведены кривые охлаждения аморфного и кристаллического веществ. Затвердевание аморфного вещества (рис. 3,а) происходит постепенно, без резко выраженной границы между жидким и твердым состоянием. На кривой охлаждения кристаллического вещества (рис. 3,б) имеется горизонтальный участок с температурой $t_{кр}$, называемой температурой кристаллизации. Наличие этого участка говорит о том, что процесс сопровождается выделением скрытой теплоты кристаллизации. Длина горизонтального участка — это время кристаллизации.

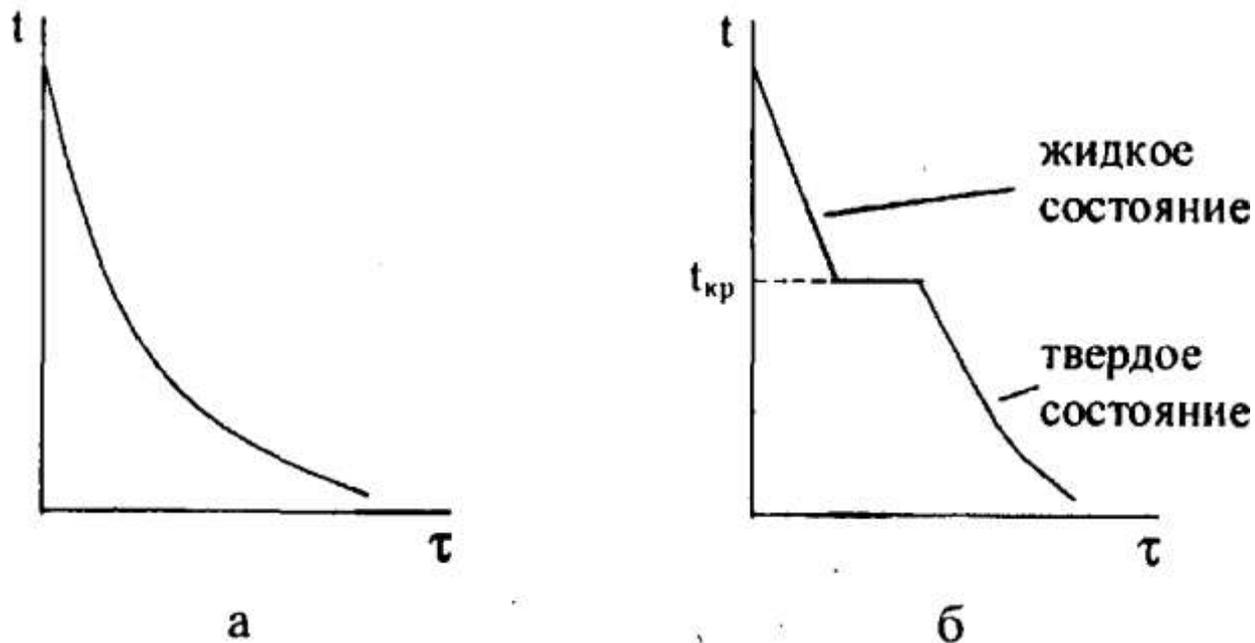


Рис. 3. Кривые охлаждения аморфного и кристаллического тел

Кристаллизация металла происходит постепенно. Она объединяет два процесса, происходящих одновременно: возникновение центров кристаллизации и рост кристаллов. В процессе кристаллизации когда растущий кристалл окружен жидкостью, он имеет правильную геометрическую форму. При столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается (рис. 4.)

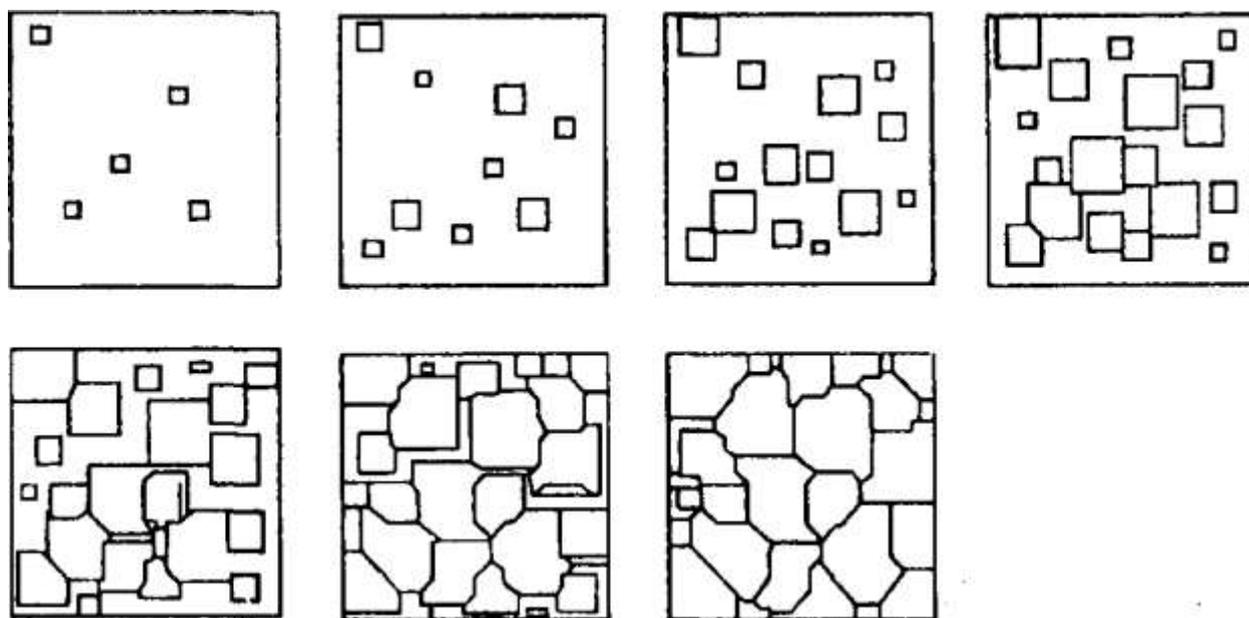


Рис. 4. Схема процесса кристаллизации металла

После окончания кристаллизации образуются кристаллы неправильной формы, которые называются зернами или кристаллитами. Внутри каждого зерна имеется определенная ориентация кристаллической решетки, отличающаяся от ориентации решеток соседних зерен.

Полиморфизм. Некоторые металлы в зависимости от температуры могут существовать в различных кристаллических формах. Это явление называется полиморфизм или аллотропия, а различные кристаллические формы одного вещества называются полиморфными модификациями. Процесс перехода от одной кристаллической формы к другой называется полиморфным превращением. Полиморфные превращения протекают при определенной температуре.

Полиморфные модификации обозначают строчными греческими буквами α , β , γ , δ и т. д., причем, α соответствует модификации, существующей при наиболее низкой температуре. Полиморфизм характерен для железа, олова, кобальта, марганца, титана и некоторых других металлов.

Важное значение имеет полиморфизм железа. На рис. 5 изображена кривая охлаждения железа. Полиморфные превращения характеризуются горизонтальными участками на кривой охлаждения, так как при них происходит полная перекристаллизация металла. До 911°C устойчиво Fe_α , имеющее кубическую объемно-центрированную решетку. В интервале $911\text{-}1392^\circ\text{C}$ существует Fe_γ с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой. При $1392\text{-}1539^\circ\text{C}$ вновь устойчиво Fe_α . Часто высокотемпературную модификацию Fe_α обозначают Fe_δ . Остановка на кривой охлаждения при 768°C связана не с полиморфным превращением, а с изменением магнитных свойств. До 768°C железо магнитно, а выше — немагнитно.

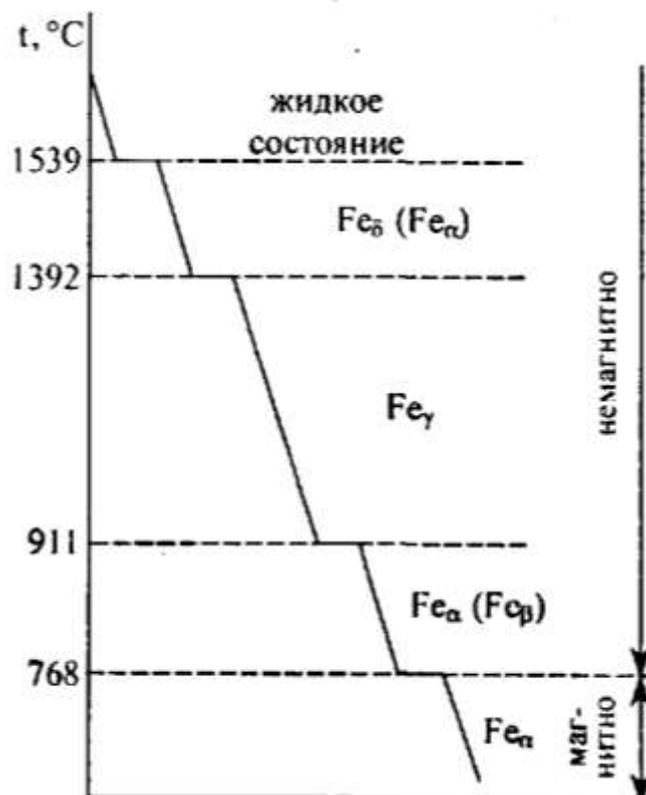


Рис. 5. Кривая охлаждения железа

Дефекты кристаллического строения. Реальный металлический кристалл всегда имеет дефекты кристаллического строения. Они подразделяются на точечные, линейные и поверхностные.

Точечные дефекты малы во всех трех измерениях. К точечным дефектам относятся вакансии, представляющие собой узлы кристаллической решетки в которых отсутствуют атомы (рис. 6,а), а также замещенные атомы примеси (рис. 6,б) и внедренные атомы (рис. 6,в) которые могут быть как примесными, так и атомами основного металла. Точечные дефекты вызывают местные искажения кристаллической решетки, которые затухают достаточно быстро по мере удаления от дефекта.

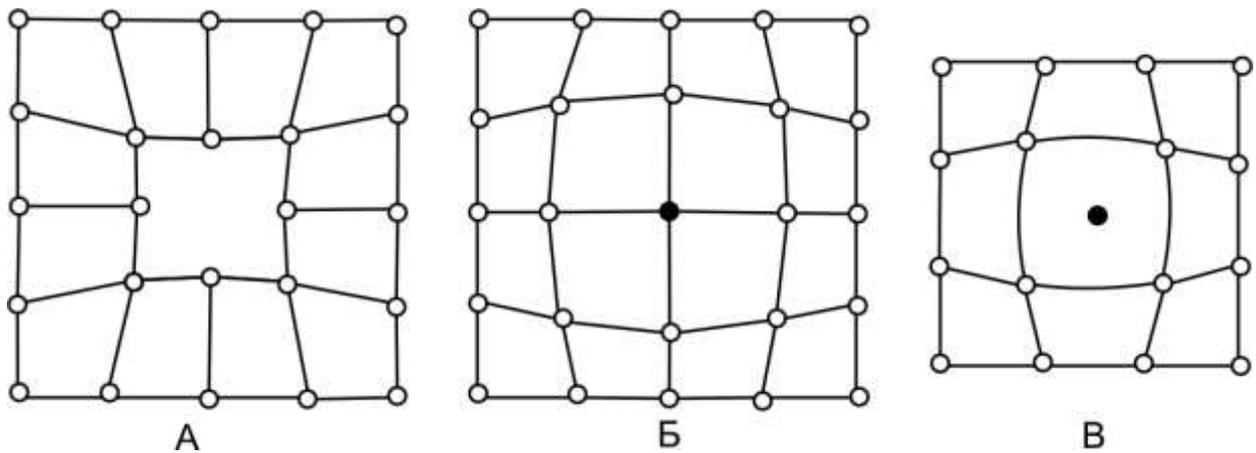


Рис. 6. Схемы точечных дефектов в кристаллах

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем. Эти дефекты называют дислокациями. Краевая дислокация (рис. 7) представляет собой искажение кристаллической решетки, вызванное наличием «лишней» атомной полуплоскости.

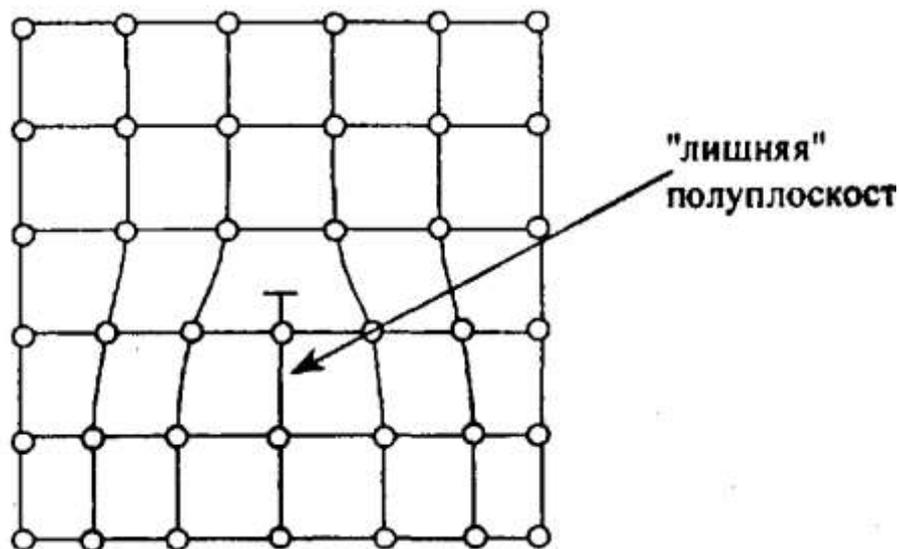


Рис. 7. Схема краевой дислокации

Поверхностные дефекты малы только в одном измерении. К ним относятся, например, границы между отдельными зёрнами или группами зёрен.

Наклеп и рекристаллизация. При пластической деформации изменяется не только форма и размеры металла, но также его внутреннее строение и механические свойства. Зёрна разворачиваются, деформируются и сплющиваются, вытягиваясь в направлении деформации. Образуется волокнистая структура. При этом прочность и твердость металла повышаются, а пластичность и вязкость снижаются. Явление упрочнения металла при пластической деформации называется *наклепом*.

Волокнистое строение и наклеп могут быть устранены при нагреве металла. Частичное снятие наклепа происходит уже при небольшом нагреве (до 300-400°С для железа). Но волокнистая структура при этом сохраняется. При нагреве до более высокой температуры в металле происходит образование новых равноосных зёрен. Этот процесс называется *рекристаллизацией*. Наклеп при этом снимается полностью.

Температура, при которой начинается процесс рекристаллизации называется *температурой рекристаллизации*. Абсолютная температура рекристаллизации T_p связана с абсолютной температурой плавления простой зависимостью:

$$T_p = a \cdot T_{пл}$$

где a — коэффициент, зависящий от состава и структуры металла. Для особо чистых металлов $a = 0,2$, для металлов технической чистоты $a = 0,3-0,4$, для сплавов $a = 0,5-0,6$.

Если деформирование металла происходит при температуре, которая выше температуры рекристаллизации, то наклеп после деформации не возникает. Такая деформация называется горячей. При горячей деформации идут одновременно процессы упрочнения и рекристаллизации. Деформация, которая происходит ниже температуры рекристаллизации, называется холодной.

2.2 Металлические сплавы

Металлическим сплавом называется материал, полученный сплавлением двух или более металлов или металлов с неметаллами, обладающий металлическими свойствами. Вещества, которые образуют сплав называются компонентами. Фазой называют однородную часть сплава, характеризующуюся определенным составом и строением и отделенную от других частей сплава поверхностью раздела. Под структурой понимают форму размер и характер взаимного расположения фаз в металлах и сплавах. Структурными составляющими называют обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями.

Виды сплавов по структуре. По характеру взаимодействия компонентов все сплавы подразделяются на три основных типа: механические смеси, химические соединения и твердые растворы.

Механическая смесь двух компонентов А и В образуется, если они не способны к взаимодействию или взаимному растворению. Каждый компонент при

этом кристаллизуется в свою кристаллическую решетку. Структура механических смесей неоднородная, состоящая из отдельных зерен компонента А и компонента В. Свойства механических смесей зависят от количественного соотношения компонентов: чем больше в сплаве данного компонента, тем ближе к его свойствам свойства смеси.

Химическое соединение образуется когда компоненты сплава А и В вступают в химическое взаимодействие. При этом при этом соотношение чисел атомов в соединении соответствует его химической формуле A_mB_n . Химическое соединение имеет свою кристаллическую решетку, которая отличается от кристаллических решеток компонентов. Химические соединения имеют однородную структуру, состоящую из одинаковых по составу и свойствам зерен.

При образовании твердого раствора атомы одного компонента входят в кристаллическую решетку другого. Твердые растворы замещения образуются в результате частичного замещения атомов кристаллической решетки одного компонента атомами второго (рис. 6,б.). Твердые растворы внедрения образуются когда атомы растворенного компонента внедряются в кристаллическую решетку компонента -растворителя (рис. 6,в.). Твердый раствор имеет однородную структуру, одну кристаллическую решетку. В отличие от химического соединения твердый раствор существует не при строго определенном соотношении компонентов, а в интервале концентраций. Обозначают твердые растворы строчными буквами греческого алфавита α , δ , β , τ , и т. д.

Диаграмма состояния. Диаграмма состояния показывает строение сплава в зависимости от соотношения компонентов и от температуры. Она строится экспериментально по кривым охлаждения сплавов (рис. 8). В отличие от чистых металлов сплавы кристаллизуются не при постоянной температуре, а в интервале температур. Поэтому на кривых охлаждения сплавов имеется две критические точки. В верхней критической точке, называемой точкой *ликвидус* (t_l), начинается кристаллизация. В нижней критической точке, которая называется точкой *солидус* (t_s), кристаллизация завершается. Кривая охлаждения механической смеси (рис. 8,а) отличается от кривой охлаждения твердого раствора (рис. 8,б) наличием горизонтального участка. На этом участке происходит кристаллизация эвтектики. Эвтектикой называют механическую смесь двух фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкого сплава. Эвтектика имеет определенный химический состав и образуется при постоянной температуре.

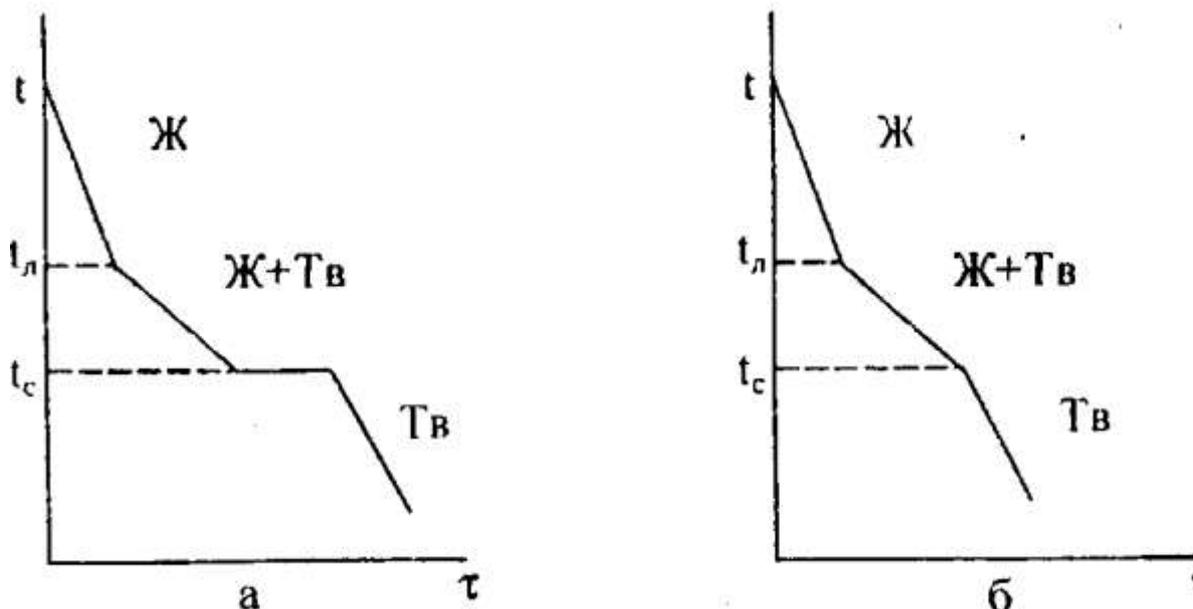


Рис. 8. Кривые охлаждения сплавов: а - механической смеси, б - твердого раствора

Диаграмму состояния строят в координатах температура-концентрация. Линии диаграммы разграничивают области одинаковых фазовых состояний. Вид диаграммы зависит от того, как взаимодействуют между собой компоненты. Для построения диаграммы состояния используют большое количество кривых охлаждения для сплавов различных концентраций. При построении диаграммы критические точки переносятся с кривых охлаждения на диаграмму и соединяются линией. В получившихся на диаграмме областях записывают фазы или структурные составляющие. Линия диаграммы состояния на которой при охлаждении начинается кристаллизация сплава называется линией ликвидус, а линия на которой кристаллизация завершается — линией солидус.

Виды диаграмм состояния. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси (рис. 9), характеризуется отсутствием растворения компонентов в твердом состоянии. Поэтому в этом сплаве возможно образование трех фаз: жидкого сплава Ж, кристаллов А и кристаллов В. Линия АСВ диаграммы является линией ликвидус: на участке АС при охлаждении начинается кристаллизация компонента А, а на участке СD — компонента В. Линия DC В является линией солидус, на ней завершается кристаллизация А или В и при постоянной температуре происходит кристаллизация эвтектики Э. Сплавы концентрация которых соответствует точке С диаграммы называются эвтектическими, их структура представляет собой чистую эвтектику. Сплавы, расположенные на диаграмме левее эвтектического, называются доэвтектическими, их структура состоит из зерен А и эвтектики. Те сплавы которые на диаграмме расположены правее эвтектического, называются заэвтектическими, их структура представляет собой зерна В, окруженные эвтектикой.

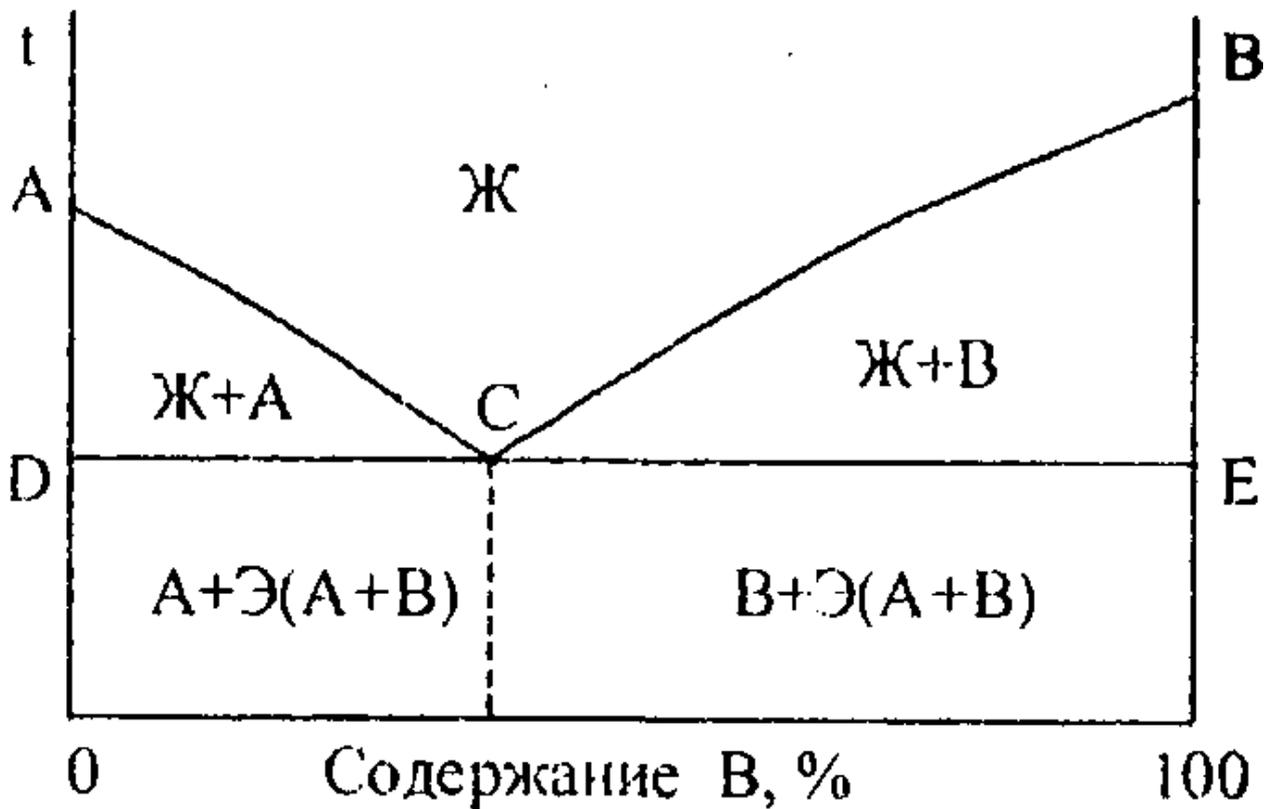


Рис. 9. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии изображена на рис. 10. Для этого сплава возможно образование двух фаз: жидкого сплава и твердого раствора α . На диаграмме имеется всего две линии, верхняя является линией ликвидус, а нижняя — линией солидус.

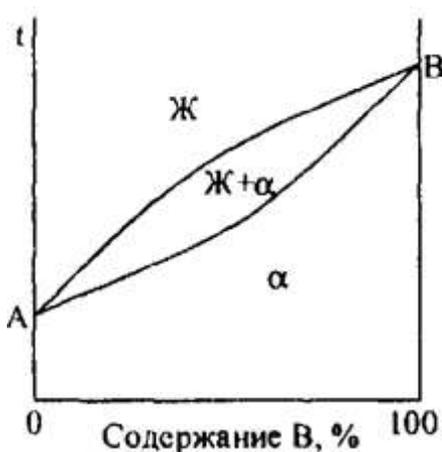


Рис. 10. Диаграмма с неограниченной

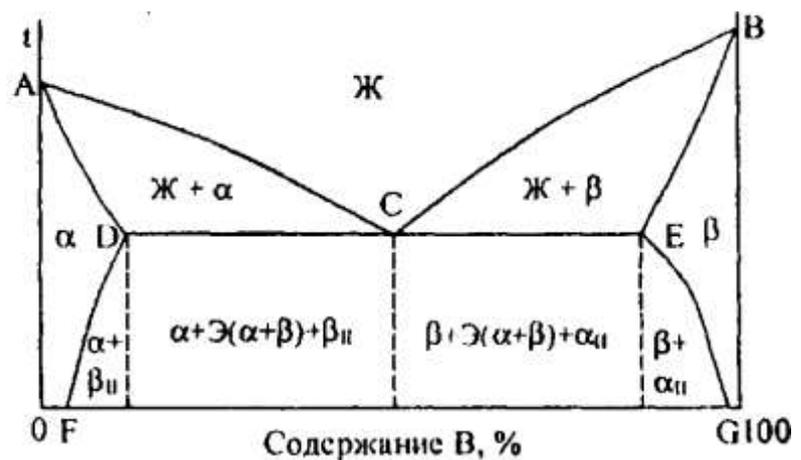


Рис. 11. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии показана на рис. 11. В этом сплаве могут существовать три

фазы — жидкий сплав, твердый раствор α компонента В в компоненте А и твердый раствор β компонента А в компоненте В. Данная диаграмма содержит в себе элементы двух предыдущих. Линия АСВ является линией ликвидус, линия ADCEB — линией солидус. Здесь также образуется эвтектика, имеются эвтектический, доэвтектический и заэвтектический сплавы. По линиям FD и EG происходит выделение вторичных кристаллов α_{II} и β_{II} (вследствие уменьшения растворимости с понижением температуры). Процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы называется вторичной кристаллизацией.

Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение (рис.12) характеризуется наличием вертикальной линии, соответствующей соотношением компонентов в химическом соединении A_mB_n . Эта линия делит диаграмму на две части, которые можно рассматривать как самостоятельные диаграммы сплавов, образуемых одним из компонентов с химическим соединением. На рис. 12 изображена диаграмма для случая, когда каждый из компонентов образует с химическим соединением механическую смесь.

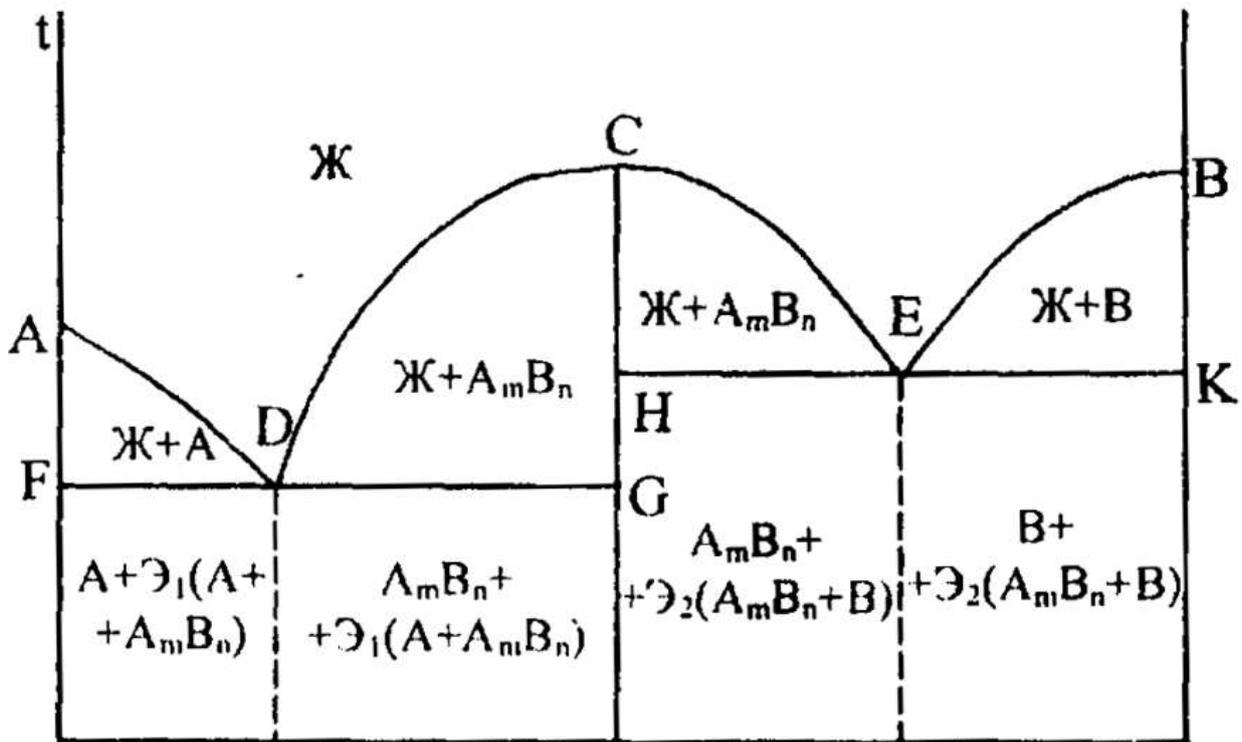


Рис. 12. Диаграмма состояния сплавов образующих химическое соединение

3. Сплавы железа с углеродом

3.1 Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов дает представление о строении основных конструкционных сплавов — сталей и чугунов.

Компоненты, фазы и структурные составляющие сплавов железа с углеродом.

Железо — пластичный металл серебристо-белого цвета с невысокой твердостью (НВ 80). Температура плавления — 1539°C, плотность 7,83 г/см³. Имеет полиморфные модификации (см. раздел 2.1.). С углеродом железо образует химическое соединение и твердые растворы.

Ферритом называется твердый раствор углерода в α - железе. Содержание углерода в феррите очень невелико — максимальное 0,02% при температуре 727°C. Благодаря столь малому содержанию углерода свойства феррита совпадают со свойствами железа (низкая твердость и высокая пластичность). Твердый раствор углерода в высокотемпературной модификации Fe α (т.е. в Fe δ) часто называют δ -ферритом или высокотемпературным ферритом.

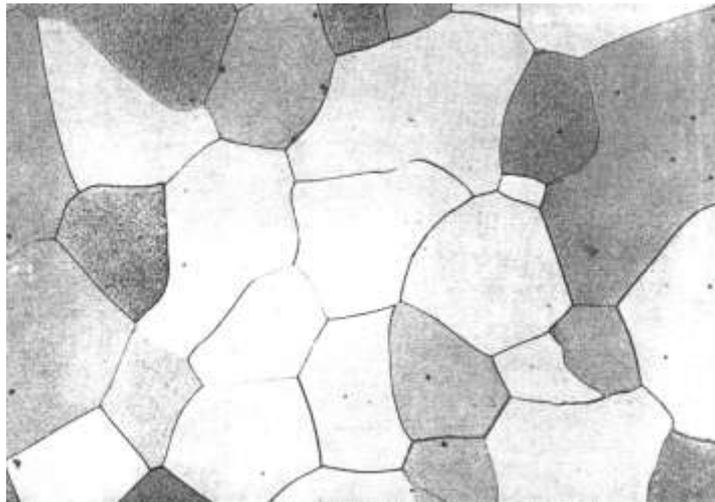


Рис. 13 Феррит

Аустенит — это твердый раствор углерода в γ - железе. Максимальное содержание углерода в аустените составляет 2,14% (при температуре 1147°C). Имеет твердость НВ 220.

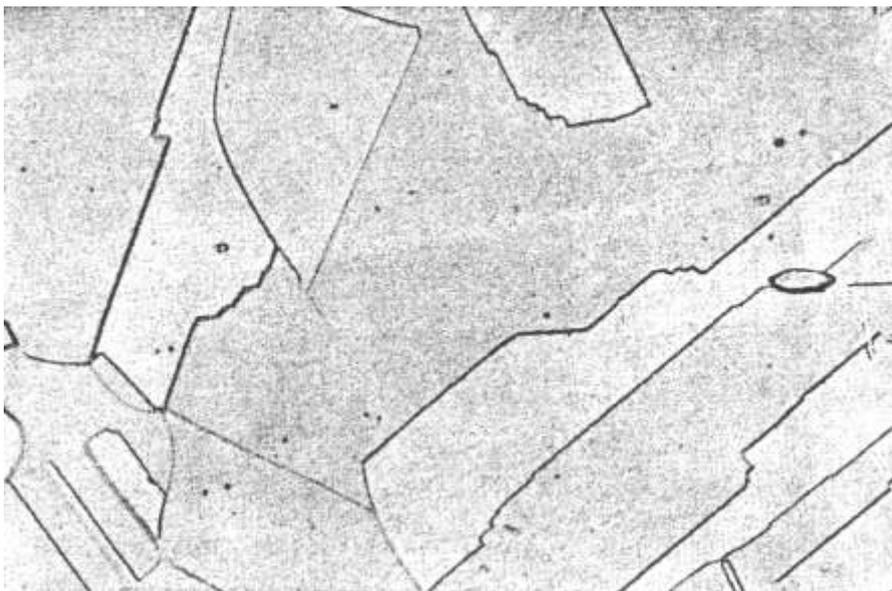


Рис. 14 Аустенит

Цементит — это химическое соединение железа с углеродом (карбид железа) Fe_3C . В нем содержится 6,67 % углерода (по массе). Имеет сложную ромбическую кристаллическую решетку. Характеризуется очень высокой твердостью (НВ 800), крайне низкой пластичностью и хрупкостью.

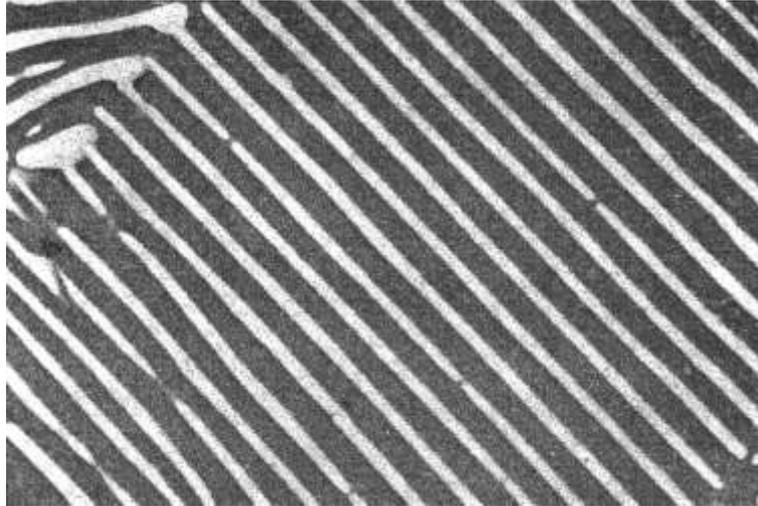


Рис. 15 Пластинчатый перлит

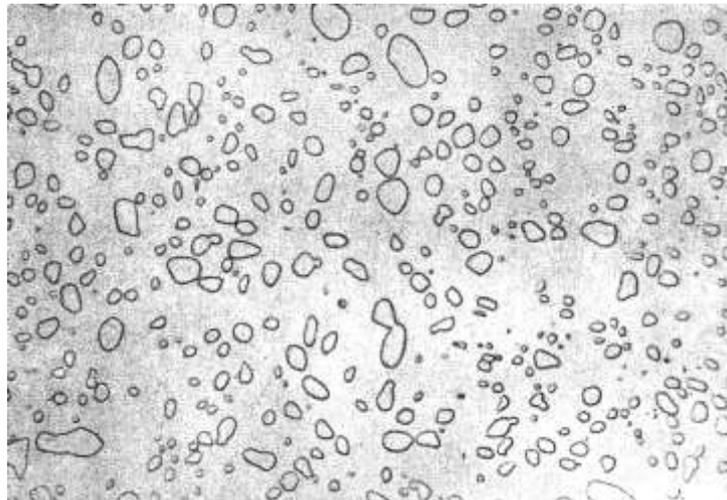


Рис. 16 Зернистый перлит

Перлит — это механическая смесь феррита с цементитом. Содержит 0,8% углерода, образуется из аустенита при температуре $727^{\circ}C$. Имеет пластинчатое строение, т.е. его зерна состоят из чередующихся пластинок феррита и цементита. Перлит является эвтектоидом.

Эвтектоид — это механическая смесь двух фаз, образующаяся из твердого раствора (а не из жидкого сплава, как эвтектика).

Ледебурит представляет собой эвтектическую смесь аустенита с цементитом. Содержит 4,3% углерода, образуется из жидкого сплава при температуре $1147^{\circ}C$. При температуре $727^{\circ}C$ аустенит, входящий в состав ледебурита превращается в перлит и ниже этой температуры ледебурит представляет собой механическую смесь перлита с цементитом.

Фаза цементита имеет пять структурных форм: цементит первичный, образующийся из жидкого сплава; цементит вторичный, образующийся из аустенита; цементит третичный, образующийся из феррита; цементит ледебурита; цементит перлита.

Диаграмма Fe-Fe₃C. На рис. 17 приведена диаграмма состояния сплавов железа с цементитом. На горизонтальной оси концентраций отложено содержание углерода от 0 до 6,67%. Левая вертикальная ось соответствует 100% содержанию железа. На ней отложены температура плавления железа и температуры его полиморфных превращений. Правая вертикальная ось (6,67% углерода) соответствует 100% содержанию цементита. Буквенное обозначение точек диаграммы принято согласно международному стандарту и изменению не подлежит.

Точка	Температура при нагреве, °C	Предельная концентрация углерода, %	Характеристика точки
A	1539	0	Температура плавления железа
B	1499	0,51	Состав жидкой фазы при перитектической реакции
C	1147	4,3	Состав эвтектики - ледебурита
D	1260	6,67	Температура плавления цементита
E	1147	2,14	Предельная растворимость углерода в γ - железе
J	1499	0,16	Состав аустенита при перитектической реакции
H	1499	0,1	Состав феррита при перитектической реакции
N	1399	0	Превращение δ - железа в γ - железо
G	911	0	Превращение α - железа в γ - железо
S	727	0,8	Состав эвтектоида - перлит
P	727	0,025	Предельная растворимость углерода в α - железе
Q	20	0,01	Минимальная растворимость углерода в α - железе

Диаграмма состояния Fe-Fe₃C

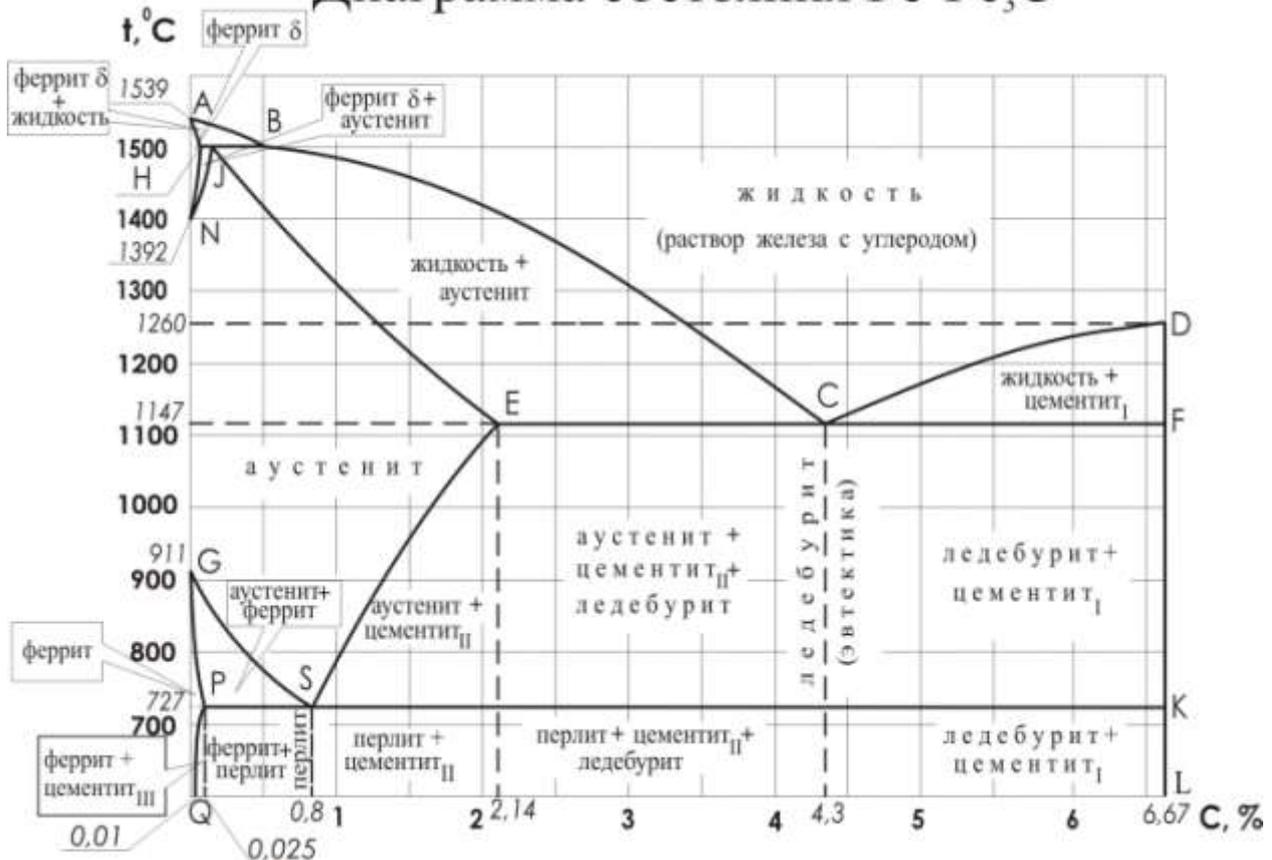


Рис. 17 Диаграмма состояния железо-углерод

Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания углерода делятся на техническое железо (до 0,02% C), сталь (от 0,02 до 2,14 % C) и чугун (от 2,14 до 6,67% C). Сталь, содержащая до 0,8% C называется доэвтектоидной, 0,8% C — эвтектоидной и свыше 0,8% C — заэвтектоидной. Чугун, содержащий от 2,14 до 4,3% C называется доэвтектическим, ровно 4,3% — эвтектическим и от 4,3 до 6,67% C — заэвтектическим.

Структура технического железа представляет собой зерна феррита или феррит с небольшим количеством третичного цементита. Обязательной структурной составляющей стали является перлит. Структура доэвтектоидной стали, состоит из равномерно распределенных зерен феррита и перлита. Эвтектоидная сталь состоит только из перлита. Структура заэвтектоидной стали представляет собой зерна перлита, окруженные сплошной или прерывистой сеткой вторичного цементита. Для чугуна характерно наличие ледебурита в структуре. Структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита, эвтектической — из ледебурита и заэвтектического — из ледебурита и первичного цементита.

Значение диаграммы железо - цементит состоит в том, что она позволяет объяснить зависимость структуры и, соответственно, свойств сталей и чугунов от содержания углерода и определить режимы термической обработки для изменения свойств сталей.

3.2 Стали

Сталью называется сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится не более 2,14%. Это теоретическое определение. На практике в сталях, как правило, не содержится углерода более 1,5%.

Влияние углерода и примесей на свойства стали. Углерод существенно влияет на свойства стали даже при незначительном изменении его содержания. В стали имеются две фазы — феррит и цементит (частично в виде перлита). Количество цементита возрастает прямо пропорционально содержанию углерода. Как уже говорилось, феррит характеризуется высокой пластичностью и низкой твердостью, а цементит, напротив, очень низкой пластичностью и высокой твердостью. Поэтому с повышением содержания углерода до 1,2% снижаются пластичность и вязкость стали и повышаются твердость и прочность.

Повышение содержания углерода влияет и на технологические свойства стали. Ковкость, свариваемость и обрабатываемость резанием ухудшаются, но литейные свойства улучшаются.

Кроме железа и углерода в стали всегда присутствуют постоянные примеси. Наличие примесей объясняется технологическими особенностями производства стали (марганец, кремний) и невозможностью полного удаления примесей, попавших в сталь из железной руды (сера, фосфор, кислород, водород, азот). Возможны также случайные примеси (хром, никель, медь и др.).

Марганец и кремний вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для удаления вредных примесей оксида железа FeO. Марганец также устраняет вредные сернистые соединения железа. При этом содержание марганца обычно не превышает 0,8%, а кремния — 0,4%. Марганец повышает прочность, а кремний упругость стали.

Фосфор растворяется в феррите, сильно искажает кристаллическую решетку, снижая при этом пластичность и вязкость, но повышая прочность. Вредное влияние фосфора заключается в том, что он сильно повышает температуру перехода стали в хрупкое состояние, т.е. вызывает ее хладноломкость. Вредность фосфора усугубляется тем, что он может распределяться в стали неравномерно. Поэтому содержания фосфора в стали ограничивается величиной 0,045%.

Сера также является вредной примесью. Она нерастворима в железе и образует с ним сульфид железа FeS, который образует с железом легкоплавкую эвтектику. Эвтектика располагается по границам зерен и делает сталь хрупкой при высоких температурах. Это явление называется красноломкостью. Количество серы в стали ограничивается 0,05%.

Водород, азот и кислород содержатся в стали в небольших количествах. Они являются вредными примесями, ухудшающими свойства стали.

Классификация сталей. По химическому составу стали могут быть углеродистыми, содержащими железо, углерод и примеси и легированными, содержащими дополнительно легирующие элементы, введенные в сталь с целью изменения ее свойств.

По содержанию углерода стали делятся на низкоуглеродистые (до 0,25% C), среднеуглеродистые (0,25 — 0,7% C) и высокоуглеродистые (более 0,7% C).

По назначению различают стали конструкционные, идущие на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений, инструментальные, идущие на изготовление различного инструмента, а также стали специального назначения с особыми свойствами: нержавеющей, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, с особыми электрическими и магнитными свойствами и др.

По показателям качества стали классифицируются на обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. Качество стали характеризуется совокупностью свойств, определяемых процессом производства, химическим составом, содержанием газов и вредных примесей (серы и фосфора). В соответствии с ГОСТом стали обыкновенного качества должны содержать не более 0,045% P и 0,05% S, качественные — не более 0,035% P и 0,04% S, высококачественные — не более 0,025% P и 0,025% S и особовысококачественные — не более 0,025% P и 0,015% S. Углеродистые конструкционные стали могут быть только обыкновенного качества и качественными.

Углеродистые стали обыкновенного качества в зависимости от назначения и гарантируемых свойств делятся на три группы: А, Б и В.

Стали *группы А* имеют гарантируемые механические свойства. Они используются в состоянии поставки без горячей обработки или сварки. Эти стали маркируются буквами Ст и цифрами, обозначающими порядковый номер марки. Выпускается семь марок сталей группы А: Ст0, Ст1, Ст2, Ст6. Чем выше номер марки, тем больше содержание углерода и, соответственно, выше прочность и ниже пластичность.

Стали *группы Б* имеют гарантируемый химический состав. Эти стали подвергаются горячей обработке. При этом их механические свойства не сохраняются, а химический состав важен для определения режима обработки. Маркируются они так же, как стали группы А, но перед буквами Ст ставится буква Б. Чем выше номер марки, тем больше содержание в стали углерода, марганца и кремния.

Стали *группы В* имеют гарантируемые механические свойства и химический состав. Эти стали используются для сварки, так как для выбора режима сварки надо знать химический состав, а механические свойства частей изделий, не подвергшихся тепловому воздействию, остаются без изменений. В марках сталей этой группы на первое место ставится буква В. При этом механические свойства соответствуют свойствам аналогичной марки из группы А, а химический состав — составу аналогичной марки из группы Б.

Качественные конструкционные углеродистые стали маркируются цифрами 08, 10, 15, 20, 25, 85, которые обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Эти стали отличаются от сталей обыкновенного качества большей прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Если для сталей обыкновенного качества максимальная прочность составляет 700 МПа, то для качественной она достигает 1100 МПа.

3.3 Чугуны

Чугуном называют сплав железа с углеродом, содержащий от 2,14 до 6,67% углерода. Но это теоретическое определение. На практике содержание углерода в чугунах находится в пределах 2,5-4,5%. В качестве примесей чугун содержит Si, Mn, S и P.

Классификация чугунов. В зависимости от того, в какой форме содержится углерод в чугунах, различают следующие их виды. В белом чугуне весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Структура белого чугуна соответствует диаграмме Fe-Fe₃C. В сером чугуне большая часть углерода находится в виде графита, включения которого имеют пластинчатую форму. В высокопрочном чугуне графитные включения имеют шаровидную форму, а в ковком — хлопьевидную. Содержание углерода в виде цементита в сером, высокопрочном и ковком чугунах может составлять не более 0,8%.

Белый чугун обладает высокой твердостью, хрупкостью и очень плохо обрабатывается. Поэтому для изготовления изделий он не используется и применяется как передельный чугун, т.е. идет на производство стали. Для деталей с высокой износостойкостью используется чугун с отбеленной поверхностью, в котором основная масса металла имеет структуру серого чугуна, а поверхностный слой — белого чугуна. Машиностроительными чугунами, идущими на изготовление деталей, являются серый, высокопрочный и ковкий чугуны. Детали из них изготавливаются литьем, так как чугуны имеют очень хорошие литейные свойства. Благодаря графитным включениям эти чугуны хорошо обрабатываются, имеют высокую износостойкость, гасят колебания и вибрации. Но графитные включения уменьшают прочность.

Серый чугун имеет пластинчатые графитные включения. Структура серого чугуна схематически изображена на рис. 18,а. Получают серый чугун путем первичной кристаллизации из жидкого сплава.

На графитизацию (процесс выделения графита) влияют скорость охлаждения и химический состав чугуна. При быстром охлаждении графитизации не происходит и получается белый чугун. По мере уменьшения скорости охлаждения получают, соответственно, перлитный, феррито-перлитный и ферритный серые чугуны. Способствуют графитизации углерод и кремний. Кремния содержится в чугуне от 0,5 до 5%. Иногда его вводят специально. Марганец и сера препятствуют графитизации. Кроме того, сера ухудшает механические и литейные свойства. Фосфор не влияет на графитизацию, но ухудшает литейные свойства.

Механические свойства серого чугуна зависят от количества и размера графитных включений. По сравнению с металлической основой графит имеет низкую прочность. Поэтому графитные включения можно считать нарушениями сплошности, ослабляющими металлическую основу. Так как пластинчатые включения наиболее сильно ослабляют металлическую основу, серый чугун имеет наиболее низкие характеристики, как прочности, так и пластичности среди всех машиностроительных чугунов. Уменьшение размера графитных включений улучшает механические свойства. Измельчению графитных включений способствует кремний.

Маркируется серый чугун буквами СЧ и числом, показывающем предел прочности в десятых долях мегапаскаля. Имеются следующие марки серых чугунов: СЧ 10, СЧ 15, СЧ 20, СЧ 45.

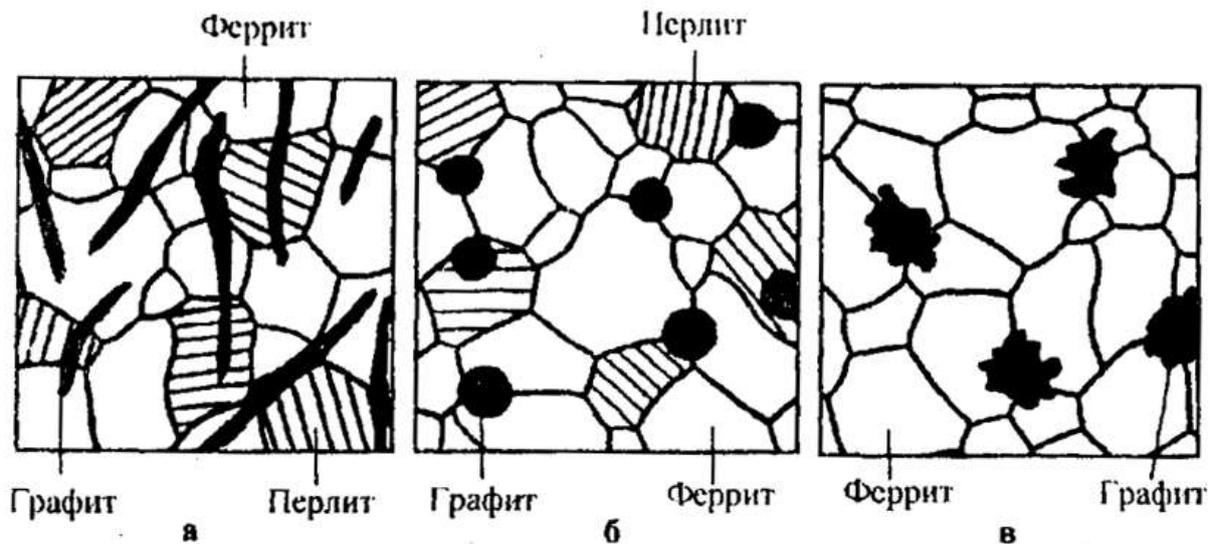


Рис. 18. Схематическое изображение структур чугунов: а - серого, б - высокопрочного, в - ковкого

Высокопрочный чугун имеет шаровидные графитные включения. Структура высокопрочного чугуна изображена на рис. 18,б.

Получают высокопрочный чугун добавкой в жидкий чугун небольшого количества щелочных или щелочноземельных металлов, которые округляют графитные включения в чугуне, что объясняется увеличением поверхностного натяжения графита. Чаще всего для этой цели применяют магний в количестве 0,03-0,07%. По содержанию других элементов высокопрочный чугун не отличается от серого.

Шаровидные графитные включения в наименьшей степени ослабляют металлическую основу. Именно поэтому высокопрочный чугун имеет более высокие механические свойства, чем серый. При этом он сохраняет хорошие литейные свойства, обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации и т.д.

Маркируется высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрами, показывающими предел прочности в десятых долях мегапаскаля. Например, чугун ВЧ 60 имеет $\sigma = 600$ МПа. Существуют следующие марки высокопрочных чугунов: ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ-50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ S0, ВЧ 100. Применяются высокопрочные чугуны для изготовления ответственных деталей — зубчатых колес, валов и др.

Ковкий чугун имеет хлопьевидные графитные включения (рис. 18,в). Его получают из белого чугуна путем графитизирующего отжига, который заключается в длительной (до 2 суток) выдержке при температуре 950-970°C. Если после этого чугун охладить, то получается ковкий перлитный чугун, металлическая основа которого состоит из перлита и небольшого количества (до 20%) феррита. Такой

чугун называют также светлосердечным. Если в области эвтектоидного превращения (720-760°C) проводить очень медленное охлаждение или даже дать выдержку, то получится ковкий ферритный чугун, металлическая основа которого состоит из феррита и очень небольшого количества перлита (до 10%). Этот чугун называют черносердечным, так как он содержит сравнительно много графита.

Маркируется ковкий чугун буквами КЧ и двумя числами, показывающими предел прочности в десятых долях мегапаскаля и относительное удлинение в %. Так, чугун КЧ 45-7 имеет $\sigma_b = 450$ МПа и $\delta = 7\%$. Ферритные ковкие чугуны (КЧ 33-8, КЧ 37"-12) имеют более высокую пластичность, а перлитные (КЧ 50-4, КЧ 60-3) более высокую прочность. Применяют ковкий чугун для деталей небольшого сечения, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

4. Термическая и химико-термическая обработка стали

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры. Различают следующие виды термической обработки: отжиг, закалка и отпуск

4.1 Отжиг

Отжигом стали называется вид термической обработки, заключающийся в ее нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении.

Цели отжига — снижение твердости и улучшение обрабатываемости стали, изменение формы и величины зерна, выравнивание химического состава, снятие внутренних напряжений. Существуют различные виды отжига: полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный, низкий, отжиг на зернистый перлит, нормализация. Температуры нагрева стали для ряда видов отжига связаны с положением линий диаграммы Fe-Fe₃C. Низкая скорость охлаждения обычно достигается при остывании стали вместе с печью.

Полный отжиг применяется для доэвтектоидных сталей. Нафев стали для полного отжига осуществляется на 30-50° выше линии GS диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 19). При этом происходит полная перекристаллизация стали и уменьшение величины зерна. Исходная структура из крупных зерен феррита и перлита при нагреве превращается в аустенитную, а затем при медленном охлаждении в структуру из мелких зерен феррита и перлита. Повышение температуры нафева привело бы к росту зерна. При полном отжиге снижается твердость и прочность стали, а пластичность повышается.

При **неполном отжиге** нагрев производится на 30-50°C выше линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 19). Он производится, если исходная структура не очень крупнозерниста или не надо изменить расположение ферритной (в доэвтектоидных

сталих) или цементитной (в заэвтектоидных сталях) составляющей. При этом происходит лишь частичная перекристаллизация — только перлитной составляющей стали.

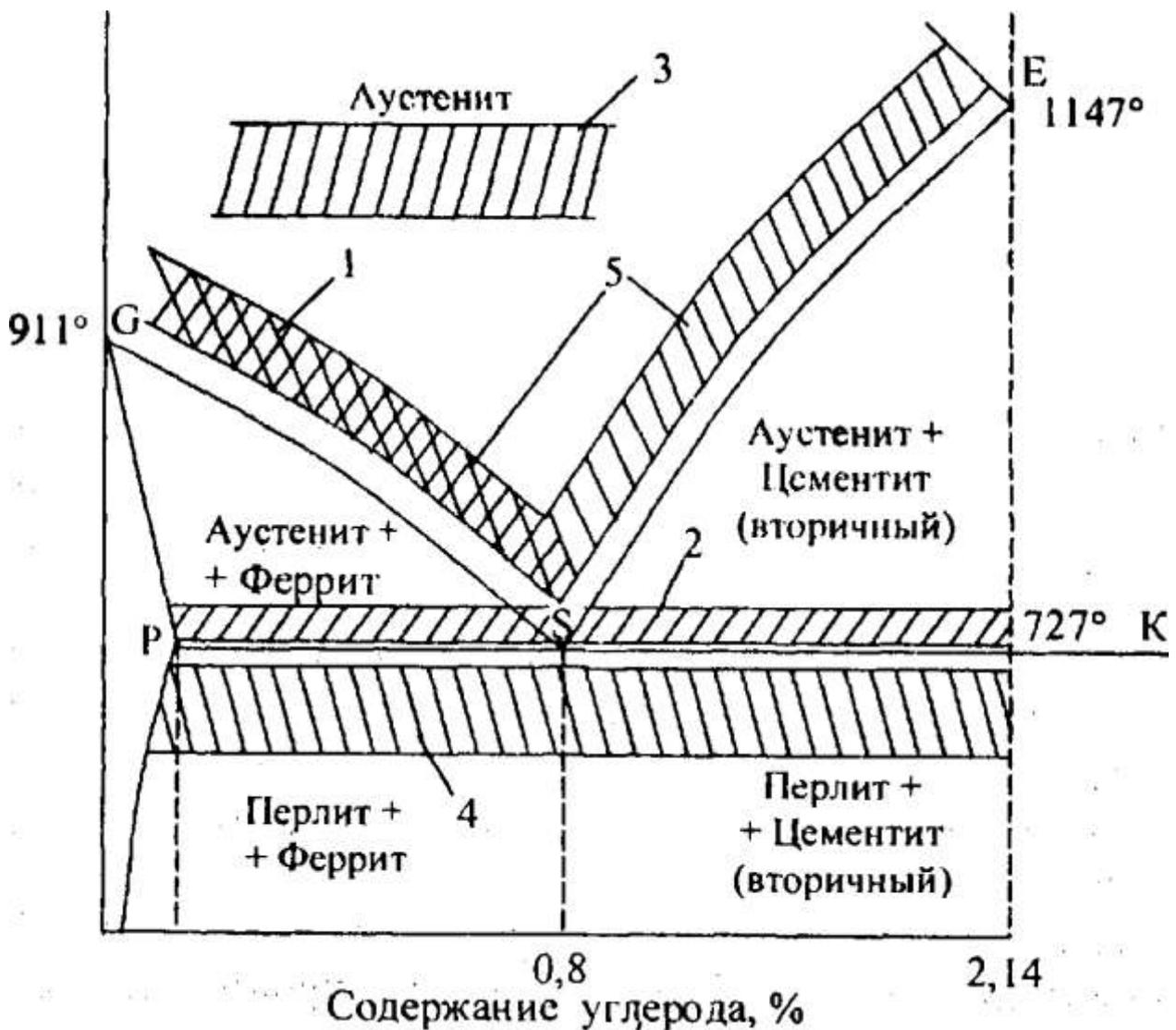


Рис. 19. Области температур нагрева для различных видов отжига:
 1 - полный отжиг; 2 - неполный отжиг; 3 - диффузионный отжиг;
 4 - рекристаллизационный отжиг; 5 - нормализация

Диффузионный отжиг (гомогенизация) заключается в нагреве стали до 1000-1100°C, длительной выдержке (10-15 часов) при этой температуре и последующем медленном охлаждении. В результате диффузионного отжига происходит выравнивание неоднородности стали по химическому составу. Благодаря высокой температуре нагрева и продолжительной выдержке получается крупнозернистая структура, которая может быть устранена последующим полным отжигом.

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа и внутренних напряжений после холодной деформации и подготовки структуры к дальнейшему деформированию. Нагрев необходимо осуществлять выше температуры рекристаллизации, которая для железа составляет 450°C. Обычно для повышения скорости рекристаллизационных процессов применяют значительно

более высокие температуры, которые, однако, должны быть ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C. Поэтому температура нагрева для рекристаллизационного отжига составляет 650-700°C.

В результате рекристаллизационного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твердостью и значительной вязкостью.

Низкий отжиг применяется в тех случаях, когда структура стапи удовлетворительна и необходимо только снять внутренние напряжения, возникающие при кристаллизации или после механической обработки. В этом случае сталь нагревают значительно ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C (200-600°C).

Отжиг на зернистый перлит (сфероидизацию) применяют для сталей близких к эвтектоидному составу или для заэвтектоидных. Такой отжиг осуществляют маятниковым способом (температуру несколько раз изменяют вблизи линии PSK, то перегревая выше нее на 30-50°C, то охлаждая ниже на 30-50°C) или путем длительной выдержки (5-6 часов) при температуре несколько выше линии PSK и последующего медленного охлаждения. После такого отжига цементит, обычно присутствующий в структуре в виде пластин, приобретает зернистую форму. Сталь со структурой зернистого перлита обладает большей пластичностью, меньшей твердостью и прочностью по сравнению с пластинчатым перлитом. Отжиг на зернистый перлит применяется для подготовки сталей к закалке или для улучшения их обрабатываемости резанием.

Нормализация состоит из нагрева стали на 30-50°C выше линии GSE диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 19), выдержки при этой температуре и последующего охлаждения на воздухе. Более быстрое охлаждение по сравнению с обычным отжигом приводит к более мелкозернистой структуре. Нормализация — более дешевая термическая операция, чем отжиг, так как печи используют только для нагрева и выдержки. Для низкоуглеродистых сталей (до 0,3% C) разница в свойствах между нормализованным и отожженным состоянием практически отсутствует и эти стали лучше подвергать нормализации. При большем содержании углерода нормализованная сталь обладает большей твердостью и меньшей вязкостью, чем отожженная. Иногда нормализацию считают самостоятельной разновидностью термической обработки, а не видом отжига.

4.2 Закалка и отпуск стали

Превращения в стали при охлаждении. При медленном охлаждении стали образуются структуры, соответствующие диаграмме Fe-Fe₃C. Вначале происходит выделение феррита (в доэвтектоидных сталях) или вторичного цементита (в заэвтектоидных сталях), а затем происходит превращение аустенита в перлит. Это превращение заключается в распаде аустенита на феррит, почти не содержащий углерода и цементит, содержащий 6,67% C. Поэтому превращение сопровождается диффузией, перераспределением углерода. Диффузионные процессы происходят в течение некоторого времени, причем скорость диффузии резко падает с понижением температуры



Рис 20. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали

Обычно изучают изотермическое превращение аустенита (происходящее при выдержке при постоянной температуре) для эвтектоидной стали. Влияние температуры на скорость и характер превращения представляют в виде диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 20). Диаграмма строится в координатах температура — логарифм времени. Выше температуры 727°C на диаграмме находится область устойчивого аустенита. Ниже этой температуры аустенит является неустойчивым и превращается в другие структуры. Первая S-образная кривая на диаграмме соответствует началу превращения аустенита, а вторая — её завершению. При небольшом переохлаждении — приблизительно до 550°C происходит упомянутое выше диффузионное перлитное превращение. В зависимости от степени переохлаждения образуются структуры, называемые перлит, сорбит и тростит. Это структуры одного типа — механические смеси феррита и цементита, имеющие пластинчатое строение. Отличаются они лишь степенью дисперсности, т.е. толщиной пластинок феррита и цементита. Наиболее крупнодисперсная структура — перлит, наиболее мелкодисперсная — тростит. При переохлаждении аустенита приблизительно ниже 240°C скорость диффузии падает почти до нуля и происходит бездиффузионное мартенситное превращение. Образуется *мартенсит* — пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, что и исходный аустенит. Из-за высокой насыщенности углеродом решетка мартенсита сильно искажается, благодаря чему мартенсит имеет высокую твердость (до HRC 65). Горизонтальная линия M_s диаграммы соответствует началу превращения аустенита в мартенсит, а линия M_f — завершению этого процесса.

В диапазоне температур от мартенситного до перлитного превращения происходит промежуточное превращение и образуется структура, называемая бейнит.

Закалка — это вид термической обработки, состоящий в нагреве стали до определенной температуры, выдержке и последующем быстром охлаждении. В результате закалки повышается твердость и прочность, но снижается вязкость и пластичность. Нагрев стали производится на 30-50°С выше линии GSK диаграммы Fe-Fe₃C. В доэвтектоидных сталях нагрев выше линии GS необходим для того, чтобы после закалки в структуре не было мягких ферритных включений. Для заэвтектоидных сталей применяется нагрев выше линии SK, так как присутствие цементита не снижает твердость стали.

Обычно в результате закалки образуется мартенситная структура. Поэтому охлаждать сталь следует с такой скоростью, чтобы кривая охлаждения не пересекала C - образные кривые диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 20). Для достижения высокой скорости охлаждения закаливаемые детали погружают в воду (для углеродистых сталей) или минеральные масла (для легированных сталей).

Способность стали закаливаться на мартенсит называется **закаливаемостью**. Она характеризуется значением твердости, приобретаемой сталью после закалки и зависит от содержания углерода. Стали с низким содержанием углерода (до 0,3%) практически не закаливаются и закалка для них не применяется.

Прокаливаемость называется глубина проникновения закаленной зоны. Отсутствие сквозной прокаливаемости объясняется тем, что при охлаждении сердцевина остывает медленнее, чем поверхность. Прокаливаемость характеризует критический диаметр D, т. е. максимальный диаметр детали цилиндрического сечения, которая прокаливается насквозь в данном охладителе.

Отпуск стали — это вид термической обработки, следующий за закалкой и заключающийся в нагреве стали до определенной температуры (ниже линии PSK), выдержке и охлаждении. Цель отпуска — получение более равновесной по сравнению с мартенситом структуры, снятие внутренних напряжений, повышение вязкости и пластичности. Различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск проводится при температуре 150-200°С. В результате снимаются внутренние напряжения, происходит некоторое увеличение пластичности и вязкости без заметного снижения твердости. Образуется структура **мартенсит отпуска**. Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент, а также детали, которые должны обладать высокой твердостью и износостойкостью.



Рис. 21 Мартенсит

При среднем отпуске производится нагрев до 350-450°C. При этом происходит некоторое снижение твердости при значительном увеличении предела упругости и улучшении сопротивляемости действию ударных нагрузок. Структура стали представляет собой троостит отпуска, который имеет зернистое, а не пластинчатое строение. Применяется для пружин, рессор, ударного инструмента.

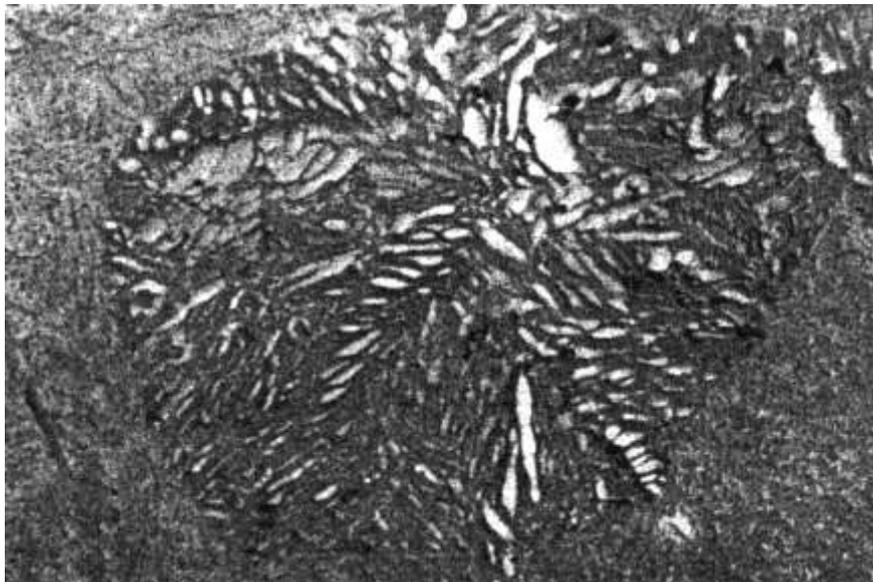


Рис. 22 Троостит

Высокий отпуск проводится при 550-650°C. В результате твердость и прочность снижаются значительно, но сильно возрастают вязкость и пластичность и получается оптимальное для конструкционных сталей сочетание механических свойств. Структура стали — сорбит отпуска с зернистым строением цементита. Применяется для деталей, подвергающихся действию высоких нагрузок. Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется улучшением. Она является основным видом обработки конструкционных сталей

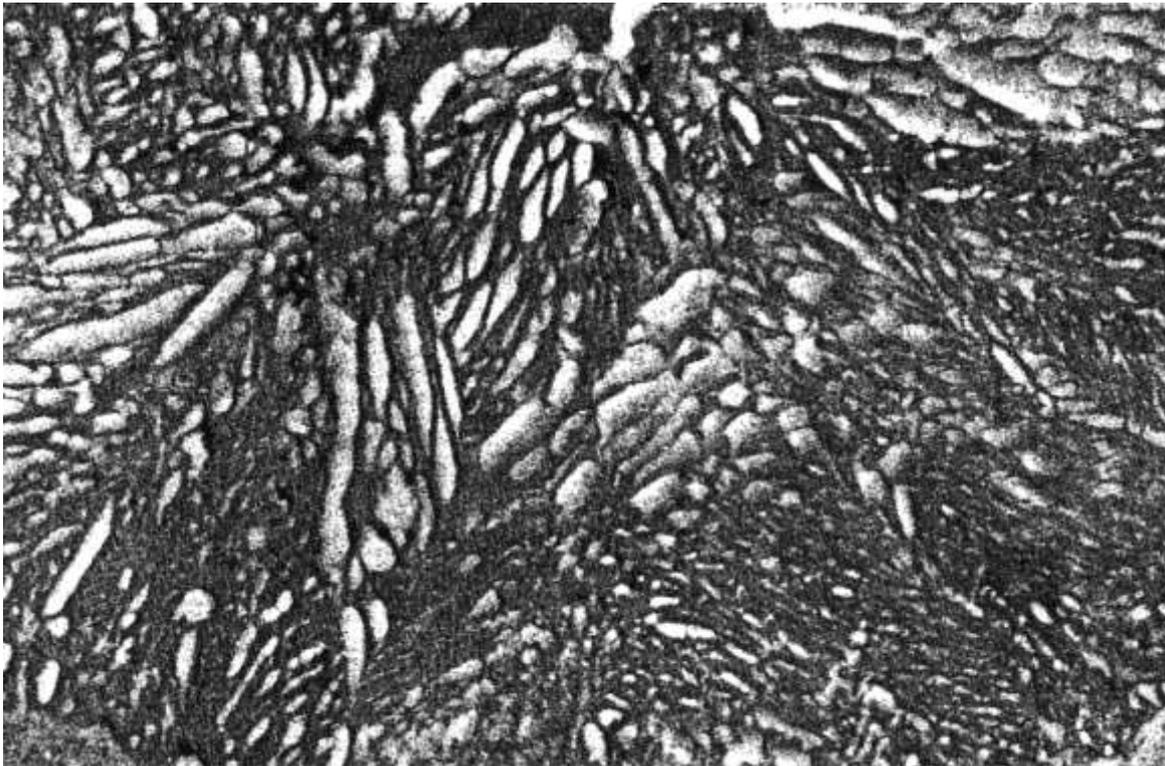


Рис. 23 Сорбит

4.3 Поверхностное упрочнение стали

Поверхностная закалка состоит в нагреве поверхностного слоя стальных деталей до аустенитного состояния и быстрого охлаждения с целью получения высокой твердости и прочности в поверхностном слое в сочетании с вязкой сердцевиной. Существуют различные способы нагрева поверхности под закалку — в расплавленных металлах или солях, пламенем газовой горелки, лазерным излучением, током высокой частоты. Последний способ получил наибольшее распространение в промышленности.

При нагреве **токами высокой частоты** закаливаемую деталь помещают внутри индуктора, представляющего собой медные трубки с циркулирующей внутри для охлаждения водой. Форма индуктора соответствует внешней форме детали. Через индуктор пропускают электрический ток (частотой 500 Гц-10 МГц). При этом возникает электромагнитное поле, которое индуцирует вихревые токи, нагревающие поверхность детали. Глубина нагретого слоя уменьшается с увеличением частоты тока и увеличивается с возрастанием продолжительности нагрева. Регулируя частоту и продолжительность, можно получить необходимую глубину закаленного слоя, находящуюся в пределах 1-10 мм.

Преимуществами закалки токами высокой частоты являются регулируемая глубина закаленного слоя, высокая производительность (нагрев одной детали длится 10 с), возможность автоматизации, отсутствие окалинообразования.

Недостаток — высокая стоимость индуктора, который является индивидуальным для каждой детали. Поэтому этот вид закалки применим, в основном, к крупносерийному и массовому производству.

Перспективный метод поверхностной закалки стальных деталей сложной формы — лазерная обработка. Благодаря высокой плотности энергии в луче лазера возможен быстрый нагрев очень тонкого слоя металла. Последующий быстрый отвод тепла в объем металла приводит к закалке поверхностного слоя с приданием ему высокой твердости и износостойкости.

Химико-термическая обработка — это процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхности стальных деталей за счет насыщения ее различными химическими элементами. При этом достигается значительное повышение твердости и износостойкости поверхности деталей при сохранении вязкой сердцевины. К видам химико-термической обработки относятся цементация, азотирование, цианирование и др.

Цементация — это процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом. Цементация производится путем нагрева стальных деталей при 880-950°C в углеродосодержащей среде, называемой карбюризатором. Различают два основных вида цементации — газовую и твердую. Газовая цементация проводится в газе, содержащем метан CH_4 и оксид углерода CO . Твердая цементация проводится в стальных ящиках, куда укладываются детали попеременно с карбюризатором. Карбюризатором служит порошок древесного угля с добавкой солей Na_2CO_3 или BaCO_3 .

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (0,1-0,3%). В результате на поверхности концентрация углерода возрастает до 1,0-1,2%. Толщина цементованного слоя составляет 1-2,5 мм.

Цементацией достигается только выгодное распределение углерода по сечению детали. Высокая твердость и износостойкость поверхности получается после закалки, которая обязательно проводится после цементации. Затем следует низкий отпуск. После этого твердость поверхности составляет HRC 60.

Азотированием называется процесс насыщения поверхности стали азотом. При этом повышаются не только твердость и износостойкость, но и коррозионная стойкость. Проводится азотирование при температуре 500-600°C в среде аммиака NH_3 , в течение длительного времени (до 60 ч.) Аммиак при высокой температуре разлагается с образованием активного атомарного азота, который и взаимодействует с металлом. Твердость стали повышается за счет образования нитридов легирующих элементов. Поэтому азотированию подвергают только легированные стали. Наиболее сильно повышают твердость такие легирующие элементы, как хром, молибден, алюминий, ванадий. Глубина азотированного слоя составляет 0,3 — 0,6 мм, твердость поверхностного слоя по Виккерсу доходит до HV 1200 (при цементации HV 900).

К преимуществам азотирования перед цементацией следует отнести отсутствие необходимости в дополнительной термообработке, более высокую твердость и износостойкость, высокую коррозионную стойкость поверхности.

Недостатками являются низкая скорость процесса и необходимость применения дорогих легированных сталей.

Цианирование (нитроцементация) — это процесс одновременного насыщения поверхности стали углеродом и азотом. Проводится цианирование в расплавах цианистых солей NaCN или KCN или в газовой среде, содержащей смесь метана CH₄ и аммиака NH₃. Различают низкотемпературное и высокотемпературное цианирование.

Низкотемпературное цианирование проводится при температуре 500-600°C. При этом преобладает насыщение азотом. Глубина цианированного слоя составляет 0,2-0,5 мм, твердость поверхности — HV 1000.

При высокотемпературном цианировании температура составляет 800-950°C. Преобладает насыщение углеродом. Глубина поверхностного слоя составляет 0,6 — 2,0 мм. После высокотемпературного цианирования следует закалка с низким отпуском. Твердость после термообработки составляет HRC 60.

Поверхностное упрочнение пластическим деформированием основано на способности стали к наклепу при пластической деформации. Наиболее распространенными способами такого упрочнения поверхности является дробеструйная обработка и обработка поверхности роликами или шариками.

При дробеструйной обработке на поверхность детали из специальных дробеметов направляется поток стальной или чугунной дроби малого диаметра (0,5-1,5 мм). Удары концентрируются на весьма малых поверхностях, поэтому возникают очень большие местные давления. В результате повышается твердость и износостойкость обработанной поверхности. Кроме того, сглаживаются мелкие поверхностные дефекты. Глубина упрочненного слоя при дробеструйной обработке составляет около 0,7 мм.

Обкатка роликами производится с помощью специальных приспособлений на токарных станках. Помимо упрочнения, обкатка снижает шероховатость обрабатываемой поверхности. Глубина упрочненного слоя доходит до 15 мм.

5. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Легированной называют сталь, содержащую специально введенные в нее с целью изменения строения и свойств легирующие элементы.

Легированные стали имеют целый ряд преимуществ перед углеродистыми. Они имеют более высокие механические свойства, прежде всего, прочность. Легированные стали обеспечивают большую прокаливаемость, а также возможность получения структуры мартенсита при закалке в масле, что уменьшает опасность появления трещин и коробления деталей. С помощью легирования можно придать стали различные специальные свойства (коррозионную стойкость, жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, магнитные и электрические свойства).

Классификация сталей по различным признакам была рассмотрена ранее (см. раздел 3.2). Отметим только, что стали обыкновенного качества могут быть только углеродистыми, т.е. легированные стали, как минимум, являются качественными.

Маркируются легированные стали с помощью цифр и букв, указывающих примерный химический состав стали. Первые цифры в марке показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Далее показывается содержание легирующих элементов. Каждый элемент обозначается своей буквой: Н — никель, Г — марганец, Ц — цирконий, Т — титан, Х — хром, Д — медь, С — кремний, А — азот, К — кобальт, Р — бор, П — фосфор, Ф — ванадий, М — молибден, Б — ниобий, В — вольфрам, Ю — алюминий. Цифры, идущие после буквы, указывают примерное содержание данного легирующего элемента в процентах. При содержании элемента менее 1% цифра отсутствует. Например, сталь 12Х18Н10Т содержит приблизительно 0,12% углерода, 18% хрома, 10% никеля, менее 1% титана. Для некоторых групп сталей применяют другую маркировку, которая будет указана при рассмотрении этих сталей.

5.1. Конструкционные стали

Конструкционные стали идут на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений. Они должны обеспечивать длительную и надежную работу деталей и конструкций в условиях эксплуатации. Поэтому основное требование к конструкционным сталям — комплекс высоких механических свойств.

Строительные стали содержат малые количества углерода (0,1-0,3%). Это объясняется тем, что детали строительных конструкций обычно соединяются сваркой. Низкое содержание углерода обеспечивает хорошую свариваемость. В качестве строительных используются углеродистые стали Ст2 и Ст3, имеющие предел текучести $\sigma_{0,2} = 240$ МПа. В низколегированных строительных сталях при содержании около 1,5% Mn и 0,7% Si предел текучести увеличивается до 360 МПа. К этим сталям относятся 14Г2, 17ГС, 14ХГС. Дополнительное легирование небольшими количествами ванадия и ниобия (до 0,1%) повышает предел текучести до 450 МПа за счет уменьшения величины зерна. К сталям такого типа относятся 14Г2АФ, 17Г2АФБ.

Приведенные стали применяют для строительных конструкций, армирования железобетона, магистральных нефтепроводов и газопроводов.

Цементуемые стали содержат 0,1-0,3% углерода. Они подвергаются цементации, закалке и низкому отпуску. После этой обработки твердость поверхности составляет HRC 60, а сердцевины HRC 15 — 40. Упрочнение сердцевины в этих сталях тем сильнее, чем больше содержание легирующих элементов. В зависимости от степени упрочнения сердцевины цементуемые стали можно разделить на три группы.

К сталям с неупрочняемой сердцевиной относятся углеродистые цементуемые стали 10, 15, 20. Их сердцевина имеет феррито-перлитную структуру. Эти стали имеют высокую износостойкость, но малую прочность ($\sigma = 400-500$ МПа). Поэтому они применяются для малоответственных деталей небольших размеров.

К сталям со слабо упрочняемой сердцевиной относятся низколегированные стали 15Х, 15ХР, 20ХН и др. Сердцевина имеет структуру бейнит. Эти стали имеют повышенную прочность ($\sigma_b = 750-850$ МПа).

К сталям с сильно упрочняемой сердцевиной относятся стали 20ХГР, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХН3, 18Х2Н4В и др. Сердцевина имеет мартенситную структуру. Стали этой группы имеют высокую прочность ($\sigma_b = 1200-1600$ МПа) и применяются для крупных деталей, испытывающих значительные нагрузки.

Улучшаемые стали содержат 0,3-0,5% углерода и небольшое количество легирующих элементов (до 3-5%). Эти стали подвергаются улучшению, состоящему из закалки в масле и высокого отпуска. После термообработки имеют структуру сорбита. Механические свойства разных марок улучшаемой стали в случае сквозной прокаливаемости близки ($\sigma_b = 900-1200$ МПа). Поэтому прокаливаемость определяет выбор стали. Чем больше легирующих элементов, тем выше прокаливаемость. Следовательно, чем больше сечение детали, тем более легированную сталь следует использовать. По прокаливаемости улучшаемые стали могут быть условно разбиты на пять групп.

В первую группу входят углеродистые стали 35, 40, 45, имеющие критический диаметр $D_{кр} = 10$ мм (см. раздел 4.2.). Эти стали подвергаются нормализации вместо улучшения.

Ко второй группе относятся стали, легированные хромом 30Х, 40Х. Для них критический диаметр составляет $D_{кр} = 15-20$ мм.

Третью группу составляют хромистые стали, дополнительно легированные еще одним двумя элементами (кроме никеля) 30ХМ, 40ХГ, 30ХГС и др. Для этих сталей $D_{кр} = 20-30$ мм.

Четвертая группа представлена хромоникелевыми сталями, содержащими около 1% никеля: 40ХН, 40ХНМ и др. Их критический диаметр $D_{кр} = 40$ мм.

В пятую группу входят стали, легированные рядом элементов, причем содержание никеля доходит до 3-4%: 38ХНЗ, 38ХНЗМФ ($D_{кр} = 100$ мм). Это лучшие марки улучшаемых сталей, хотя они сравнительно дороги.

Высокопрочные стали. Новейшая техника предъявляет высокие требования к прочности стали ($\sigma = 1500-2500$ МПа). Этим требованиям соответствуют *мартенситностареющие стали* сочетающие высокую прочность с достаточной вязкостью и пластичностью. Они представляют собой практически безуглеродистые (до 0,03% С) сплавы железа с никелем (17-26% Ni), дополнительно легированные титаном, алюминием, молибденом, ниобием и кобальтом. Широкое распространение получила сталь Н18К9М5Т. Она подвергается закалке на воздухе с 800-850°C. Высокую прочность мартенситностареющие стали получают в результате *старения*, представляющего собой отпуск, производимый при температуре 450-500°C. В результате такой термообработки сталь Н18К9М5Т имеет предел прочности $\sigma_b = 2000$ МПа.

Кроме упомянутой выше стали нашли применение стали Н12К8М3Г2 М10Х11М2Т, Н12К8М4Г2 и другие. Мартенситностареющие стали применяют в авиационной промышленности, в ракетной технике, судостроении и т. д. Они обладают хорошей свариваемостью и обрабатываемостью. Эти стали являются достаточно дорогостоящими.

Пружинные стали. В пружинах и рессорах используются только упругие свойства стали. Возникновение пластической деформации в них недопустимо, поэтому высоких требований к пластичности и вязкости не предъявляется. Основное требование к пружинной стали — высокий предел упругости σ (см. раздел 1.2). Хорошие упругие свойства стали достигаются при повышенном содержании углерода (0,5-0,7%) и применении термообработки, состоящей из закалки и среднего отпуска при температуре 350-450°C. После такой термообработки сталь имеет троститную структуру.

Углеродистые пружинные стали (65, 70, 75) вследствие низкой прокаливаемости используются для пружин небольшого сечения. Они могут

работать при температуре до 100° С. Стали, легированные кремнием и марганцем (60С2, 60СГ и др.) предназначены для больших по размеру упругих элементов и обеспечивают их длительную и надежную работу. Для ответственных пружин применяют высококачественные стали легированные хромом и ванадием (50ХФА, 50ХГФА). Эти стали могут работать при температуре до 300° С. Из них изготавливают, например, рессоры легковых автомобилей.

Износостойкие стали способны сопротивляться процессу изнашивания. Изнашивание — это процесс постепенного разрушения поверхностных слоев трущихся деталей, который приводит к уменьшению их размеров (износу). Износостойкие стали можно разделить на три группы.

В первую группу входят стали, износостойкость которых достигается высокой твердостью поверхности. Они подвергаются закалке и низкому отпуску или химико-термической обработке. Имеют структуру мартенсита или мартенсита с карбидными включениями. К этой группе относятся подшипниковые стали, из которых изготавливаются шарики и ролики подшипников качения. Они маркируются буквами ШХ и цифрой показывающей содержание хрома в десятых долях процента, содержат также марганец и кремний (ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ). Содержание углерода в них около 1%.

Ко второй группе относятся стали, износостойкость которых достигается смазывающим действием графита. Эти стали имеют в структуре графитные включения, которые в процессе изнашивания выходят на поверхность и выполняют роль сухой смазки. Эти стали имеют высокое содержание углерода (-1,5%) и кремния (-1%), что повышает способность к графитизации. Эти стали подвергаются графитизирующему отжигу, который аналогичен отжигу ковкого чугуна (см. раздел 3.3.).

Третью группу составляют стали износостойкость которых достигается повышенной склонностью к наклепу. Это, прежде всего, сталь 110Г13. Она имеет невысокую твердость, которая при действии давления и ударов резко повышается, за счет чего и достигается износостойкость. Эта сталь подвергается закалке от 1100°С в воде, после чего получает аустенитную структуру. Плохо обрабатывается резанием, поэтому применяется в литом состоянии.

5.2. Стали со специальными свойствами

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали. *Коррозией* называется разрушение металла под действием внешней агрессивной среды в результате ее химического или электрохимического воздействия. Различают химическую коррозию, обусловленную воздействием на металл сухих газов и неэлектролитов (например, нефтепродуктов) и электрохимическую, возникающую под действием жидких электролитов или влажного воздуха. По характеру коррозионного разрушения различают сплошную и местную коррозию. Сплошная коррозия захватывает всю поверхность металла. Ее делят на равномерную и неравномерную в зависимости от того, одинаковая ли глубина коррозионного разрушения на разных участках. При местной коррозии поражения локальны.. В зависимости от степени локализации различают пятнистую, язвенную, точечную, межкристаллитную и др. виды местной коррозии.

Самый надежный способ защиты от коррозии — применение коррозионностойких сталей. Коррозионная стойкость достигается при введении в сталь элементов, образующих на ее поверхности тонкие и прочные оксидные

пленки. Наилучший из этих элементов — хром. При введении в сталь 12-14% хрома она становится устойчивой против коррозии в атмосфере, воде, ряде кислот, щелочей и солей. Стали, содержащие меньшее количество хрома, подвержены коррозии точно так же, как и углеродистые стали. В технике применяют хромистые и хромоникелевые коррозионностойкие стали.

Хромистые коррозионностойкие стали могут содержать 13, 17 или 25-27% хрома. Стали марок 08X13, 12X13, 20X13 подвергаются закалке от 1000°C и отпуску при 600-700°C. Их применяют для изготовления деталей с повышенной пластичностью, работающих в слабоагрессивных средах. Стали 30X13, 40X13 подвергаются закалке и отпуску при 200-300°C. Из них изготавливают режущий, мерительный и хирургический инструмент.

Стали 12X17, 15X28 имеют более высокую коррозионную стойкость. Подвергаются отжигу при температуре 700-780°C. Используются для оборудования заводов легкой и пищевой промышленности, труб, работающих в агрессивных средах, для кухонной посуды.

Хромоникелевые стали обычно содержат 18% хрома и 9-12% никеля (04X18H10, 12X18H10T, 12X18H12T и др.). Они имеют более высокую коррозионную стойкость по сравнению с хромистыми сталями, лучшие механические свойства, хорошо свариваются. Эти стали имеют аустенитную структуру. Их термообработка состоит из закалки от температуры 1100-1150°C в воде без отпуска.

Хромоникелевые стали склонны к межкристаллитной коррозии. Она быстро распространяется по границам зерен без заметных внешних признаков. Это происходит вследствие образования карбидов хрома по границам зерен, что приводит к уменьшению содержания хрома в поверхностном слое зерна. Чтобы карбиды хрома не образовывались, надо либо использовать стали с пониженным содержанием углерода (до 0,04%), либо дополнительно легировать сталь титаном, связывающим углерод в карбид титана.

Используются хромоникелевые стали в пищевой и химической промышленности, в холодильной технике. Поскольку никель дорогостоящий элемент, иногда его частично заменяют марганцем и используют сталь 10X14Г14Н4Т.

Другие методы защиты от коррозии. Распространенным средством защиты от коррозии является нанесение на защищаемый металл различных покрытий. *Металлические покрытия* наносятся различными способами. При *погружении в расплавленный металл* поверхность изделия покрывается тонким и плотным слоем, затвердевающим после извлечения изделия. Этот способ применяется для нанесения покрытий цинком, оловом, свинцом и алюминием, температура плавления которых ниже, чем у защищаемого металла. При *диффузионной металлизации* изделие засыпают порошками алюминия, хрома, цинка и выдерживают при высокой температуре. При *напылении* поверхность изделия покрывают слоем расплавленного металла (цинка, алюминия, кадмия и др.) с помощью воздушной струи. При *плакировании* защищаемый металл подвергают совместной прокатке с защищающим (алюминием, титаном, нержавеющей сталью). *Гальванический способ* нанесения покрытий основан на осаждении под действием электрического тока тонкого слоя защитного металла (хрома, никеля, меди, кадмия) при погружении защищаемого изделия в раствор электролита.

Неметаллические покрытия подразделяются на лакокрасочные и эмалевые, смоляные, покрытия пленочными полимерными материалами, резиной, смазочными материалами, керамические покрытия и др. Покрытия, получаемые химической и электрохимической обработкой, превращают поверхностный слой изделия в химическое соединение, образующее сплошную защитную пленку. Наибольшее распространение имеют оксидные и фосфатные защитные пленки.

Протекторная защита основана на подсоединении к защищаемому изделию протектора с более отрицательным электрохимическим потенциалом. В агрессивной среде протектор будет являться анодом и разрушаться, а защищаемое изделие — катодом и разрушаться не будет.

Для уменьшения агрессивности окружающей среды в нее вводят добавки, называемые *ингибиторами* коррозии. Они значительно снижают скорость коррозии. Условием использования ингибиторов является эксплуатация изделия в замкнутой среде постоянного состава.

Жаростойкие и жаропрочные стали. Под *жаростойкими* сталями понимают стали, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности при высокой температуре (свыше 550°C). При нагреве стали происходит окисление поверхности и образуется оксидная пленка (окалина). Дальнейшее окисление определяется скоростью проникновения атомов кислорода через эту пленку. Через пленку оксидов железа они проникают очень легко. Для повышения жаростойкости сталь легируют элементами, образующими плотную пленку, через которую атомы кислорода не проникают. Эти элементы — хром, алюминий, кремний. Так как алюминий и кремний повышают хрупкость стали, чаще всего применяют хром. Чем больше его содержание, тем более жаропрочной является сталь. Сталь 15X5 выдерживает до 600°C, 40X9C2 — до 800°C, рассмотренные ранее 12X17 — до 900°C и 15X28 — до 1050°C.

Жаропрочные материалы способны противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Жаропрочные стали классифицируются по структуре.

Перлитные стали содержат малое количество углерода, легируются хромом молибденом, ванадием (12XM, 12X1MФ). Используют для изготовления труб, паропроводов и др. деталей, длительно работающих при температуре 500-550°C.

Мартенситные стали в большом количестве легированы хромом (15X11MФ, 15X12BHMФ). Они используются для деталей энергетического оборудования, длительно работающего при температуре 600-620°C. Особую группу мартенситных сталей составляют силхромы, применяемые для клапанов двигателей внутреннего

сгорания. Они дополнительно легированы кремнием (40X9C2, 40X10C2M).

Аустенитные стали легированы большим количеством хрома и никеля а также другими элементами (09X14H16Б, 09X14H19B2БР). Из этих сталей изготавливают детали газовых турбин, работающих при температуре 600-700°C.

Для работы при более высоких температурах (700-900°C) служат сплавы на основе никеля, называемые нимониками. Примером нимоника является сплав ХН77ТЮР, содержащий кроме никеля приблизительно 20% Cr, 2,5% Ti, 1% Al.

Для работы при температурах свыше 1000°C используют тугоплавкие металлы и их сплавы. Это — хром, ниобий, молибден, тантал, вольфрам. Они используются в атомной энергетике и в космической технике.

Температуры 1500-1700°C выдерживают жаропрочные керамические материалы на основе карбида и нитрида кремния.

5.3. Инструментальные стали и сплавы

По назначению инструментальные стали делятся на стали для режущего, измерительного и штампового инструмента. Кроме сталей, для изготовления режущего инструмента применяются металлокерамические твердые сплавы и минералокерамические материалы. Режущий инструмент работает в сложных условиях, подвержен интенсивному износу, при работе часто разогревается. Поэтому материал для изготовления режущего инструмента должен обладать высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью. *Теплостойкость* — это способность сохранять высокую твердость и режущие свойства при длительном нагреве.

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,7-1,3% углерода. Они маркируются буквой У и цифрой, показывающих содержание углерода в десятых долях процента (У7, У8, У9, У13). Буква А в конце марки показывает, что сталь высококачественная (У7А, У8А, У13А). Предварительная термообработка этих сталей — отжиг на зернистый перлит, окончательная — закалка в воде или растворе соли и низкий отпуск. После этого структура стали представляет собой мартенсит с включениями зернистого цементита. Твердость лежит в интервале HRC 56-64;

Для углеродистых инструментальных сталей характерны низкая теплостойкость (до 250°C) и низкая прокаливаемость (до 10-12 мм). Однако вязкая незакаленная сердцевина повышает устойчивость инструмента против поломок при вибрациях и ударах. Кроме того, эти стали достаточно дешевы и в незакаленном состоянии сами хорошо обрабатываются.

Стали У7-У9 применяются для изготовления инструмента, испытывающего ударные нагрузки (зубила, молотки, топоры). Стали У10-У13 идут на изготовление инструмента, обладающего высокой твердостью (напильники, хирургический инструмент). Стали У8-У12 применяются также для измерительного инструмента.

Низколегированные инструментальные стали содержат в сумме около 1-3% легирующих элементов. Они обладают повышенной по сравнению с углеродистыми сталями прокаливаемостью, но теплостойкость их невелика — до 400°C. Основные легирующие элементы — хром, кремний, вольфрам, ванадий. Маркируются эти стали так же, как конструкционные, но содержание углерода

дается в десятых долях процента. Если первая цифра в марке отсутствует, то содержание углерода превышает 1%. Например 9ХС, ХВГ, ХВ5.

Термообработка низколегированных инструментальных сталей — закалка в масле и отпуск при температуре 150-200°С. При этом обычно достигается сквозная прокаливаемость. Твердость после термообработки составляет HRC 62-64.

Благодаря большей прокаливаемости и закалке в масле низколегированные стали используются для изготовления инструмента большой длины и крупного сечения (например, сверл диаметром до 60 мм). Применяются для ручного инструмента по металлу и измерительного инструмента.

Быстрорежущие стали предназначены для работы при высоких скоростях резания. Главное их достоинство — высокая теплостойкость (до 650°С). Это достигается за счет большого количества легирующих элементов — вольфрама, хрома, молибдена, ванадия, кобальта. Маркируются быстрорежущие стали буквой Р, число после которой показывает среднее содержание вольфрама в %. Далее идут обозначения и содержание других легирующих элементов. Содержание углерода во всех быстрорежущих сталях приблизительно 1 %, а хрома 4%. Поэтому эти элементы в марке не указываются. Например, Р18, Р9, Р6М5, Р6М5Ф2К8.

Термообработка быстрорежущих сталей заключается в закалке от высоких температур (1200-1300°С) и трехкратном отпуске при 550-570°С. Трехкратный отпуск применяется для того, чтобы избавиться от остаточного аустенита, который присутствует после закалки в количестве приблизительно 30% и снижает режущие свойства. После термообработки сталь имеет мартенситную структуру с карбидными включениями. Твердость после термообработки составляет HRC 64-65.

Быстрорежущие стали применяются для инструмента, используемого для обработки металла на металлорежущих станках (резцы, фрезы, сверла). Для экономии дорогих быстрорежущих сталей режущий инструмент часто изготавливается сборным или сварным. Рабочую часть из быстрорежущей стали приваривают к основной части инструмента из конструкционной стали.

Металлокерамические твердые сплавы представляют собой спеченные порошковые материалы, основой которых служат карбиды тугоплавких металлов, а связующим — кобальт. Их теплостойкость доходит до 900-1000°С, а твердость HRA 80-97.

Твердые сплавы делятся на три группы. *Вольфрамовые* изготавливаются на основе карбида вольфрама и кобальта. Маркируются буквами ВК и цифрой показывающей содержание кобальта в % (ВК2, ВК6, ВК10). *Титановольфрамовые* твердые сплавы содержат дополнительно карбид титана. Они маркируются буквами Т, К и цифрами. После буквы Т указывается содержание карбида титана в %, а после буквы К — кобальта (Т15К10, Т15К6). *Титанотанталовольфрамовые* содержат дополнительно карбид титана. Маркируются буквами ТТ, после которых указывается суммарное содержание карбидов титана и тантала в % и буквой К, после которой указывается содержание кобальта (ТТ7К12, ТТ10К8).

Твердые сплавы изготавливаются в виде пластин которые припаиваются к державке из углеродистой стали. Применяют твердые сплавы для резцов, сверл, фрез и другого инструмента. Главный недостаток твердых сплавов — высокая хрупкость.

6. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

6.1. Алюминий и его сплавы

Алюминий — металл серебристого цвета, характеризующийся низкой плотностью ($2,7 \text{ г/см}^3$), высокой пластичностью ($\delta = 40\%$), низкими прочностью ($\sigma_{\text{н}} = 80 \text{ МПа}$) и твердостью (НВ 25). Температура плавления — 659°C . Обладает высокой электропроводностью и коррозионной стойкостью. Кристаллизуется в кубической гранецентрированной решетке и полиморфных превращений не имеет. Маркируется буквой А. В зависимости от количества примесей различают алюминий особой чистоты А999 (99,999% А1), высокой чистоты А995, А99, А97 и технической чистоты А85, А8, А7, А6, А5, А0. Применяется алюминий для производства фольги, электрических проводов. Как конструкционный материал используется редко вследствие малой прочности. Сплавы алюминия делятся на литейные и деформируемые.

Литейные сплавы алюминия маркируются буквами АЛ и числом, показывающим условный номер сплава. Чтобы сплав обладал хорошими литейными свойствами, он должен иметь низкий температурный интервал кристаллизации. Кроме того, желательно, чтобы он имел низкую температуру плавления. Этим требованиям удовлетворяют эвтектические сплавы. Наибольшее распространение получили сплавы алюминия с кремнием, образующие эвтектику при содержании 11,6% кремния. Эти сплавы называются *силуминами*.

Широко применяется силумин эвтектического состава АЛ2, содержащий 10-12% кремния. Он имеет очень хорошие литейные свойства, но малую прочность ($\sigma_{\text{в}} = 180 \text{ МПа}$). Уменьшение содержания кремния и добавка меди, магния и марганца ухудшает литейные свойства силуминов, но улучшает механические. Кроме силуминов используются литейные сплавы алюминия с медью (АЛ7) и магнием (АЛ8), не содержащие кремния. Они обладают значительно большей прочностью, чем силумины, но их литейные свойства хуже.

Деформируемые сплавы алюминия делятся на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой. К сплавам, не упрочняемым термической обработкой относятся сплавы алюминия с марганцем (маркируется АМц) и магнием (маркируются АМг1, АМг7). Эти сплавы имеют низкую прочность, но высокую пластичность и коррозионную стойкость.

К сплавам, упрочняемым термической обработкой относятся дюралюминий, ковочные сплавы, высокопрочные сплавы алюминия. *Дюралюминий* (дуралюмин) представляет собой сплав алюминия с медью (до 5%), марганцем (до 1,8%) и магнием (до 0,9%). Маркируется буквой Д и цифрой, показывающей порядковый номер (Д1, Д16 и др.). Подвергается термической обработке, которая состоит из закалки от температуры 500°C и естественного старения, заключающегося в выдержке при комнатной температуре в течение нескольких суток. В результате такой обработки прочность повышается в два раза (с 200-240 МПа до 450-500 МПа), а пластичность практически не меняется. Достоинством дюралюминия является высокая удельная прочность (отношение предела прочности к плотности), что особенно важно в самолетостроении. Дюралюминий выпускается в виде листов и прутков.

Высокопрочные сплавы алюминия содержат кроме меди и магния дополнительно цинк (до 10%). Эти сплавы маркируются буквой В (В95, В96). Подвергаются термообработке, аналогичной термообработке дюралюминия, но

естественное старение заменяется искусственным старением, заключающимся в выдержке при температуре 120-140°C в течение 16-24ч. В результате предел прочности доходит до 600-700 МПа.

Ковочные сплавы алюминия предназначены для производства деталей ковкой и штамповкой. Маркируются буквами АК и числом, показывающим порядковый номер. По химическому составу близки к дюралюминию (сплав АК1 совпадает по составу с Д1), иногда отличаясь более высоким содержанием кремния (АК6, АК8). Подвергаются аналогичной термообработке.

Малая плотность и высокая удельная прочность обусловили широкое применение алюминиевых сплавов в самолетостроении. Они составляют до 75% массы пассажирских самолетов. Из дюралюминия изготавливаются обшивки, каркасы, из высокопрочных сплавов — тяжело нагруженные детали, из ковочных — кованные и штампованные детали (например, лопасти винта).

6.2. Медь и ее сплавы

Медь — металл красно-розового цвета. Плотность меди 8.94 г/см³, температура плавления — 1083°C. Кристаллизуется в кубической гранцентрированной решетке и полиморфных превращений не имеет. Характеризуется невысокими прочностью ($\sigma = 150-250$ МПа) и твердостью (НВ 60) и хорошей пластичностью ($\delta = 25\%$ в литом состоянии и $\delta = 50\%$ в горячедеформированном). Обладает высокой электропроводностью, теплопроводностью, коррозионной стойкостью в пресной и морской воде. Благодаря высокой электропроводности около половины производимой меди используется в электро- и радиопромышленности. Как конструкционный материал медь не используется из-за высокой стоимости и низких механических свойств. Маркируется буквой М и цифрами, зависящими от содержания примесей. Медь марок М00 (0,01 % примесей), М0 (0,5%) и М1 (0,1%) используется для изготовления проводников электрического тока, медь М2 (0,3%) — для производства высококачественных сплавов меди, М3 (0,5%) — для сплавов обыкновенного качества. Основные сплавы меди — латуни и бронзы.

Латунями называют сплавы меди с цинком. Цинк повышает прочность и пластичность сплава, но до определенных пределов. Наибольшей пластичностью обладают латуни, содержащие 30% цинка, а наибольшей прочностью — 45%. Поэтому более 45% цинка в латунях содержаться не может. Кроме того, цинк удешевляет сплав, так как он дешевле меди. Латуни характеризуются высокой электропроводностью и теплопроводностью, коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием.

По технологическому признаку латуни делятся на деформируемые и литейные. По химическому составу латуни делятся на простые (двойные), в которых присутствуют только медь и цинк и сложные (многокомпонентные), в которые для улучшения различных свойств добавлены другие элементы. Наиболее распространены добавки алюминия, олова, кремния, никеля и др.

Латуни маркируются буквой Л. В деформируемых латунях указывается содержание меди и легирующих элементов, которые обозначаются соответствующими буквами (О — олово, А — алюминий, К — кремний, Н — никель, Мц — марганец, Ж — железо и т.д.). Содержание элементов дается в % после всех буквенных обозначений. Например, латунь Л63 содержит 63% меди и 37% цинка. Латунь ЛАЖ 60-1-1 содержит 60% меди, 1% алюминия, 1% железа и

38% цинка. В марках литейных латуней указывается содержание цинка, а количество легирующих элементов (в %) ставится после букв их обозначающих. Например, литейная латунь ЛЦ40Мц3А содержит 40% цинка, 3% марганца, менее 1% алюминия и 56% меди.

Бронзами называются сплавы меди с оловом, алюминием, свинцом и другими элементами, среди которых цинк не является основным. Бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошими литейными свойствами, хорошо обрабатываются давлением и резанием. По названию основного легирующего элемента бронзы делятся на оловянные, алюминиевые, кремнистые, бериллиевые, свинцовые и др.

По технологическому признаку бронзы делят на деформируемые и литейные. Маркируются бронзы буквами Бр, за которыми показывается содержание легирующих элементов в %. Обозначения легирующих элементов и отличия в марках деформируемых и литейных сплавов у бронз такие же, как у латуней. Например, деформируемая бронза БрОФ 6,5-0,4 содержит 6,5% олова и 0,4% фосфора, а литейная бронза БрОЗЦ7С5Н — 3% олова, 7% цинка, 5% свинца, менее 1% никеля.

Особенно широкое применение в машиностроении имеют оловянные бронзы. Деформируемые оловянные бронзы обладают высокой пластичностью и упругостью. Из них изготавливают прутки, трубы, ленты. Литейные оловянные бронзы имеют хорошие литейные свойства, высокую коррозионную стойкость. Из них изготавливают арматуру, работающую в условиях пресной и морской воды. Олово — относительно дорогой металл, поэтому его стремятся частично или полностью заменить в составе бронз другими.

Алюминиевые бронзы (БрА7, БрАЖН 10-4-4) обладают более высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью по сравнению с оловянными. Кремнистые бронзы (БрКМц 3-1) имеют хорошую упругость и поэтому используются для изготовления пружинящих деталей. Свинцовые бронзы (БрСЗО) обладают высокими антифрикционными свойствами и применяются в подшипниках скольжения. Бериллиевые бронзы (БрБ2) отличаются высокой твердостью, прочностью, упругостью и износостойкостью.

6.3. Сплавы других цветных металлов

Магний и его сплавы. Магний — самый легкий металл, используемый в промышленности (плотность — $1,74 \text{ г/см}^3$). Имеет гексагональную плотноупакованную решетку и полиморфных превращений не претерпевает. Температура плавления магния — $651 \text{ }^\circ\text{C}$. Недостатками магния являются низкая прочность и пластичность, низкая коррозионная стойкость, способность к возгоранию при нагреве. Поэтому чистый магний в качестве конструкционного материала не используется.

Свойства магния значительно улучшаются при сплавлении его с другими элементами, основные из которых — алюминий, марганец и цинк. Магниевые сплавы делятся на литейные и деформируемые. Литейные сплавы маркируются буквами МЛ, а деформируемые — МА. За буквами следует условный номер сплава. Магниевые сплавы, как и алюминиевые способны к упрочняющей термообработке (закалке и старению), но эффект повышения прочности при этом невысок.

Основное преимущество сплавов магния — легкость. Поэтому они применяются в авиа- и ракетостроении. Сплавы магния хорошо свариваются и обрабатываются резанием, но имеют невысокую коррозионную стойкость.

Титан и его сплавы. Титан — легкий (плотность $4,5 \text{ г/см}^3$) и пластичный металл серебристо-белого цвета. Температура плавления титана — 1665°C . Он обладает низкой электропроводностью и теплопроводностью. Механические свойства титана: $\sigma \approx 300 \text{ МПа}$, $\delta = 60\text{-}70\%$. Главное достоинство титана и его сплавов — высокая коррозионная стойкость. Она достигается за счет образования на его поверхности плотной оксидной пленки. Недостатки титана — склонность к взаимодействию с газами при температурах выше $500\text{-}600^\circ\text{C}$, плохая обрабатываемость резанием, высокая стоимость.

Главная цель легирования титана — повышение механических свойств. Основными легирующими элементами являются алюминий, хром, молибден, ванадий, марганец. По технологическому признаку сплавы титана делятся на литейные и деформируемые. Маркируются титановые сплавы чаще всего буквами ВТ. Среди сплавов титана имеются обладающие высокой прочностью (ВТ6, ВТ 14 с $\sigma = 1000\text{-}1200 \text{ МПа}$), жаропрочностью до 500°C (ВТ3-1, ВТ8). Литейные сплавы титана (ВТ5Л, ВТ6Л) обладают хорошими литейными свойствами. Используются титановые сплавы в химической промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости, в ракетной и авиационной технике благодаря легкости и высокой удельной прочности.

Другие цветные металлы нашли меньшее применение в технике. *Тугоплавкие металлы* (вольфрам, молибден, хром, тантал, ниобий) и никель, а также их сплавы используются как жаропрочные. Сплавы *легкоплавких металлов* (олова, цинка, свинца) используются в подшипниках скольжения (эти сплавы называются баббиты) и в качестве припоев для пайки металлов. Кроме того, значительная часть цинка расходуется на нанесение покрытий на металлические изделия, олова — на лужение консервной жести, свинца — на изготовление оболочек электрических кабелей, производство свинцовых аккумуляторов, емкостей для хранения радиоактивных материалов.

7. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

7.1. Пластические массы

Свойства, состав и классификация пластмасс. *Пластическими массами* (пластмассами) называются материалы, получаемые на основе природных или синтетических полимеров. Пластмассы являются важнейшими современными конструкционными материалами. Они обладают рядом ценных свойств: малой плотностью (до 2 г/см^3), высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, звукоизоляционными свойствами. Некоторые пластмассы обладают оптической прозрачностью, фрикционными и антифрикционными свойствами, стойкостью к истиранию и др. Кроме того, пластмассы имеют хорошие технологические свойства: легко формуются, прессуются, обрабатываются резанием, их можно склеивать и сваривать. Недостатками пластмасс являются низкая теплостойкость, низкая ударная вязкость, склонность к старению для ряда пластмасс.

Основой пластмасс являются полимерные *связующие* вещества. Кроме связующих в состав пластмасс входят: *наполнители* для повышения прочности и придания специальных свойств; *мистификаторы* для повышения пластичности, что необходимо при изготовлении изделий из пластмасс; *отвердители*, ускоряющие переход пластмасс в неплавкое, твердое и нерастворимое состояние; *стабилизаторы*, предотвращающие или замедляющие процесс старения; *красители*.

По поведению при нагреве все пластмассы делятся на термопластичные и термореактивные. *Термопластичные* при неоднократном нагревании и охлаждении каждый раз размягчаются и затвердевают. *Термореактивные* при нагревании размягчаются, затем еще до охлаждения затвердевают (вследствие протекания химических реакций) и при повторном нагревании остаются твердыми.

По виду наполнителя пластмассы делятся на порошковые, волокнистые, слоистые, газонаполненные и пластмассы без наполнителя.

По способу переработки в изделия пластмассы подразделяются на литьевые и прессовочные. Литьевые перерабатываются в изделия методами литьевого прессования и являются термопластичными. Прессовочные перерабатываются в изделия методами горячего прессования и являются термореактивными.

По назначению пластмассы делятся на конструкционные, химически стойкие, прокладочные и уплотнительные, фрикционные и антифрикционные, теплоизоляционные и теплозащитные, электроизоляционные, оптически прозрачные, облицовочно-декоративные и отделочные.

Слоистые пластмассы получают прессованием (или намоткой) слоистых наполнителей, пропитанных смолой. Они обычно выпускаются в виде листов, плит, труб, из которых механической обработкой получают различные детали.

Текстолит — это материал, полученный прессованием пакета кусков хлопчатобумажной ткани, пропитанной смолой. Обладает хорошей "способностью поглощать вибрационные нагрузки, электроизоляционными свойствами. Теплостоек до 80°C . *Стеклотекстолит* отличается от текстолита тем, что в качестве наполнителя используется стеклоткань. Более прочен и теплостоек, чем текстолит, имеет лучшие электроизоляционные свойства. В *асботекстолите*

наполнителем является асбестовая ткань. Кроме электроизоляционных, он имеет хорошие теплоизоляционные и фрикционные свойства. *Гетинакс* представляет собой материал, полученный прессованием нескольких слоев бумаги, пропитанной смолой. Он обладает электроизоляционными свойствами, устойчив к действию химикатов, может применяться при температуре до 120-140°C. *Стекловолокнистый анизотропный материал* (СВАМ) получают прессованием листов стеклошпона, пропитанных смолой. Стеклошпон изготавливается из стеклянных нитей, которые склеиваются между собой сразу после изготовления. Листы стеклошпона располагаются в материале так, чтобы волокна соседних листов располагались под углом 90°. СВАМ обладает высокой прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами, теплостоек до 200-400°.

Волокнистые пластмассы представляют собой композиции из волокнистого наполнителя, пропитанного смолой. Они делятся на волокниты, асболокниты и стекловолокниты.

В *волокнитах* в качестве наполнителя применяется хлопковое волокно. Они используются для относительно крупных деталей общетехнического назначения с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам. *Асболокниты* имеют наполнителем асбест — волокнистый минерал, расщепляющийся на тонкое волокно диаметром 0,5 мкм. Обладают теплостойкостью до 200°C, устойчивостью к ударным воздействиям, химической стойкостью, электроизоляционными и фрикционными свойствами. *Стекловолокниты* имеют в качестве наполнителя короткое стекловолокно или стеклонити. Прочность, электроизоляционные свойства и водостойкость стекловолокнитов выше, чем у волокнитов. Применяются для изготовления деталей, обладающих повышенной прочностью.

Порошковые пластмассы в качестве наполнителя используют органические порошки (древесная мука, порошкообразная целлюлоза) и минеральные порошки (молотый кварц, тальк, цемент, графит). Эти пластмассы обладают невысокой прочностью, низкой ударной вязкостью, электроизоляционными свойствами. Пластмассы с органическими наполнителями применяются для ненагруженных деталей общетехнического назначения — корпусов приборов, рукояток, кнопок. Минеральные наполнители придают порошковым пластмассам химическую стойкость, водостойкость, повышенные электроизоляционные свойства.

Рассмотренные выше пластмассы со слоистыми, волокнистыми и порошковыми наполнителями имеют чаще всего терморезистивные связующие, хотя имеются пластмассы с термопластичными связующими.

Пластмассы без наполнителя чаще всего являются термопластичными материалами. Рассмотрим наиболее важные из них.

Полиэтилен $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ — продукт полимеризации бесцветного газа — этилена. Один из самых легких материалов (плотность 0,92 г/см³), имеет высокую эластичность, химически стоек, морозостоек. Недостатки — склонность к старению и невысокая теплостойкость (до 60°C). Используется для изготовления пленки, изоляции проводов, изготовления коррозионно-стойких труб, уплотнительных деталей. Занимает первое место в общем объеме производства пластмасс.

Полипропилен $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-)_n$ — продукт полимеризации газа пропилена. По свойствам и применению аналогичен полиэтилену, но более теплостоек (до 150°C) и менее морозостоек (до -10°C).

Поливинилхлорид $(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$ используется для производства винипласта и пластика. *Винипласт* представляет собой твердый листовый материал, полученный из поливинилхлорида без добавки пластификаторов. Обладает высокой прочностью, химической стойкостью, электроизоляционными свойствами. *Пластикат* получают при добавлении в поливинилхлорид пластификаторов, повышающих его пластичность и морозостойкость.

Полистирол $(-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5-)_n$ — твердый, жесткий, прозрачный полимер. Имеет очень хорошие электроизоляционные свойства. Его недостатки — низкая теплостойкость, склонность к старению и растрескиванию. Используется в электротехнической промышленности.

Органическое стекло — прозрачный термопластичный материал на основе полиакриловой смолы. Отличается высокой оптической прозрачностью, в 2 раза легче минеральных стекол, обладает химической стойкостью. Недостатки — низкая твердость и низкая теплостойкость. Используется для остекления в автомобиле- и самолетостроении, для прозрачных деталей в приборостроении.

Фторопласты имеют наибольшую термическую и химическую стойкость из всех термопластичных полимеров. Фторопласт-4 $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$ водостоек, не горит, не растворяется в обычных растворителях, обладает электроизоляционными и антифрикционными свойствами. Применяется для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах при высокой температуре, электроизоляции и др. Фторопласт-3 $(-\text{CF}_2-\text{CFCl}-)_n$ по свойствам и применению аналогичен фторопласту-4, уступая ему по термо- и химической стойкости и превосходя по прочности и твердости.

Газонаполненные пластмассы представляют собой материалы на основе синтетических смол, содержащие газовые включения. В *пенопластах* поры, заполненные газом, не соединяются друг с другом и образуют замкнутые объемы. Они отличаются малой плотностью (0,02-0,2 г/см³), высокими тепло-, звуко- и электроизоляционными свойствами, водостойкостью. Недостатки пенопластов — низкая прочность и низкая теплостойкость (до 60°C). Используются для теплоизоляции и звукоизоляции, изготовления непотопляемых плавучих средств, в качестве легкого заполнителя различных конструкций. Мягкие виды пенопластов используются для изготовления мебели, амортизаторов и т.п.

Поропласты — это газонаполненные пластмассы, поры которых сообщаются между собой. Их плотность составляет 0,02-0,5 г/см³. Они представляют собой мягкие эластичные материалы, обладающие водопоглощением.

7.2. Резиновые материалы

Резина представляет собой искусственный материал, получаемый в результате специальной обработки резиновой смеси, основным компонентом которой является каучук. *Каучук* — это полимер, отличительной особенностью которого является способность к очень большим обратимым деформациям при небольших нагрузках. Это свойство объясняется строением каучука. Его макромолекулы имеют вытянутую извилистую форму. При нагрузке происходит выпрямление макромолекул, что и объясняет большие деформации. При разгрузке макромолекулы принимают исходную форму. Различают натуральный и синтетический каучук. Натуральный каучук добывают из некоторых видов тропических растений в незначительных количествах. Поэтому производство

резины основано на применении синтетических каучуков. Сырьем для производства синтетического каучука служит спирт, на смену которому приходит нефтехимическое сырье.

Резину получают из каучука путем *вулканизации*, т.е. в процессе химического взаимодействия каучука с *вулканизатором* при высокой температуре. Вулканизатором чаще всего является сера. В процессе вулканизации сера соединяет нитевидные молекулы каучука и образуется пространственная сетчатая структура. В зависимости от количества серы получается различная частота сетки. При введении 1-5% серы образуется редкая сетка и резина получается мягкой. С увеличением содержания серы сетка становится все более частой, а резина более твердой и приблизительно при 30% серы получается твердый материал, называемый эбонитом.

Кроме каучука и вулканизатора в состав резины входит ряд других веществ. *Наполнители* вводят в состав резины от 15 до 50% к массе каучука. Активные наполнители (сажа, оксид цинка и др.) служат для повышения механических свойств резин. Неактивные наполнители (мел, тальк и др.) снижают стоимость резиновых изделий. *Пластификаторы* (парафин, вазелин, стеариновая кислота, мазут, канифоль и др.) предназначены для облегчения переработки резиновой смеси, повышения эластичности и морозостойкости резины. *Противостарители* служат для замедления процесса старения резины, приводящего к ухудшению ее эксплуатационных свойств. *Красители* служат для придания резине нужного цвета. В резину также добавляются *регенераты* — продукты переработки старых резиновых изделий и отходы резинового производства. Они снижают стоимость резин.

Основное свойство резины — очень высокая эластичность. Резина способна к большим деформациям, которые почти полностью обратимы. Кроме того, резина характеризуется высоким сопротивлением разрыву и истиранию, газо- и водонепроницаемостью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, небольшой плотностью, малой сжимаемостью, низкой теплопроводностью.

По назначению резины подразделяются на резины общего и специального назначения. Из резин общего назначения изготавливаются автомобильные шины, транспортные ленты, ремни ременных передач, изоляция кабелей, рукава и шланги, уплотнительные и амортизационные детали, обувь и др. Резины общего назначения могут использоваться в горячей воде, слабых растворах щелочей и кислот, а также на воздухе при температуре от -10 до +150°C.

Резины специального назначения подразделяются на теплостойкие, которые могут работать при температуре до 250-350°C; морозостойкие, выдерживающие температуру до -70°C; маслобензостойкие, работающие в среде бензина, других топлив, масел и нефтепродуктов; светоозоностойкие, не разрушающиеся при работе в атмосферных условиях в течении нескольких лет, стойкие к действию сильных окислителей; электроизоляционные, применяемые для изоляции проводов и кабелей; электропроводящие, способные проводить электрический ток.

7.3. Древесные материалы

Древесина — это органический материал растительного происхождения, представляющий собой сложную ткань древесных растений. Она составляет

основную массу ствола деревьев. Древесина является волокнистым материалом, причем волокна в ней расположены вдоль ствола. Поэтому для нее характерна *анизотропия*, т.е. ее свойства вдоль и поперек волокон различны.

Достоинствами древесины являются относительно высокая прочность; малая объемная масса и, следовательно, высокая удельная прочность; хорошее сопротивление ударным и вибрационным нагрузкам; малая теплопроводность и, следовательно, хорошие теплоизоляционные свойства; химическая стойкость; хорошая технологичность (легкость обработки и изготовления изделий). К недостаткам древесины следует отнести гигроскопичность, т.е. способность впитывать влагу, и возникающую из-за изменения влажности нестабильность свойств и размеров (усушка и набухание), а также отсутствие огнестойкости, неоднородность строения, склонность к гниению. Для защиты древесины от увлажнения, загнивания и воспламенения производят окраску лаками и красками, опрыскивание и пропитку специальными химическими веществами.

Материалы из древесины можно разделить на лесоматериалы, сохраняющие природную физическую структуру и химический состав древесины и древесные материалы, полученные путем специальной обработки исходной древесины. В свою очередь лесоматериалы подразделяются на необработанные (круглые), пиломатериалы, лущеные (древесный шпон) и колотые.

Круглые лесоматериалы получают из спиленных деревьев после очистки от ветвей, разделения поперек ствола на части требуемой длины и окорки. Они применяются в строительстве, в качестве опор и столбов линий электропередач, в качестве сырья.

Пиломатериалы получают лесопилением. Пиломатериалы с опиленными кромками называют обрезными, неопиленными — необрезными. Подвергающиеся после пиления дальнейшей обработки называют строгаными. Пиломатериалы делятся в зависимости от поперечного сечения на следующие виды: *брусья* (толщина или ширина больше 100 мм), *бруски* (ширина не более двойной толщины), *доски* (ширина более двойной толщины), *планки* (узкие и тонкие доски).

Древесный шпон — это широкая ровная стружка древесины, получаемая путем лущения. Толщина листов шпона 0,5-1,5 мм. Используется шпон в качестве полуфабрикатов для изготовления фанеры, облицовочного материала для изделий из древесины.

К материалам, полученным путем специальной обработки древесины можно отнести фанеру, прессованную и модифицированную древесину, древесностружечные и древесноволокнистые плиты и др. *Фанера* — это листовый материал, полученный путем склейки листов шпона. При этом волокна соседних листов находятся под прямым углом друг к другу. Толщина фанеры от 1 до 12 мм, более толстые материалы называют плитами. *Столярные плиты* представляют собой трехслойные щиты, состоящие из реечного заполнителя, оклеенного с обеих сторон древесным шпоном. *Прессованная древесина* — это материал, получаемый при горячем прессовании брусков, досок и других заготовок поперек волокон под давлением до 30 МПа. В результате прочность возрастает по сравнению с исходной более чем в два раза. *Модифицированная древесина* представляет собой материал, полученный при обработке древесины каким-либо химическим веществом (смолой, аммиаком и др.) с целью повышения механических свойств и придания водостойкости. *Древесностружечные плиты* изготавливают прессованием древесной стружки со связующим. Плиты могут быть облицованными шпоном, фанерой или

бумагой. *Древесноволокнистые плиты* изготавливают путем прессования древесных волокон при высокой температуре, иногда с добавлением связующих веществ.

7.4. Неорганические материалы

Стеклом называется твердый аморфный термопластичный материал получаемый переохлаждением расплава различных оксидов. В состав стекла входит стеклообразующие кислотные оксиды (SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 и др.), а также основные оксиды (K_2O , CaO , Na_2O и др.), придающие ему специальные свойства и окраску. Оксид кремния SiO_2 является основой практически всех стекол и входит в их состав в количестве 50 — 100%. По назначению стекла подразделяются на *строительные* (оконные, витринные и др.), *бытовые* (стеклотара, посуда, зеркала и др.) и *технические* (оптические, свето- и электротехнические, химико-лабораторные, приборные и др.).

Важными свойствами стекла являются оптические. Обычное стекло пропускает около 90%, отражает — 8% и поглощает — 1 % видимого света. Механические свойства стекла характеризуются высоким сопротивлением сжатию и низким — растяжению. Термостойкость стекла определяется разностью температур которую оно может выдержать без разрушения при резком охлаждении в воде. Для большинства стекол термостойкость колеблется от 90 до 170°C, а для кварцевого стекла, состоящего из чистого SiO_2 — 1000°C. Основным недостатком стекла — высокая хрупкость.

Керамика — это неорганический минеральный материал, получаемый из отформованного минерального сырья путем спекания при высоких температурах (1200-2500°C). Структура керамики состоит из кристаллической, стекловидной (аморфной) и газовой фазы. Кристаллическая фаза является основой керамики, ее количество составляет до 100%. Она представляет собой различные химические соединения и твердые растворы. Стекловидная фаза находится в керамике в виде прослоек стекла. Ее количество составляет до 40%. Она снижает качество керамики. Газовая фаза представляет собой газы, находящиеся в порах керамики.

По назначению керамика может быть разделена на строительную, бытовую и художественно-декоративную, техническую. Строительная (например, кирпич) и бытовая (например, посуда) чаще всего имеет в структуре газонаполненные поры и изготавливается из глины. Техническая керамика имеет почти однофазную кристаллическую структуру и изготавливается из чистых оксидов (реже карбидов, боридов или нитридов). Основные оксиды, используемые для производства керамики — Al_2O_3 , ZnO , MgO , CaO , BeO . Техническая керамика используется в качестве огнеупорного, конструкционного и инструментального материала. Она обладает высокой прочностью при сжатии и низкой при растяжении. Главный недостаток керамики, как и стекла — высокая хрупкость.

Ситаллы представляют собой материалы, полученные путем кристаллизации стекол. Ситаллы изготавливают путем плавления стеклового материала с добавкой катализаторов кристаллизации. Далее расплав охлаждается до пластического состояния и из него формуется изделия. Кристаллизация обычно происходит при повторном нагревании изделий.

По структуре ситаллы занимают промежуточное место между стеклом и керамикой. Их структура состоит из зерен кристаллической фазы, скрепленных стекловидной прослойкой. Содержание кристаллической фазы составляет 30-95%. Пористость отсутствует. Ситаллы характеризуются исключительной

мелкозернистостью. По внешнему виду могут быть прозрачными и непрозрачными.

Структура ситаллов определяет их свойства. Ситаллы имеют высокую твердость, высокую прочность при сжатии и низкую при растяжении, обладают жаропрочностью до 900-1200°C, жаростойкостью, износостойкостью. Они характеризуются высокой химической стойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. Ситаллы отличаются хрупкостью, однако меньшей, чем стекло. Применяются ситаллы для деталей, работающих при высоких температурах и в агрессивных средах, деталей радиоэлектроники, инструментов.

7.5 Композиционные материалы

Композиционными называют сложные материалы в состав которых входят отличающиеся по свойствам нерастворимые друг в друге компоненты. Основой композиционных материалов является сравнительно пластичный материал, называемый *матрицей*. В матрице равномерно распределены более твердые и прочные вещества, называемые *упрочнителями* или наполнителями. Матрица может быть металлической, полимерной, углеродной, керамической. По типу упрочнителя композиционные материалы делятся на *дисперсноупрочненные*, в которых упрочнителем служат дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов и др., *волокнистые*, в которых упрочнителем являются волокна различной формы и *слоистые*, состоящие из чередующихся слоев волокон и листов матричного материала.

Среди дисперсноупрочненных материалов ведущее место занимает САП (спеченная алюминиевая пудра), представляющий собой алюминий, упрочненный дисперсными частицами оксида алюминия. Получают САП из окисленной с поверхности алюминиевой пудры путем последовательного брикетирования, спекания и прессования. Структура САП состоит из алюминиевой основы с равномерно распределенными частицами Al_2O_3 . С увеличением содержания Al_2O_3 повышается прочность, твердость, жаропрочность САП, но снижается его пластичность. Марки САП-1, САП-2, САП-3, САП-4 содержат, соответственно, 6-8, 9-12, 13-17, 18-22% Al_2O_3 . Высокая прочность САП объясняется большой дисперсностью упрочнителя и малым расстоянием между его частицами. По жаропрочности САП превосходит все алюминиевые сплавы.

В волокнистых композиционных материалах упрочнителем служат углеродные, борные, синтетические, стеклянные и др. волокна, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений (карбиды кремния, оксиды алюминия и др.) или металлическая проволока (стальная, вольфрамовая и др.). Свойства материала зависят от состава компонентов, количественного соотношения и прочности связи между ними. Для металлических композиционных материалов прочная связь между волокном и матрицей достигается благодаря их взаимодействию. Связь между компонентами в композиционных материалах на неметаллической основе осуществляется с помощью адгезии. Повышение адгезии волокон к матрице достигается их поверхностной обработкой. Производится осаждение нитевидных кристаллов на поверхность волокон. При этом получают «мохнатые» волокна с улучшенной адгезией, благодаря чему улучшаются механические свойства композиционного материала.

Среди неметаллических волокнистых композиционных материалов наибольшее распространение получили материалы с полимерной матрицей. Материалы, содержащие в качестве упрочнителя углеродные волокна, называются *карбоволокнитами*. Они обладают низкими теплопроводностью и электропроводностью, хорошей износостойкостью. Недостаток карбоволокнитов — низкая прочность при сжатии и сдвиге. Материалы с упрочнителем в виде волокон бора называют *бороволокнитами*. Они характеризуются высокой прочностью при растяжении, сжатии и сдвиге, высокими твердостью и модулем упругости, тепло- и электропроводностью. Материалы, содержащие в качестве упрочнителя синтетические волокна (капрон, лавсан и др.), называются *органоволокнитами*. Они обладают высокой удельной прочностью в сочетании с хорошей пластичностью и ударной вязкостью, электроизоляционными свойствами.

Волокнистые композиционные материалы на металлической основе имеют более высокие характеристики, зависящие от свойств матрицы. В качестве матрицы используются металлы, имеющие небольшую плотность (алюминий, магний, титан), их сплавы, а также никель для создания жаропрочных материалов. В качестве упрочнителя используют стальную проволоку (наиболее дешевый материал), борные и углеродные волокна. При создании жаропрочных композиционных материалов на основе никеля используется вольфрамовая проволока.

8. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

8.1. Экономически обоснованный выбор материала

Правильный выбор материала для конкретного изделия является исключительно важной задачей. Он производится с учетом целого ряда критериев. При этом технические критерии выбора материала определяются условиями эксплуатации изделия. Они определяют комплекс механических свойств (прочность, упругость, твердость, пластичность, вязкость), а в ряде случаев и требования к специальным свойствам (коррозионная стойкость, жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, радиационная стойкость и др.). Способ изготовления изделий определяет требования к технологическим свойствам материала (ковкость, литейные свойства, обрабатываемость резанием, свариваемость). Если изделие должно подвергаться термической обработке, следует также учитывать прокаливаемость и закаливаемость.

Приведенные требования накладывают определенные ограничения на выбор материала. Если они оказываются достаточно жесткими, то возможный выбор ограничивается весьма узкой группой материалов. При меньшей жесткости требований выбор становится более широким. В любом случае, когда возможны различные варианты решения задачи выбора материала, окончательный ответ должен дать экономический анализ вопроса. Исходными данными для этого служат цены материалов. Однако выбор наиболее дешевого материала далеко не всегда будет оптимальным. Экономия также может быть получена за счет следующих факторов.

1. Использование более прочного материала. Это дает возможность уменьшить размеры изделия, т.е. позволяет снизить расход материала на единицу готовой продукции. Уменьшение размеров также способствует снижению затрат на транспортирование изделий. Кроме того, появляется возможность повысить мощность и производительность оборудования, изготовленного из более прочных материалов.

2. Применение более технологичного материала, позволяющего применять более экономичные методы изготовления и обработки изделий. При этом экономия может быть получена как непосредственно за счет снижения себестоимости изготовления, так и за счет снижения расхода материала благодаря уменьшению отходов и брака.

3. Применение материала с более длительным сроком службы, что приводит к повышению долговечности готового изделия.

4. Использование материалов, способных работать в более тяжелых условиях (при более высоких нагрузках, более высоких температурах, в более агрессивной среде). Применение таких материалов при изготовлении различных машин и оборудования позволяет изменить рабочие параметры машин (например, повысить давление или температуру), что приводит к повышению производительности и, соответственно, снижению себестоимости единицы работы или продукции.

Перечисленные факторы связаны, прежде всего, с повышением качества используемого материала. Более качественный материал, как правило, является и более дорогостоящим, так как улучшение качества сопровождается увеличением затрат на производство материала. Правильный выбор материала должен

учитывать как экономический эффект от повышения качества, так и увеличение стоимости материала. Для этого производится сравнительный расчет экономической эффективности применения различных материалов, по результатам которого и делается окончательный выбор. Только если увеличение цены перекрывается полученным экономическим эффектом, применение более дорогостоящего материала целесообразно. Методика определения экономической эффективности здесь не рассматривается, так как является предметом специальных курсов. Приведем некоторые примеры.

Для строительных конструкций могут быть применены как углеродистые, так и низколегированные стали (см. раздел 5.1.). Низколегированные стали обеспечивают повышение предела текучести приблизительно в 1,5 раза по сравнению с углеродистыми. Благодаря этому масса конструкций снижается на 20-50%. При этом себестоимость проката из низколегированных сталей на 10-15% выше, чем из углеродистых. Отсюда видно, что себестоимость низколегированных сталей возрастает в меньшей степени, чем достигается экономия из-за увеличения прочности. Но не только этим обусловлена эффективность применения низколегированных сталей. В отличие от углеродистых сталей, они не склонны к хрупким разрушениям при температуре ниже -40°C . Это обеспечивает высокую надежность и долговечность конструкций. Таким образом, применение низколегированных строительных сталей экономически выгодно.

В хромоникелевых коррозионных сталях при эксплуатации при $450-850^{\circ}\text{C}$ развивается межкристаллитная коррозия (см. раздел 5.2.). Для уменьшения склонности к коррозии стали дополнительно легируются титаном или в них снижают содержание углерода. Это делает сталь более дорогостоящей. Однако удорожание оправдывается значительно более длительным сроком службы таких сталей. В том случае, когда рабочая температура не превышает 400°C , использование более дорогостоящих сталей становится экономически не оправданным.

Целесообразность применения пластмасс диктуется техническими соображениями. Свойства пластмасс с одной стороны делают их незаменимыми, а с другой часто не позволяют им конкурировать с металлическими материалами. Если же применение пластмасс по техническим соображениям возможно, оно обычно является экономически эффективным. Благодаря малой плотности пластмассы в 4 раза снижается материалоемкость изделий. Затраты на производство пластмассовых изделий значительно меньше, чем на производство металлических. Это происходит вследствие хорошей технологичности пластмасс: производство пластмассовых изделий происходит путем прессования, литья или выдавливания, а металлические изделия производятся литьем или обработкой давлением, путем механической и термической обработки с большим числом операций. Часто применение пластмасс в машинах и оборудовании приводит к уменьшению затрат на смазку, ремонт, повышению надежности, увеличению срока службы и т. д. Благодаря всему этому себестоимость пластмассовых изделий в 2-3 раза ниже себестоимости аналогичных металлических.

8.2. Основные направления экономии материалов

Доля стоимости материалов составляет от 40 — 70% всех затрат на изготовление готовых изделий. А для изделий, производство которых широко

механизировано и автоматизировано (шарикоподшипники, болты, электрокабели) эта доля доходит до 80%. Поэтому экономия материалов — один из важнейших резервов снижения себестоимости готовой продукции. Еще более важен тот факт, что запасы сырья для производства материалов (различные руды для металлов и сплавов, нефть и газ для полимерных материалов и др.) являются ограниченными. Отсюда ясно, что экономия и повышение эффективности использования материалов являются насущной задачей.

Огромное количество материалов теряется в процессе производства готовых изделий. В нашей стране вследствие устаревших методов разлива стали из каждой ее тонны получалось примерно 750 кг готового проката, а далее в машиностроении из каждой тонны проката около 250 кг уходило в отходы. Потери материала при производстве изделий характеризует *коэффициент использования материала*, представляющий собой отношение массы готового изделия к массе заготовки. Для профильного проката он составляет 0,7; пружин — 0,35; горячей штамповки — 0,45 и свободнойковки — 0,3. Более высокий коэффициент использования материала характерен для литейного производства: для литья в песчаные формы оно составляет 0,7; литья в кокиль — 0,75; в оболочковые формы — 0,8; литья по выплавляемым моделям — 0,9 и литья под давлением — 0,95. Очень высок коэффициент использования при изготовлении изделий из металлических порошков. Благодаря хорошей технологичности пластмасс для них коэффициент использования материала выше, чем для металлов и сплавов: при прессовании он равен 0,9; при литье и выдавливании — 0,95. Из приведенных данных ясно, что основной путь экономии материала в процессе производства изделий — *использование современных малоотходных и безотходных технологий*: непрерывной разлива стали, малоотходных методов штамповки, специальных способов литья, методов порошковой металлургии.

Другое направление экономии материалов — *максимальное использование вторичных ресурсов*. Это не только экономическая, но и экологическая задача, так как скопление отходов наносит огромный вред окружающей среде. Однако следует иметь в виду, что переработка отходов не всегда является технически выполнимой или экономически рентабельной. Использование металлолома в производстве металлов и сплавов не вызывает технических трудностей и экономически выгодно. Производство стали из металлолома обходится в несколько раз дешевле, чем из чугуна. Кроме того, каждая тонна металлолома экономит 1,5 тонны железной руды. Производство цветных металлов из вторичного сырья также высокоэффективно. На производство тонны алюминия из металлолома затрачивается приблизительно в 20 раз меньше электроэнергии и в 7 раз меньше топлива. Используются отходы и других цветных металлов. Большая часть металлолома — это промышленные отходы и пришедшие в негодность машины и оборудование. С экологической точки зрения важно также осуществлять переработку металлосодержащих шлаков, находящихся в отвалах и терриконах.

Значительно хуже обстоит дело с повторной переработкой пластмасс. Экологическая проблема заключается в том, что полимерные отходы разлагаются очень медленно или совсем не разлагаются. Некоторые виды пластмасс (терморезистивные) вообще не поддаются вторичной обработке. Если же их сжигать, то это вызовет значительное загрязнение атмосферы. Из пластмасс, вторичное использование которых возможно, каждый вид требует своего способа переработки. Поэтому необходимо сортировать отходы по типу пластмасс. Это

практически неосуществимо: на глаз распознать тип пластмассы очень трудно, а точный анализ был бы очень дорог. Возможно использование измельченных отходов пластмасс, независимо от их вида, в качестве наполнителя при производстве строительных материалов и дорожных покрытий. Сказанное не относится к тем случаям, когда тип пластмасс известен (например, отходы пластмасс, получаемые непосредственно при производстве изделий). В этом случае осуществляется их переработка. Из неметаллических материалов, вторичная переработка которых не вызывает серьезные трудности, отметим стекло. Кроме того, стеклянная посуда может собираться и использоваться повторно. Резиновое вторсырье перерабатывается и добавляется в резину при ее производстве.

Огромные потери металлических материалов вызывает коррозия, которая приводит к долгосрочному выходу из строя изделий и сооружений. Ежегодно от коррозии теряется количество металла, равное 10% от выплавляемого. Поэтому важнейшее направление экономии металлических материалов — правильная *защита их от коррозии*. Радикальный метод — применение коррозионностойких (нержавеющих) сталей. Однако следует иметь в виду, что они в 4-8 раз дороже обыкновенных углеродистых сталей. Поэтому в каждом случае надо применять соответствующий метод защиты от коррозии (см. раздел 5.2.).

Значительные потери материалов вызывает износ. При этом происходит выход из строя элементов машин, работающих в условиях трения, что вызывает дополнительные материальные потери, связанные с ремонтом техники. *Борьба с износом* — один из путей экономии материалов.