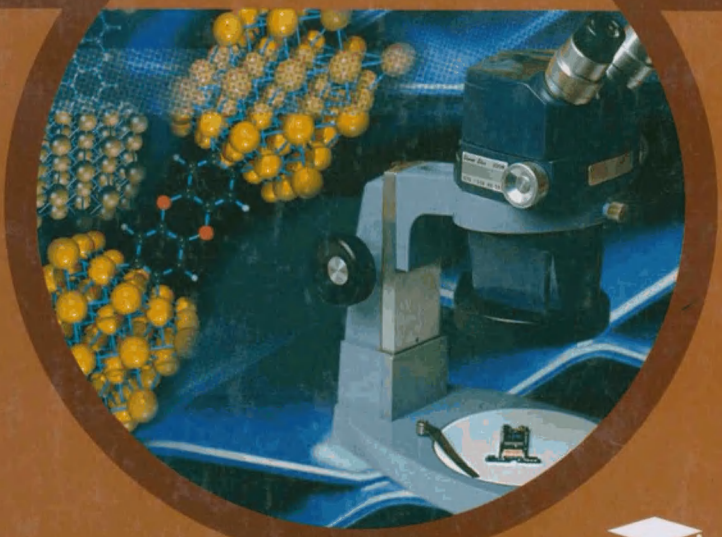
Среднее профессиональное образование

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

О.С. Моряков

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник



ACADEMIA

Соответствует ФГОС

О. С. МОРЯКОВ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНИК

Рекомендовано
Федеральным государственным учреждением
«Федеральный институт развития образования»
в качестве учебника для использования в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы
среднего профессионального образования

Регистрационный номер рецензии 355
от 22 июня 2009 г. ФГУ «ФИРО»

4-е издание, стереотипное

ACADEMIA

Москва
Издательский центр «Академия»
2012

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я723
М809

Рецензенты:
преподаватель ГОУ СПО «Мытищинский машиностроительный техникум»
О. И. Калашникова;
руководитель метрологической службы ОАО «ЦНИИ «Циклон», канд. техн. наук, доц. *В. С. Громов*

Моряков О. С.
М809 Материаловедение : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / О. С. Моряков. — 4-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 288 с.
ISBN 978-5-7695-9420-5

Изложены свойства современных конструкционных, инструментальных металлов и сплавов и неметаллических материалов, предназначенных для изготовления продукции машиностроения. Приведены способы механических и технологических испытаний металлов, их термической и химико-термической обработки. Описаны основные способы обработки материалов резанием, давлением, полимеризацией, вулканизацией, различные виды сварки (электронно-лучевая, плазменная, лазерная, аргонодуговая, ультразвуковая и др.).

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины ОП.04 «Материаловедение» в соответствии с ФГОС СПО для специальности 151901 «Технология машиностроения».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я723

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Моряков О. С., 2008
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ISBN 978-5-7695-9420-5

Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по специальности 151901 «Технология машиностроения».

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины ОП.04 «Материаловедение».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования с учетом его профиля.

Введение

Материаловедение — это наука, изучающая связь между составом, строением и свойствами материалов, закономерности их изменений при механических, тепловых и других видах внешних воздействий. При этом важными являются знания о поведении как обрабатываемого материала, так и материалов устройств (механизмов и машин) для данной обработки, например резанием, давлением, литьем и др.

Зная свойства машины или механизма и условия их работы, можно выбрать нужные материалы и обеспечить оптимальную долговечность эксплуатации этих устройств. На долю машиностроительных материалов приходится более четверти общего объема всей промышленной продукции.

Машиностроение — это комплекс отраслей обрабатывающей промышленности, изготовляющих орудия труда, предметы потребления и продукцию оборонного назначения. Наиболее важными отраслями являются станкостроение (производство металлорежущего, кузнечно-прессового, литейного оборудования и др.), транспортное машиностроение (наземное, воздушное, водное, космическое и другие транспортные средства), энергетическое машиностроение и др.

Основными машиностроительными материалами являются металлы и сплавы[1] — основа тяжелой индустрии, без них не может развиваться ни одна отрасль народного хозяйства. Однако необходимость рационального использования природных ресурсов привела к созданию конструкционных неметаллических материалов, они находят все возрастающее применение в разных отраслях техники. Примером могут быть пластмассы, которые обладают рядом свойств, превосходящих свойства традиционных материалов. Использование пластмасс решает многие технические

[1] Имеются в виду металлические сплавы — материалы, получаемые сплавлением при высокой температуре двух и более металлов или преимущественно металлов с неметаллами (при этом сплав обладает комплексом характерных металлических свойств, его название определено основным металлом).

проблемы в машиностроении, легкой и пищевой промышленности, строительстве, автомобиле-, самолето- и ракетостроении. Кроме того, без пластмасс немыслимо развитие телефонии, радиоэлектроники, электротехнической промышленности и многих других отраслей.

Современное развитие техники стимулирует создание новых материалов, свойства которых отвечают техническим требованиям. Так, с принципиально новым классом композиционных материалов ученые связывают дальнейший прогресс промышленности.

В области обработки материалов преимущественное развитие получило литейное производство металлов, пластмасс, керамики с использованием новейших способов переработки, а также обработки давлением и резанием с применением новейших сверхтвердых материалов в качестве инструмента. Литейный способ переработки материалов является самым экономичным, так как безвозвратные потери материалов при этом минимальны, а производительность высокая.

Современные достижения науки и техники базируются на трудах многих мастеров, инженеров и ученых. Гениальный русский ученый и мыслитель М. В. Ломоносов в своем труде «Первые основания металлургии и рудных дел», изданном в 1763 г., научно объяснил физическую и химическую природу металлургических процессов и дал ценнейшие практические указания по созданию технологических процессов выплавки и обработки металлов.

Идеи М. В. Ломоносова в области металлургии, опередившие на много лет теоретические разработки иностранных металлургов, легли в основу дальнейших исследований русских ученых и инженеров.

В начале XIX столетия творческая инициатива русских инженеров особенно широко развернулась на уральских и тульских заводах, изготовлявших оружие. Великий русский металлург П. П. Аносов на Златоустовском оружейном заводе открыл и обосновал способы изготовления и обработки высококачественной стали, в частности способ получения литейной стали непосредственной цементацией железа в тиглях, газовая цементация. В 1837 г. П. П. Аносов разработал способ получения стали из чугуна — на 30 лет раньше, чем этот способ был применен во Франции П. Мартеном. Труды П. П. Аносова по металловедению и термической обработке создали ему славу основоположника металлографии. Книга П. П. Аносова «О булатах» содержит ценнейшие указания по производству и исследованию стали.

Работы П. П. Аносова продолжил его ученик — талантливый инженер П. М. Обухов, основатель Обуховского завода в Петербурге. На Обуховском заводе работал знаменитый ученый Д. К. Чернов, труды которого по металловедению углубили знания по изучению металлов и сплавов, в частности позволили научно обосновать горячую механическую и термическую обработку стали.

Идеи Д. К. Чернова получили свое развитие в трудах академика Н. С. Курнакова, являющегося разработчиком физико-химического анализа металлов и сплавов, установивших зависимость между кристаллическим строением, структурой и свойствами сплавов.

Ученый-металлург А. А. Байков создал теорию металлургических процессов и методы исследования свойств и химического состава металлов и сплавов. Работы А. А. Байкова «Высококачественная сталь и ее характеристика», «Восстановление и окисление металлов» и многие другие внесли существенный вклад в развитие черной металлургии.

Большой вклад в развитие материаловедения внесли также зарубежные ученые Ю. А. Бринелль (Швеция), С. П. Роквелл (США), А. Мартенс (Германия) и др.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

I

ЧАСТЬ

Глава 1. Общие сведения о материалах
Глава 2. Термическая, химико-термическая обработка и методы испытания материалов

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

1.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Для характеристики технических материалов используют их физические, химические, технологические и механические **свойства**.

Физические свойства (плотность, теплоемкость, температура плавления, термическое расширение, магнитные характеристики, тепло-, электропроводность и др.) определяют поведение материалов в тепловых, гравитационных, электромагнитных и радиационных полях. ***Химические свойства*** определяют способность сопротивляться окислению, проникновению газов и взаимодействовать с другими веществами. ***Технологические свойства*** определяют способность подвергаться горячей и холодной обработке давлением, резанием, термической обработке. ***Механические свойства*** материалов характеризуют их поведение под воздействием разных нагрузок. Особенности строения материала, обнаруживаемые каким-либо методом исследования и определяемые агрегатным состоянием, называются структурой и характеризуют его конструктивную прочность.

При оценке структуры машиностроительных материалов исходят из ***идеальных агрегатных состояний*** вещества (твердого, жидкого, газообразного). Однако реальные материалы, как правило, имеют структурные состояния пограничного промежуточного типа между твердым и жидким, а именно ***аморфное*** (стеклообразное), ***жидкокристаллическое***, ***кристаллическое***. Формирование каждого из этих состояний происходит при определенных внешних физических условиях, называемых термодинамическими факторами — конкретных для каждого вещества температуре и давлении, когда микрочастицы, из которых состоит любое вещество (в зависимости от его природы это могут быть атомы, ионы или молекулы), занимают в объеме тела либо случайное беспоря-

дочное положение (аморфное вещество), либо строго упорядоченное регулярное положение (кристаллическое вещество). Возможно промежуточное жидкокристаллическое состояние. Например, оно формируется из молекул некоторых органических веществ, имеющих удлиненную палочкообразную форму. Из таких молекул образуются жидкие кристаллы, так как они обладают основными свойствами и жидкости (текучесть), и кристаллического вещества (регулярная структура).

Обращаясь к материалам, имеющим кристаллическую структуру, важно определить их кристаллическую решетку — правильное расположение частиц (атомов, ионов или молекул) в кристалле. Положения каждой из частиц в твердом теле неизменны и соответствуют их постоянным тепловым колебаниям относительно некоторых точек равновесия. Такие точки рассматриваются как ***узлы элементарных кристаллических ячеек***, при многократном повторении которых во всех трех измерениях можно полностью воспроизвести кристалл, построить его. Сближение частиц в такой ячейке ограничивается их взаимным отталкиванием, так как все частицы одного вещества имеют одноименные заряды, но каждая из частиц кристалла имеет соседей, положения которых по отношению к ней одинаковы, т. е. для твердого кристалла характерен ***дальний порядок***, или ***регулярная структура***.

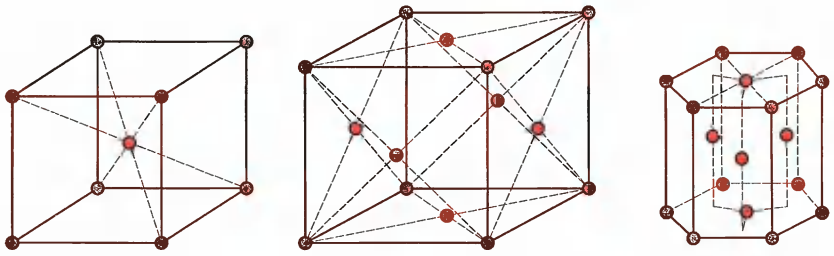
Большинство твердых веществ являются кристаллическими. Типичные расстояния между частицами в кристалле 0,2...0,5 нм (1 нм $= 1 \cdot 10^{-9}$ м $= 1 \cdot 10^{-6}$ мм, т. е. один нанометр в миллиард раз меньше одного метра и в миллион — миллиметра). Расстояния между центрами атомов, ионов или молекул, находящихся в соседних узлах кристаллической решетки в трех пространственных направлениях, называют ***параметрами***, или ***периодами решетки***, и обозначают латинскими буквами *a*, *b*, *c*. Периоды решетки, а также углы между ними используются как характеристика веществ при определении их свойств.

Твердое тело как кристалл существует пока есть дальний порядок расположения атомов, ионов или молекул элементарной решетки. При нарушении порядка равновесные расстояния между частицами изменяются (например, увеличиваются в процессе нагревания) и твердое тело (кристалл) либо плавится (превращается в жидкость), либо улетучивается (переходит в газообразное состояние). В твердом состоянии одно и то же вещество может видоизменяться, иметь разные свойства, но при этом его кристаллическая решетка также должна видоизмениться, приобрести

иную модификацию, другое аллотропное состояние. Многие вещества могут находиться в разных аллотропных формах. Рассмотрим для примера возможные модификации углерода в свободном состоянии — графит и алмаз. Трудно поверить, но графит (в природном виде мягкий минерал с очень низкой твердостью; в производстве получается в виде сажи, копоти, т.е. мягкого черного порошка при сжигании древесного или каменного угля, антрацита) и алмаз (прозрачный кристалл самой высокой твердости, после придания особой, бриллиантовой, огранки — это сверкающий драгоценный камень) — являются атомными кристаллами одного и того же элемента — углерода. Графит используется как огнеупорный материал для изготовления тиглей, работающих в условиях высоких температур; алмаз же легко сгорает в открытом пламени. Являясь неметаллом, графит проявляет некоторые признаки металлов (электропроводность). Структура графита состоит из параллельных слоев атомов углерода, находящихся в узлах правильных шестиугольников. Положение слоев повторяется через один, и каждый слой сдвинут относительно другого. Такая кристаллическая решетка называется ***гексагональной***. Решетка прочного алмаза имеет вид куба (a = 0,354 нм), в центре каждой грани которого, как и в узлах куба, также находятся атомы углерода (такая решетка называется ***гранецентрированной кубической***). Таким образом, свободный углерод как вещество может иметь атомную кристаллическую решетку двух видов.

Каждое кристаллическое вещество можно отличить от других по его кристаллической решетке. Все металлы и их сплавы имеют кристаллическую структуру с ***металлической кристаллической решеткой***; ее особенность в том, что в узлах находятся положительно заряженные ионы (катионы) и отчасти свободные атомы, а в промежутках между узлами свободно перемещаются электроны, которые не находятся на внешних орбитах атомов, а принадлежат металлу в целом (являются как бы обобществленными электронами и определяют основные свойства металлов как класса веществ (в частности, высокие тепло-, электропроводность и др.).

Основные кристаллические решетки металлов, наиболее широко используемых в машиностроении, следующие: ***объемно-центрированная кубическая*** — ОЦК (рис. 1.1, *а*), в которой восемь атомов располагаются в вершинах куба и один — в центре (ее имеют, например, железо Fe при низкой температуре, т.е. α-железо, хром Cr, вольфрам W, молибден Mo); ***гранецентрированная кубическая*** — ГЦК (рис. 1.1, *б*) с атомами, расположенными,



а *б* *в*

Рис. 1.1. Типы основных кристаллических решеток:
а — объемно-центрированная кубическая; *б* — гранецентрированная кубическая; *в* — гексагональная

как и в алмазе, в вершинах куба и в центре каждой из граней (она характерна для алюминия Al, меди Cu, золота Au, γ-железа); ***гексагональная*** (рис. 1.1, *в*) в виде шестигранной призмы (ее имеют, например, цинк Zn и магний Mg).

Кристаллическую структуру металлы, сплавы металлов с металлами и неметаллами приобретают в процессе перехода из расплавленного (жидкого) состояния в твердое по мере охлаждения. Некоторые металлы (например, железо, кобальт) при разных температурах в твердом состоянии претерпевают аллотропное превращение, в процессе которого кубическая решетка перестраивается в гексагональную. Например, железо при охлаждении ниже 1 400 °С (рис. 1.2) может находиться в двух модификациях: γ-железо (ГЦК-решетка) и α-железо (ОЦК-решетка) после аллотропных превращений соответственно при 1 392 и 768 °С.

На кривой охлаждения видно, что α-железо термодинамически устойчиво при температуре ниже 911 °С, а также выше 1 392 °С до температуры плавления (1 539 °С). В интервале температур 911... 1 392 °С устойчиво γ-железо. Температурная ступенька при 768 °С на кривой охлаждения указывает на границу магнитных свойств железа: выше этой температуры оно немагнитно, а ниже — проявляет ярко выраженные магнитные свойства.

Немагнитное α-железо, т. е. в интервале температур 911... 768 °С, иногда называют β-железом, а высокотемпературную его модификацию при температуре в интервале 1 539... 1 392 °С, — δ-железом (решетка объемно-центрированная кубическая).

При охлаждении расплава одновременно во многих центрах, в которых произошло образование зародышей кристаллов, начинается развитие кристаллизации. По мере роста многочисленных кри-

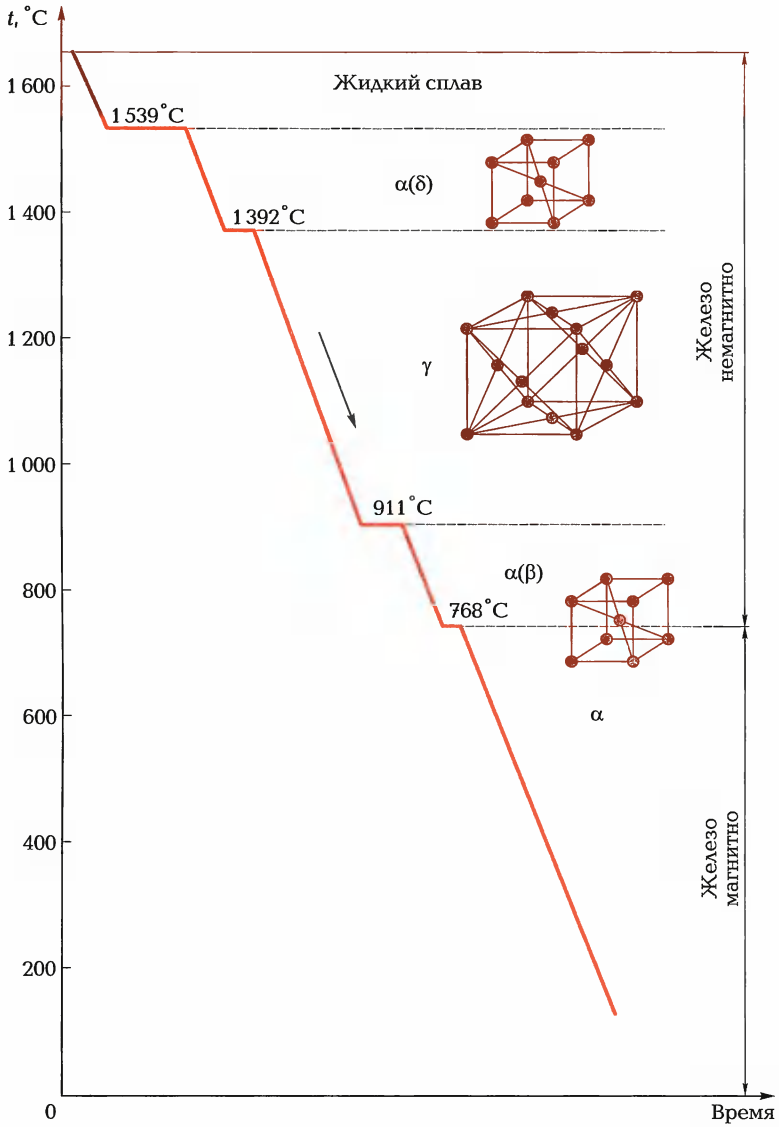


Рис. 1.2. Кривая охлаждения железа:

α (δ), γ, α — аллотропные изменения кристаллической решетки железа; ⟶ — процесс охлаждения

сталлов наступает момент, когда одни кристаллы начинают мешать другим, в результате в таких условиях конкурирующего роста вместо геометрически правильных многогранных кристаллов выраста-

ют деформированные образования неправильной искаженной формы, которые материаловеды называют кристаллитами или зернами. Металлическую структуру из большого числа кристаллитов называют поликристаллической. На полированном срезе под микроскопом она имеет вид зерен неправильной формы, размер зерен может быть разным (например, от 0,1 до 1,0 мм).

Если физические свойства кристаллического вещества оказываются в разных направлениях неодинаковыми, вещества называются **анизотропными**. При химической обработке анизотропные вещества травятся с разной скоростью, механические свойства их также оказываются неодинаковыми. Если же материалы обладают одинаковыми физическими свойствами во всех направлениях, то их называют **изотропными**. В поликристаллических структурах анизотропия сказывается меньше, чем в кристаллических, так как зерна металла более однородны, мельче и по своим свойствам ближе к изотропным материалам.

В реальных кристаллах всегда имеются **дефекты строения**. Несовершенства строения кристаллов связаны с нарушениями строгого периодического расположения частиц в кристаллической решетке. Дефекты в кристаллах подразделяют на четыре группы: точечные (нуль-мерные), линейные (одномерные), поверхностные (двухмерные) и объемные (трехмерные). ***Точечные дефекты*** весьма малы во всех измерениях, не более нескольких атомных диаметров. К ним относятся вакансии, межузельные атомы, атомы примеси и их комплексы. ***Линейные дефекты*** имеют атомные размеры в двух измерениях, а в третьем могут быть соизмеримы с длиной кристалла. Это так называемые дислокации. ***Поверхностные дефекты*** (границы зерен) малы лишь в одном измерении, они отражают несовершенство упаковки атомов. ***Объемные дефекты*** (пороки кристаллов) — это трещины, включения с другим типом решетки, поры, раковины.

Дефекты в кристаллах сильно влияют на механические свойства материалов (разрушение, пластическую деформацию, рекристаллизацию, старение и др.), а также на физические свойства кристаллов (в полупроводниковой технике).

Аморфное состояние — физическое состояние твердого вещества, в котором в отличие от кристаллического его частицы расположены беспорядочно и вещество обладает изотропией, т.е. имеет одинаковые физические свойства по всем направлениям. Аморфные вещества не имеют определенной температуры плавления, они бывают природными (янтарь, смолы) и искусственными (стекло, пластмассы, клей).

По своему строению аморфные твердые вещества и жидкости занимают промежуточное положение между твердым телом и газообразным, не имеют кристаллической структуры, в них наблюдается ближний порядок (согласованность в расположении только соседних частиц). Подобно частицам твердого тела, частицы аморфного вещества совершают тепловые колебания около некоторых положений равновесия, но если в твердом теле они неизменны, в аморфном по истечении некоторого времени частица перескакивает в новое положение, определяя вязкость и текучесть аморфного вещества. Одно и то же вещество может встречаться как в кристаллическом, так и в аморфном виде, причем из аморфного состояния оно сравнительно легко переходит в кристаллическое (например, стекло). Такой переход зависит от скорости охлаждения и вязкости вещества.

Сроки самопроизвольного перехода из одного состояния в другое разные — от нескольких месяцев (сахар, стекло) до миллионов лет (камни).

Аморфных твердых металлов не бывает. Даже ртуть, которая в обычных условиях находится в жидком состоянии, на морозе –40 °С затвердевает и становится кристаллической.

1.2. СТРОЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Твердые тела и связи

Твердые тела существуют за счет взаимодействия отрицательных (электронов) и положительных (ядер атомов) зарядов. Возникающие при этом **силы притяжения** сближают между собой указанные частицы (электроны и ядра). Наряду с силами притяжения действуют **силы отталкивания**, препятствующие частицам соединяться. Силы отталкивания возникают при сближении одноименно заряженных частиц на определенные расстояния. Образование сил отталкивания одинаково для всех твердых тел, а сил притяжения — различно и зависит от природы происхождения твердого тела. Силы притяжения образуют ионные, ковалентные и металлические связи, а также силы межмолекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса).

Ионный тип связи является одним из видов химической связи и образуется при взаимодействии разнородных веществ, присущ химическим соединениям и создает при этом сильное соеди-

нение ионов. Наиболее известными твердыми телами с ионной связью являются стекло, состоящее из оксидов различных элементов, а также поваренная соль.

Ковалентный тип связи — вид прочной химической связи, осуществляемой парой электронов, общих для двух атомов. При этом могут быть связаны одинаковые атомы (например, в молекулах водорода, хлора, кристаллах алмаза) или разные (в молекулах воды, кристаллах карборунда и др.). Почти все основные связи в молекулах органических соединений являются ковалентными. Кристаллы с атомной решеткой и ковалентной связью образуют тугоплавкие с высокой твердостью и износостойкостью материалы (например, боразон).

Силы межмолекулярного взаимодействия образуются в результате электростатического взаимодействия диполей. Диполем называют совокупность двух точечных электрических зарядов, равных по величине, но противоположных по знаку заряда. Эти силы слабее ковалентных, но проявляются на бóльших расстояниях. Если вещество состоит из полярных молекул (вода), то они ориентируются друг относительно друга своими разноименно заряженными концами, в результате чего взаимно притягиваются. Если вещество состоит из неполярных, но способных к поляризации молекул (диоксид углерода), то возникают индуцированные диполи. Молекулы поляризуются и образовавшийся индуцированный диполь в свою очередь поляризует соседние молекулы: происходит взаимное притяжение молекул друг к другу.

Механическая связь присуща более 80 % химических элементов и множеству металлических сплавов, которые обладают в обычных условиях высокими тепло- и электропроводностью, ковкостью, пластичностью, металлическом блеском и другими характерными свойствами. Такие свойства металлов обусловлены наличием в их кристаллической решетке большого количества (10^{22}—10^{23} в 1 $см^3$) слабо связанных с атомными ядрами подвижных электронов.

Структуры сплавов

Существует большое разнообразие сплавов, удовлетворяющих требованиям современной науки и техники. Сплавы могут быть мягкими, твердыми, с низким или высоким электрическим сопротивлением, магнитными и немагнитными, кислотоупорными, жаропрочными, легкими, тяжелыми и др. Общим для всех сплавов

является их разделение на механические смеси, твердые растворы и химические соединения (рис. 1.3).

Смеси (механические смеси) образуют компоненты, которые при затвердевании из жидкого состояния не растворяются друг в друге и не взаимодействуют. Каждый компонент смеси сохраняет свои свойства и кристаллическую решетку, неравномерные распределения по объему этих компонентов. В подобных смесях образуются твердые растворы внедрения и в меньшей мере твердые растворы замещения (рис. 1.3, *а*). Изменяя количественные соотношения компонентов, можно получать различные свойства механических смесей. Иногда механические смеси называют псевдосплавами.

Твердые растворы — это однородные кристаллические или аморфные вещества, состоящие из нескольких компонентов и

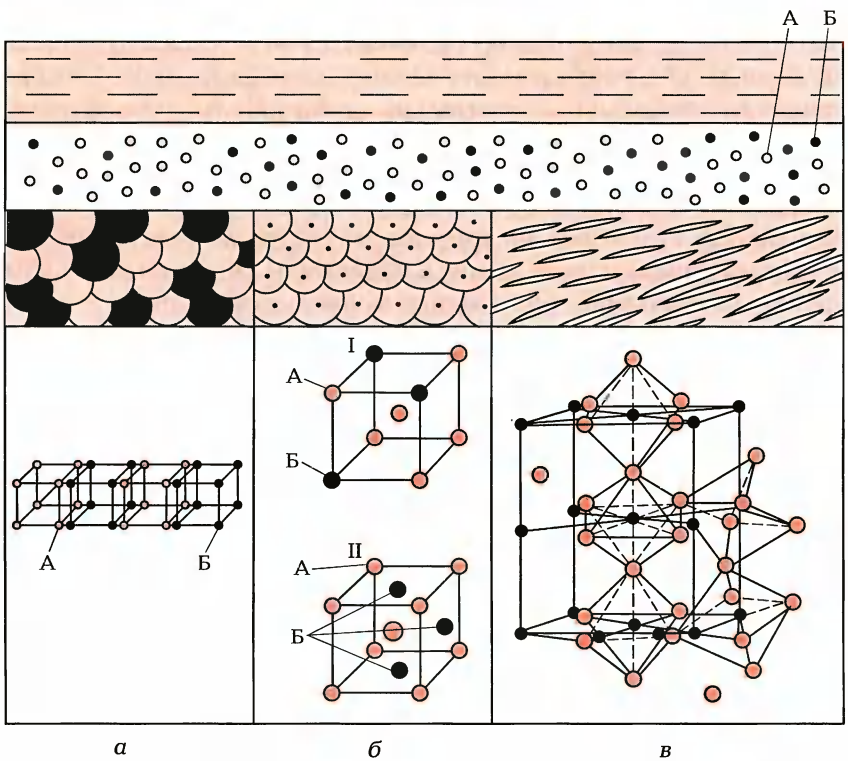


Рис. 1.3. Структуры сплавов:

а — механическая смесь; *б* — твердый раствор; *в* — химическое соединение; А, Б — сплавляемые компоненты; I — раствор замещения; II — раствор внедрения

сохраняющие свою однородность при изменении их соотношения. Твердые растворы образуются тогда, когда один компонент (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, а другой располагает в ней свои атомы. Если атомы компонента частично замещаются атомами кристаллической решетки растворителя, то такой раствор называют ***твердым раствором замещения***, если атомы компонента частично размещаются внутри кристаллической решетки — то ***твердым раствором внедрения*** (рис. 1.3, *б*).

Например, в твердом растворе замещения, образованном медью и никелем, атомы никеля размещаются в узлах кристаллической решетки меди. В твердых растворах внедрения атомы неметаллов обычно располагаются в промежутках между атомами металла. Типичным примером твердого раствора внедрения является твердый раствор углерода в железе. Твердыми растворами являются сталь, бронза, большинство стекол, минералы — полевые шпаты и др.

Химические соединения образуют элементы с различным строением кристаллических решеток и их атомов. Химические соединения могут образовывать металл с металлом и металл с неметаллом. Созданные сплавы характеризуются тем, что имеют постоянную температуру плавления, высокую твердость и хрупкость, собственную кристаллическую решетку и отличительные от составляющих их компонентов свойства. Химическое соединение металла с металлом имеет металлический тип связи и называется интерметаллидом, а химическое соединение металла с неметаллом — ионный тип связи и называется по виду неметалла, например оксид, нитрид, карбид и др. Атомно-кристаллическая решетка химического соединения углерода с железом показана на рис. 1.3, *в*.

В реальных сплавах микроструктура представляет собой комбинацию нескольких типов соединений, например механическая смесь химического соединения и твердого раствора.

Кристаллизация металлов

На кристаллизацию жидкого металла существенное влияние оказывает скорость охлаждения и количество примесей в расплаве. В местах наибольшего охлаждения образуются ***дендриты*** — древовидные кристаллы. Такой кристалл формируется постепенно. Сначала вырастает основная ось с отростками в виде крестов,

расположенных перпендикулярно к ней. На этой оси и отростках кристаллизуется металл, находящийся в жидком состоянии, заполняет пустоты, постепенно охлаждается и в результате получается один большой кристалл.

Соприкасаясь со стенками изложницы, металл быстро охлаждается, образуя корку, состоящую из мелких кристаллов, поскольку из-за большой скорости охлаждения они не успевают вырасти до больших размеров (первая зона кристаллизации). По направлению к оси изложницы охлаждение расплава происходит медленнее, в результате появляются крупные столбчатые (радиальные) кристаллы, формируемые правильно ориентированными, перпендикулярно к стенке изложницы. Желательно, чтобы таких кристаллов было как можно меньше, поскольку при дальнейшей обработке слитка (ковки и прокатке) вдоль их плоскостей соприкосновения образуются трещины в металле. На этом заканчивается вторая зона кристаллизации.

Далее металл кристаллизуется в осевой части слитка (третья зона кристаллизации). Образуются крупные равноосные беспорядочно расположенные кристаллы. Причиной этого является снижение скорости охлаждения и изменение направленности отвода теплоты.

При кристаллизации металл уменьшается в объеме, образуется усадка, в результате которой толщина отвердевшего слоя металла увеличивается, а количество жидкого в середине слитка уменьшается. В верхней части слитка появляется ***усадочная раковина***, являющаяся отходом.

К дефектам слитков относят усадочные и ***газовые раковины*** (пустоты, пузыри), неметаллические включения и ликвацию. Газовые раковины могут образовываться при поглощении атмосферы печи жидким металлом, реакциях в толще металла, в захвате воздуха кипящим металлом и другими причинами. Неметаллические включения могут оказаться в толще металла (стали) при раскислении его оксидами марганца, алюминия и диоксидом кремния, когда они не успевают всплыть к поверхности расплава. ***Ликвация*** **(*сегрегация*)** — это неоднородный состав металла в отливке. Образованию ликвации способствует наличие серы, фосфора и углерода в период затвердевания слитка. Уменьшают ликвацию выплавкой и разливом металла в вакууме.

Каждому веществу (металлу) при определенных термодинамических условиях соответствует атомно-кристаллическая структура. Некоторые вещества, например железо, углерод, кварц, в разных интервалах температур и давлений имеют в равновесном

состоянии различную кристаллическую структуру. Способность твердого тела существовать в двух- или нескольких кристаллических структурах называется ***полиморфизмом*** **(*аллотропией*)**. Примером полиморфизма могут служить алмаз и графит, вещества, состоящие из углерода, но имеющие различные кристаллические решетки и резко отличающиеся своими свойствами. Кристаллизация является примером фазового перехода вещества и сопровождается выделением теплоты. Кристаллизация начинается при достижении определенного условия — переохлаждения расплава, когда мгновенно образуется множество мелких кристаллов — центров кристаллизации (рис. 1.4, *а*—*г*). Кристаллы растут, присоединяя все новые атомы из расплава. Рост граней кристаллов происходит послойно. Зависимость кристаллизации от условий роста, скорости охлаждения приводит к разнообразию форм и структуры кристаллов (многогранные, пластинчатые, игольчатые, дендритные и др.). Когда кристаллы начинают соприкасаться друг с другом в ограниченном пространстве, их форма искажается (рис. 1.4, *д*). Последней стадией кристаллизации является образование зерен, или кристаллитов (рис. 1.4, *е*).

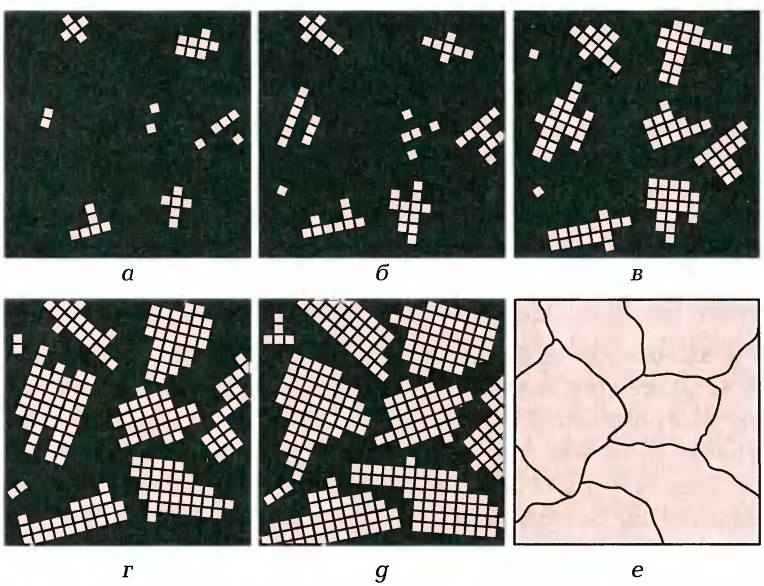


Рис. 1.4. Схема кристаллизации:

а—*г* — образование мелких кристаллов и центров кристаллизации; *д* — искажения формы кристаллов; *е* — образование зерна

Кристаллизация металлов происходит согласно правилу фаз — закону термодинамики и физической химии, которым определена зависимость между числами фаз, компонентов и степеней свободы в равновесной системе. Смесь газов или раствор состоят из одной фазы. Однокомпонентная система может иметь не более трех равновесно сосуществующих фаз. Вода представляет собой равновесную термодинамическую систему, состоящую из трех фаз — льда, воды и водяного пара. На термодинамической диаграмме воды три кривые сходятся в одной точке, называемой тройной, которая является исходной (реперной) точкой отсчета термодинамической температуры — 273,16 К (точно) при давлении 611 Па. Фазовым равновесием считается замкнутая термодинамическая система, состоящая из двух и большего количества сосуществующих фаз при одинаковом давлении, температуре и химическом потенциале каждого из компонентов. Фазовый переход (фазовое превращение) из одной фазы в другую происходит, например, при плавлении, кристаллизации и испарении. При этом плотность, внутренняя энергия, энтропия (направление протекания теплообмена) и другие термодинамические функции изменяются скачком. Для этого необходимо подводить или отводить теплоту фазового перехода в условиях постоянства температуры и давления. Примером могут служить все агрегатные превращения и изменения кристаллических модификаций — процессы плавления и охлаждения металлов и сплавов.

Дополнительные сведения о кристаллизации двойных сплавов, линиях солидуса и ликвидуса, доэвтектических, эвтектических и заэвтектических сталей изложены в подразд. 2.1.

Дефекты реальных кристаллов

В реальных кристаллах наблюдаются дефекты структуры. Число этих дефектов и их тип оказывают влияние на некоторые свойства кристаллических веществ. В ряде случаев это влияние очень сильно, а некоторые из этих структурных свойств имеют очень большое практическое значение (например, упрочняют металл). Дефекты структуры реальных кристаллов разнообразны. Различают точечные, линейные и поверхностные дефекты.

Простейшие и в то же время важнейшие **точечные дефекты** — это незанятые узлы решетки, или ***вакансии*** (рис. 1.5, *а*), и атомы, находящиеся в междуузлиях. Существование таких дефектов связано с тем, что отдельные атомы или ионы решетки имеют энер-

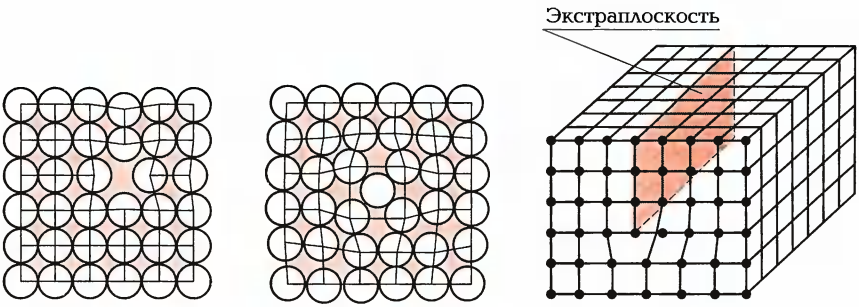


Рис. 1.5. Дефекты кристаллов:
а — вакансия; *б* — дислоцированный атом; *в* — краевая дислокация

гию, превышающую ее средние значения при данной температуре. Такие атомы колеблются интенсивнее других и могут переместиться с одного места на другое, например из узла решетки в междуузлие. Вышедший из узла атом называется ***дислоцированным*** (рис. 1.5, *б*), а незаполненное место, где он ранее находился, вакансией. В любой момент соседний с вакансией атом может перейти на ее место, освободив новую вакансию. Таким образом, вакансия переходит с одного места на другое. Точечные дефекты оказывают очень большое влияние на свойства полупроводниковых материалов.

Линейные дефекты структуры называются ***дислокациями***. Простейший вид дислокации — краевая дислокация, представляющая собою край лишней плоскости (экстраплоскость) в решетке (рис. 1.5, *в*). Дислокации возникают в процессе образования и роста кристаллов. Даже при соблюдении самых тщательных предосторожностей растущий кристалл всегда содержит значительное число дислокаций. Кроме того, их число возрастает при механических нагрузках, приводящих к появлению внутренних напряжений в кристалле. Подобно точечным дефектам, дислокации подвижны. Их подвижность особенно велика у металлических кристаллов. Механические свойства металлов сильно зависят от плотности дислокаций (т.е. их числа в единице объема) и их способности к перемещению по кристаллу.

Поверхностные дефекты, наблюдаемые на поверхности кристаллического тела или на границах кристаллов между собою, представляют собой комбинацию большого числа различных точечных и линейных дефектов.

Исследование структуры металлов

Исследование структуры металлов, выполняемое визуально невооруженным глазом или с использованием микроскопов, увеличительных стекол и других приборов с незначительным увеличением (до 10 раз), называется **макроанализом**. Например, с помощью лупы можно определить характер излома деталей, изготовленных литьем, их зернистость, наличие трещин, посторонних включений, пустот, а на деталях, изготовленных штамповкой, — определить наличие и ориентировочно размер заусенцев, трещин, утяжек, смещений, надрывов и др. Это так называемый макроанализ.

Кроме того, структуру металла и наличие, например, серы можно определить по фотоотпечатку. Для этого изготавливают стальной шлиф образца, который сначала шлифуют, полируют, сохраняя его плоскостность, обезжиривают, затем к нему плотно прикладывают засвеченную фотобумагу, смоченную слабым раствором серной кислоты, и некоторое время выдерживают. На фотобумаге образуется отпечаток структуры шлифа. Таким способом определяют присутствие и распределение (ликвацию) на поверхности образца серы и ее соединений, поскольку на фотобумаге сера проявляется в виде темных пятен.

Способ изготовления образца можно определить по характерным признакам, оставленным обрабатывающим инструментом.

Более глубокие исследования, выполняемые при рассматривании металлов под микроскопом при значительном увеличении, называются **микроанализом**. Такое исследование осуществляют на специальных образцах — ***шлифах***, изготовленных из соответствующих материалов. Для этого плоскую заготовку образца шлифуют, полируют до зеркального блеска (параметры шероховатости *Ra* 0,100 мкм), обезжиривают и изучают под микроскопом. Микроструктуру исследуемых металлов выявляют (после предварительной обработки) травлением химически активными веществами, создавая микрорельеф и одновременно окрашивая структурные составляющие компоненты, превращая их в удобные для изучения в отраженном свете объекты.

В лабораторных условиях с помощью микроскопа в отраженном свете можно рассмотреть структуры и их изменения поверхности после теплового, механического и других воздействий. Такой микроскоп имеет специальную осветительную систему и применяется для изучения и фотографирования микроструктуры металлов и сплавов при больших увеличениях (до 2 000 раз). Электронный микроскоп создает увеличение до миллиона раз.

Спектральный анализ позволяет количественно и качественно оценить исследуемый объект по его спектру испускания (эмиссионный анализ), поглощения (адсорбционный анализ), комбинационного рассеяния света и люминесценции. Спектральный анализ отличается от других высокой чувствительностью, поэтому применяется в разных отраслях производства.

Рентгеноспектральный анализ основан на дифракции рентгеновских лучей и позволяет определить тип и характерные размеры кристаллической решетки металлов, сплавов и минералов, а также распределение в них внутренних напряжений. С помощью рентгеноспектрального анализа можно исследовать строение волокнистых материалов, аморфных и жидких тел, проводить качественный и количественный фазовый анализ гетерогенных (неоднородных) систем, определять в них содержание различных кристаллических фаз.

Электронно-оптический анализ основан на рассеянии, отражении и поглощении электронов веществом, позволяет наблюдать и фотографировать увеличенный до 10^6 раз изображение объекта с помощью пучка электронов, ускоренных до больших энергий (30...100 кэВ и более). Кроме того, можно получать и изучать изображения отдельных атомных плоскостей, дислокации в металлах и сплавах, кристаллической структуре.

Другие испытания и исследования (например, определение твердости металлов по методу Бринелля) описаны в подразд. 2.4.

1.3. МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Для современной техники требуются новые материалы, превосходящие по своим свойствам традиционные. К таким материалам можно отнести монокристаллические в виде единичных кристаллов с непрерывной кристаллической решеткой. **Монокристаллы** бывают **природные** и **искусственные**. К природным относят монокристаллы кварца, каменной соли, флюорита и др. Природные запасы не могут обеспечить современное производство монокристаллическими материалами в достаточном количестве, требуемых качества и размеров. Природные монокристаллы дорогостоящи и дефицитны. Учеными разработаны методы искусственного выращивания монокристаллов, основными из них являются **методы получения монокристаллических материалов** из расплавов и растворов.

Рассмотрим технологию выращивания монокристаллов ***из расплава***. Чтобы вырастить кристалл из расплава, нужно вещество расплавить, а затем медленно его охладить. Однако именно так выплавляют металлы в промышленных условиях: все процессы выплавления или литья металла — это по сути метод кристаллизации из расплава с получением при этом поликристаллического металла.

Для получения монокристалла необходимо, чтобы кристаллизация происходила не во всем объеме расплава, а только на очень малом его участке, и при этом скорость роста должна достигать нескольких сантиметров в час. Известно много способов выращивания больших монокристаллов. Рассмотрим только наиболее применяемые, в которых выращивание монокристалла осуществляется на затравке без тигля, чтобы не создавать ненужные напряжения и неоднородность. Даже в этом случае не удается вырастить монокристалл многогранным, так как вращение, отвод теплоты и многие другие причины мешают ему расти свободно.

Из расплавов выращивают монокристаллы металлов, полупроводников, прозрачные кристаллы для оптики и многие другие. При этом получают совершенные, однородные, чистые монокристаллы массой до 80 кг.

Обычные металлы, применяемые в технике, имеют поликристаллическую структуру, но с помощью современного оборудования научились выращивать монокристаллический металл. По сравнению с поликристаллами монокристаллы прочнее, легче деформируются, менее хрупки, более стойки к химическим воздействиям. Монокристаллическими изготовляют слитки, пластины, трубы, проволоки, ленты и другие профильные изделия. Применение монокристаллов молибдена и вольфрама способствовало увеличению в десятки и сотни раз срока службы электровакуумных приборов.

Чистые и совершенные монокристаллы железа, молибдена, вольфрама и магния обладают настолько высокой пластичностью, что появляется возможность завязать толстый металлический стержень узлом. Монокристаллы алюминия, цинка, висмута, свинца, железа используют в атомной технике для изготовления монохроматоров и поляризаторов нейтронов. В газотурбинных авиационных двигателях турбинные лопатки работают в очень тяжелых условиях: высокие и резко меняющиеся температуры газового потока, резко переменные силовые напряжения. В этих условиях лопатки из поликристаллического металла сравнительно быстро разрушаются, разрушение начинается по границам зерен. Моно-

кристаллические лопатки оказались в 6—7 раз более стойкими по сравнению с поликристаллическими.

Однако если монокристаллический материал далее обрабатывать известными способами (резанием, штамповкой, прокаткой и др.), то более половины массы уйдет в отходы и эффективность его использования значительно снизится. Был предложен и реализован способ выращивания монокристаллов ***в виде готовых изделий***, не требующих последующей доработки. В этом способе на расплав *5* (рис. 1.6) исходного вещества накладывается пластина-формообразователь *4* с отверстием. Материал пластины не взаимодействует с расплавом, а отверстие имеет заданные форму и размеры, соответствующие будущему изделию, так же как форма и размеры помещаемой в отверстие затравки *3*, соприкасающейся с расплавом. Расплав удерживается на затравке силами сцепления и при подъеме затравки вытягивается за ней; попав в зону холодильника *2*, затвердевает, т. е. превращается в изделие *1*. Так выращивают монокристаллические и поликристаллические профилированные изделия со скоростью до 10 м/ч.

Кроме металлов таким способом выращивают кристаллы рубина, сапфира, корунда, основой которых является оксид алюминия. Измельченный корунд используют в качестве абразивного материала, красный рубин применяют для изготовления опорных кам-

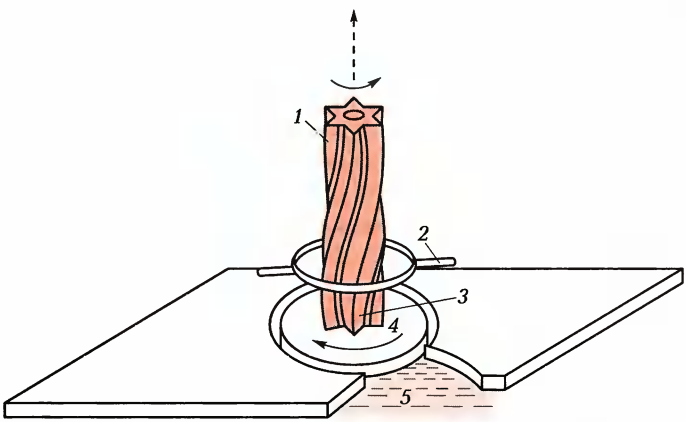


Рис. 1.6. Выращивание профилированных кристаллов:

1 — изделие; *2* — холодильник; *3* — затравка; *4* — пластина-формообразователь; *5* — расплав исходного вещества; ⟶ — направление вращения пластины-формообразователя; - - - ➝ — направление вытягивания кристалла

ней часов, хронометров, аналитических весов и др. Красный рубин нашел применение также в лазерах, где он усиливает световой пучок, не нарушая закон сохранения энергии, так как световой пучок усиливается за счет сложных процессов электронных переходов примесных атомов хрома в кристалле рубина. Мощность современных лазеров доведена до миллиардов ватт, обеспечивая возможность направлять световой пучок на планеты и, посылая его, следить за космическими кораблями и спутниками, а также применять лазер для обработки металлов и других материалов в промышленности. Кроме кристаллов рубина в лазерах используют кристаллы флюорита, граната, арсенида галлия и др.

Кристаллы рубина выращивают из расплава на затравке в ***установках вертикального типа по методу Вернейля***. Порошок в виде пудры из оксида алюминия непрерывной тонкой струей подается в пламя гремучего газа (смесь водорода и кислорода) с температурой выше 2 000 °С, при которой порошок расплавляется, превращаясь в мельчайшие капли. Капли расплава опускаются на затравку и, застывая, кристаллизуются на ней. Также выращивают кристаллы сапфира, лейкосапфира (в зависимости от окрашивающей примеси) длиной до 1 м и массой в несколько килограммов. Кристаллы рубина бóльших размеров выращивают методом направленной кристаллизации.

Из-за высокой твердости, способности к полировке и совершенной структуры сапфир используют в качестве подложек при наращивании разных пленок в производстве полупроводниковых приборов.

Кристаллы кварца (горного хрусталя) также выращивают искусственно в специальных установках. Этот материал обладает рядом ценных физических свойств, он прозрачен для видимого и невидимого ультрафиолетового (УФ) света. Поэтому из прозрачного кварца делают линзы, призмы и другие детали оптических приборов. Кварц обладает пьезоэлектрическим эффектом (если кристалл кварца сжимать или растягивать, то на его гранях возникают электрические заряды), возможен и обратный пьезоэлектрический эффект (после приложения электрического поля кристалл кварца сжимается или растягивается в зависимости от направления поля). В случае использования обратного эффекта при воздействии на пластинку кварца переменными электрическими зарядами она начинает периодически сжиматься и растягиваться, т. е. колебаться. При наложении на пластинку кварца колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты получают УЗ-генератор, частота которого удобна тем, что УЗ-волны мало поглощаются и рассеива-

ются в воде. Так был создан эхолот, с помощью которого обнаруживают подводные объекты, измеряют расстояния до них, исследуют подводные глубины.

Пьезоэлектрическим эффектом обладает не только кварц, но и другие кристаллические вещества, например сегнетова соль, титанат бария, дигидрофосфаты калия, аммония и др. Приборы с пьезоэлектрическими пластинками используют в радиотехнике для стабилизации частоты приемных и передающих радиостанций, они быстро и точно регистрируют изменения давления, широко применяются для воспроизведения, записи и передачи звука.

Кварц — один из самых распространенных минералов в природе. Его разновидностями являются яшма, опал, кремень, аметист, халцедон и горный хрусталь. Но природа не обеспечивает современную технику кварцем в нужных количествах, требуемых размеров и качества. Кварц в обычных условиях не растворяется в воде, сильных растворителях и кислотах. Повысить растворимость можно только за счет повышения температуры, а у водных растворов при атмосферном давлении это можно сделать только до 100 °С (при более высокой температуре вода закипает и испаряется). Поэтому кристаллы кварца выращивают ***гидротермальным методом***, процесс ведется при температуре 300...350 °С и давлении[1] до 200 МПа (2 тыс. атм) со скоростью нескольких десятых долей миллиметра в сутки, что значительно быстрее, чем в природе. Исходным сырьем служит измельченный кварц, который растворяется в горячей щелочи, испаряется и при охлаждении осаждается на кварцевой затравке. В результате выращивают кристаллы кварца любых размеров идеально чистые и однородные.

1.4. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Жидкие кристаллы (ЖК) — особое состояние некоторых органических веществ, в котором они обладают реологическими свойствами жидкости (текучестью), но сохраняют упорядоченность в расположении молекул и анизотропию некоторых свойств, характерную для кристаллов. Жидкие кристаллы образуют вещества, молекулы которых имеют удлиненную палочкообразную форму, часто с чередованием линейных и циклических атомных группи-

[1] 1 Па = 10^{-5} бар = $9{,}81 \cdot 10^{-6}$ атм; 1 бар = $1 \cdot 10^{5}$ Па = 0,98 атм = 0,1 МПа.

ровок. Такая форма молекул определяет приблизительную параллельность их взаимной укладки, что является основным признаком структуры ЖК. Указанным состоянием обладают только некоторые органические вещества, имеющие сложные молекулы, например синтетическое вещество холестерилбензоат.

Известно, что большинство веществ может находиться только в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Жидкие кристаллы представляют собой специфическое промежуточное агрегатное состояние вещества, в котором оно проявляет одновременно свойства твердого кристалла и жидкости. Жидкокристаллическое состояние некоторых веществ (***мезофазы***) проявляется при их плавлении, в результате которого образуется жидкокристаллическая фаза, существующая в интервале от температуры плавления кристалла до некоторой более высокой температуры перехода жидкокристаллической фазы в обычную жидкость. Образование жидкокристаллической фазы при плавлении и является главным отличием ЖК от обычной жидкости.

Подобно обычной жидкости, ЖК обладают ***текучестью*** и принимают форму сосуда, в который они помещены. Этим они отличаются от известных всем кристаллов. Однако, несмотря на это свойство, объединяющее их с жидкостью, ЖК имеют свойства, характерные для кристаллов. Это ***упорядоченное в пространстве расположение молекул***, образующих кристалл. Хотя оно не полное, как в обычных кристаллах, но существенно влияет на свойства ЖК, чем и отличает их от обычных жидкостей. Отсюда можно сделать вывод, что у ЖК нет жесткой кристаллической решетки, поэтому ЖК, подобно обычным жидкостям, обладают жидкотекучестью.

Характерным свойством ЖК, сближающим их с обычными кристаллами, является порядок в пространственной ориентации молекул. Такой порядок проявляется, например, в том, что все длинные оси вытянутой формы молекул ЖК ориентированы одинаково. Возможны и другие более сложные варианты ориентирования молекул.

В зависимости от вида ориентации осей молекул ЖК подразделяют на три разновидности — нематические, смектические и холестерические.

Наименее упорядоченную структуру имеют ***нематические ЖК***, их молекулы параллельны, но сдвинуты вдоль своих осей на произвольные расстояния одна от другой. В **смектических ЖК** молекулы расположены слоями. ***Холестерические ЖК*** по своей структуре похожи на нематические, но отличаются от них допол-

нительным закручиванием молекул в направлении, перпендикулярном их длинным осям.

Благодаря сильной зависимости свойств ЖК от внешних воздействий они находят разнообразное применение в технике.

В настоящее время устройства с ЖК довольно широко используются в ***приборах отображения информации***. Перспективы массового внедрения таких устройств многообразны и масштабны — от термометров до телевизоров и других приборов, развиваясь по мере изучения и освоения мезоморфных фаз (мезофаз) или ЖК.

Для знакомства с использованием ЖК в технике рассмотрим оптическую ячейку, являющуюся индикаторным элементом многих устройств. Оптическая ячейка представляет собой устройство, состоящее из слоя ЖК *4* (рис. 1.7), заключенного между двумя изоляторами *2* и стеклянными пластинами *1*, из которых одна или обе должны быть прозрачными. На пластины, изготовленные из диэлектрика (стекла, полимеров), наносят токопроводящее прозрачное соединение (диоксид олова). Если обе пластины имеют прозрачные электроды *3* и *5*, то такая ячейка работает на просвет, а если одна из них непрозрачна — на отражение.

В часах на ЖК с цифровой индикацией содержится около сотни оптических ячеек, электроды к которым выполняются в виде цифр, а включение определенной цифры осуществляется соответствующей комбинацией ячеек при подаче электрического сигнала. Молекулы ЖК ориентируются при этом определенным упорядоченным образом. Отметим существенное отличие индикаторов на ЖК от других типов. Если обычно в устройствах отображения

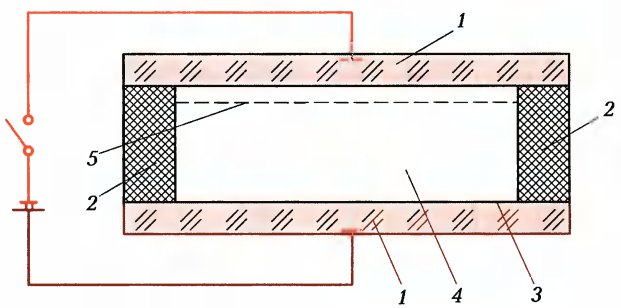


Рис. 1.7. Оптическая ячейка:

1 — стеклянные пластины; *2* — изоляторы; *3*, *5* — прозрачные электроды; *4* — жидкий кристалл

информации, например на экране обычного телевизора, изображение становится тем лучше, чем хуже освещенность в месте его установки, то в устройствах на ЖК все наоборот. Информация на экране лучше видна, если освещенность выше, поэтому телевизор с ЖК экраном можно смотреть в ярко освещенном помещении.

Подвод электрического сигнала к одной или сотне ячеек не представляет больших трудностей. Но для телевизионного экрана, в котором могут использоваться миллионы оптических ячеек, подвод независимого управляющего напряжения к каждой оптической ячейке становится проблемой. Выход был найден, когда создали токопроводящие каналы управления не одной, а сразу несколькими ячейками. Когда параллельными и взаимно-перпендикулярными проводниками соединили каждую оптическую ячейку, получили устройство в виде квадратной решетки, или так называемую матрицу — ***матричный дисплей*** (рис. 1.8). Матричная система позволила существенно уменьшить число управляющих проводников. Так, для управления миллионом ячеек *1* дисплея вместо двух миллионов проводников достаточно двух тысяч.

Управляющий сигнал, подаваемый на скрещивающиеся проводники — электроды, подобран так, что ячейка изменяет свое состояние только тогда, когда на оба электрода будет включено напряжение. Наличие одного сигнала не меняет состояние ячейки (рис. 1.8, *а*). Улучшить характеристики матрицы можно последовательным включением с каждым жидкокристаллическим элементом микросхемы *2* (рис. 1.8, *б*). Быстродействие в этом слу-

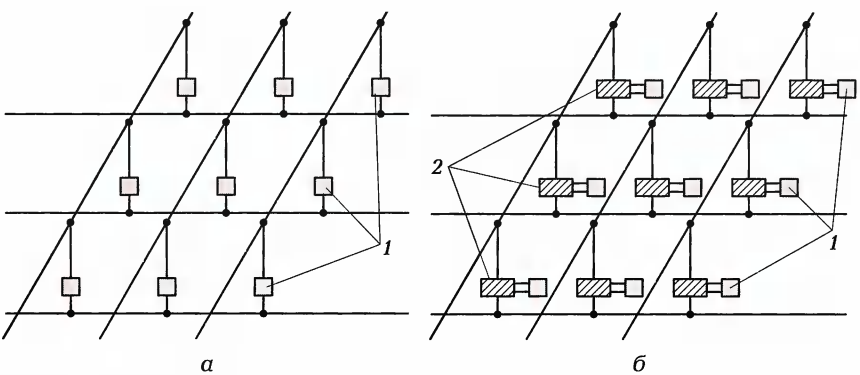


Рис. 1.8. Матрица:

а — без микросхем; *б* — с микросхемами; *1* — ячейки дисплея; *2* — микросхемы

чае удается довести при включении до десятка микросекунд, а при выключении до миллисекунды.

Кроме экранов телевизоров ЖК используют при изготовлении мониторов компьютеров, дисплеев электронных игр, словарей, часов с калькулятором, будильников с большим набором полезной информации и других устройств.

Например, очень удобна для работы маска (щиток) сварщика, в которой темное стекло заменено двумя светлыми с прослойкой между ними из ЖК, управляемой от фотоэлемента. В момент загорания электрической дуги молекулы ЖК от сигнала фотоэлемента поворачиваются и почти не пропускают свет. Сварщик смотрит на дугу, как сквозь привычное темное стекло. При окончании сварки по сигналу фотоэлемента молекулы ЖК возвращаются в начальное положение, т.е. окно в маске становится прозрачным. Переход от темноты к свету и обратно занимает всего одну сотую долю секунды, что для зрения является мгновением. Регулирование яркостей осуществляется изменением числа работающих жидкокристаллических ячеек. Широко ЖК используются также в устройствах рекламы.

1.5. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Общие (физико-механические) свойства металлов — это в основном такие свойства, присущие всем материалам, как плотность, температура плавления, температурный коэффициент линейного (или объемного) расширения, теплопроводность и др.

Плотность — масса единицы объема вещества, измеряемая в килограммах на кубический метр (кг/м^3). В зависимости от плотности легкими металлами являются магний (1 740 кг/м^3), бериллий (1 820 кг/м^3) и алюминий (2 700 кг/м^3), а тяжелыми — платина (21 499 кг/м^3), золото (19 500 кг/м^3), вольфрам (19 300 кг/м^3) и самый тяжелый осмий (22 500 кг/м^3). Остальные металлы по плотности занимают промежуточное положение между легкими и тяжелыми материалами.

Плотность металла определяет специфику его применения в технике, а также специфику добычи и производства. Так, легкие металлы и сплавы широко используют в авиастроении, где масса должна быть минимальной. Золото и платина, встречающиеся в природе в самородном виде и имеющие значительную плотность, легко отделяются от породы отмывкой. Сплавление металлов с

большой разницей в плотности сопряжено с некоторыми сложностями, так как легкие металлы при этом всплывают, нарушая равномерность распределения компонентов.

Температура плавления — температура, при которой нагреваемый материал переходит из твердого состояния в жидкое. Эта же температура является и температурой затвердевания.

Температурный коэффициент линейного (или объемного) расширения — увеличение размеров тела на единицу длины или объема при нагревании тела на 1 °С. Учитывая, что данный коэффициент может быть линейным и объемным, принято при описании теплового расширения прежде всего использовать температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) α, $К^{-1}$.

Теплопроводность — свойство веществ проводить теплоту, характеризуется коэффициентом теплопроводности — λ, Вт/(м · К).

Теплоемкость — количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг вещества на 1 °С. Теплоемкость изменяется с изменением температуры нагрева, поэтому в справочниках обычно указывают теплоемкость для определенного интервала температур.

Газопоглощение — свойство металла в жидком состоянии поглощать и растворять газы, и тем сильнее, чем выше его температура. При охлаждении металла растворимость газов в нем снижается, однако некоторое количество газов остается в толще металла, приводя к образованию газовых пор, раковин и других дефектов, снижающих качество материала. Для удаления газов и раскисления жидкого металла (сплава) в него вводят раскисляющие металлодобавки (металлический алюминий), имеющие высокое сродство к кислороду и азоту. В результате реакции образуются менее плотные, чем металл, оксиды и нитриды алюминия, переходящие в шлак. Медь и медные сплавы раскисляют фосфористой медью, используя высокое сродство фосфора к кислороду. Это очень важно, так как нормально раскисленную медь можно в дальнейшем обрабатывать давлением с минимальным браком. Оксиды раскислителя вследствие значительной разницы плотностей по сравнению с металлом легко всплывают в виде шлака.

Электрическое сопротивление — величина, характеризующая противодействие, оказываемое электрической цепью, движущимся в ней электрическим зарядам.

Магнитные свойства материалов определяются в первую очередь способностью их намагничиваться.

Вместе с тем для характеристики металлов необходимо отметить особенности их ***электронного строения***, а именно неболь-

шое число электронов на внешнем электронном слое (от 1 до 3 электронов в атомах большинства металлов); слабую связь электронов внешнего слоя с ядром атома; стремление отдать эти электроны с целью приобретения устойчивого состояния и, как следствие этого, наличие особого типа химической связи — ***металлическая связь***, которая проявляется в обобществлении валентных электронов всеми связывающимися атомами данного металлического вещества и образовании металлической кристаллической решетки, влияющей на структуру металлов и сплавов на их основе.

Механические свойства — это совокупность свойств материала противостоять (сопротивляться) воздействию растягивающих, сжимающих, изгибающих и других сил, которые могут быть статическими, динамическими, циклическими, периодическими.

Главными механическими свойствами являются твердость, упругость, прочность, ударная вязкость.

Каждый металл имеет свой цвет. Резко отличаются от других металлов розовато-красная медь и желтое золото. Другие металлы отличить один от другого можно только обладая определенными навыками. Например, бронза и бериллиевая бронза по цвету очень похожи на золото, но с некоторым красноватым оттенком. Латунь можно принять за золото. Серебро белого цвета, платина, кадмий, ртуть — синевато-белого, висмут — розово-белый, сурьма — синевато-белая, а цвет свинца и мышьяка сероватый.

На воздухе многие металлы окисляются и темнеют. Такие металлы, как золото, платина, серебро, не окисляются на воздухе. Серебро темнеет в присутствии серы. Алюминий и его сплавы на воздухе покрываются тонкой оксидной пленкой и не теряют своего цвета длительное время.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроены твердые тела?
2. Что такое аморфное тело?
3. Что называют монокристаллом?
4. Какие вещества называют жидкими кристаллами?
5. Какова разница плавления кристаллических и аморфных тел?

Глава 2

ТЕРМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

2.1. ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ

Большинство используемых в промышленности металлов представляют собой сплавы. Основу машиностроительных материалов составляют сплавы железа, в первую очередь стали. ***Стали*** — это сплавы железа с углеродом и другими элементами, содержащие до 2 % углерода. Углерод — важнейшая примесь стали. От его содержания зависят прочность, твердость и пластичность стали. Кроме железа и углерода в состав стали входят кремний, марганец, сера и фосфор. Эти примеси обычно попадают в сталь в процессе плавки и являются неизбежными ее компонентами. Зная свойства отдельных компонентов сплава, не всегда точно удается предсказать его свойства. Об общих физических и химических свойствах сплавов и о возможности их применения в конкретных условиях эксплуатации судят по типу и составу структуры сплава после его затвердевания. Для наглядного представления о протекающих в сплавах превращениях в зависимости от состава и температуры служат диаграммы состояния сплавов. Например, в настоящее время в технике используется более 12 тыс. железных сплавов, главным образом сталей.

Сплавы на основе железа, содержащие более 2,14 % углерода, — ***чугуны***. Наибольшее распространение получили чугуны, содержащие 3...3,15 % углерода. При содержании в сплаве 6,67 % углерода образуется химическое соединение Fe_3C — цементит (карбид железа), являющийся самостоятельным компонентом чугуна. Поэтому для изучения всего многообразия сплавов железа с углеродом (сталей и чугунов) используется диаграмма состояния железо — углерод, которая охватывает не все сплавы с углеродом, а лишь те, которые содержат до 6,67 % углерода, так как остальные сплавы практического интереса не представляют. На оси состава

сплава обычно приводят две шкалы: массовое содержание углерода в сплаве — 0...6,67 % С (рис. 2.1) и содержание цементита в структуре сплава — 0...100 % Fe_3C, т. е. левая ось диаграммы соответствует чистому железу (100 % Fe), а правая — чистому цементиту (100 % Fe_3C). Точки *A* и *D* показывают температуру плавления соответственно железа (1 539 °С) и карбида железа (цементита), а точки *G* и *N* — температуры полиморфного превращения $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$. Линия *ABCD* — это кривая температур начала кристаллизации жидких сплавов, а линия *AHJECF* — кривая температур

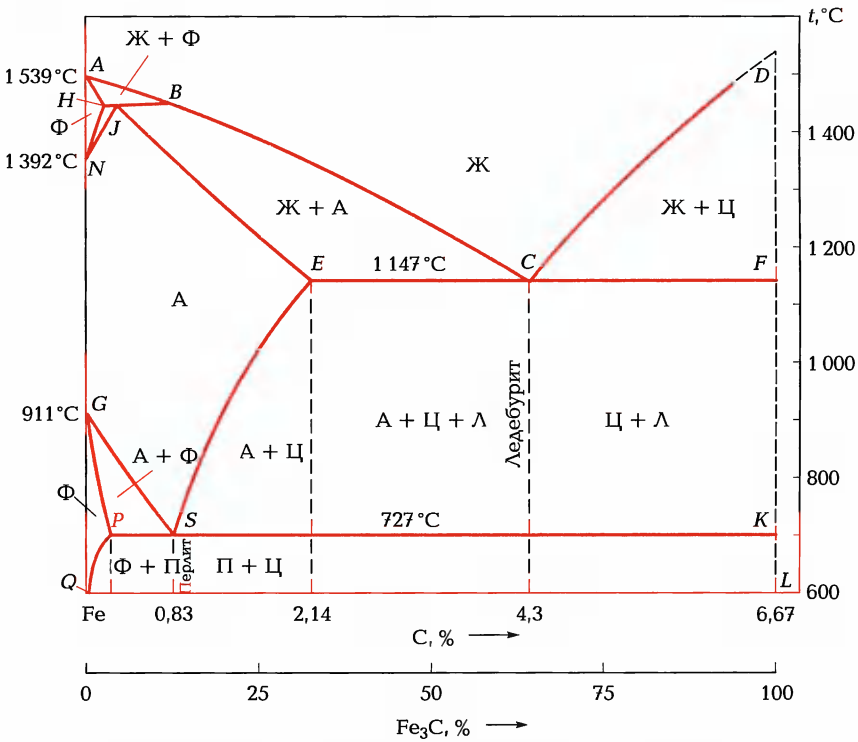


Рис. 2.1. Диаграмма состояния сплавов железо—углерод:

A, *D* — точки температуры плавления железа и карбида железа Fe_3C; *G*, *N* — точки температуры полиморфного превращения Fe_α в Fe_γ; *AHN*, *GPQ* — линии ограничения области твердого раствора углерода в α-железе (Fe_α) соответственно при высоких и низких температурах; *AHJECF*, *ABCD* — кривые температур начала плавления твердых сплавов и кристаллизации жидкого сплава; *NJESG* — линия, ограничивающая область аустенита А — твердого раствора углерода в Fe_γ; *A*, *s*, *L* — стандартные точки диаграммы; Ж — жидкий расплав; А — аустенит; Ф — феррит; Ц — цементит; П — перлит; Л — ледебурит

начала плавления твердых сплавов. Все сплавы, расположенные ниже этой линии, находятся в твердом состоянии. Линии, примыкающие к левой оси *AHN* и *GPQ*, ограничивают область феррита Ф — твердого раствора углерода в α-железе при высоких и низких температурах соответственно. Линия *NJESG* ограничивает область твердого раствора углерода в Fe_γ (область аустенита А). Структуры во всех областях диаграммы гомогенны (однородны) независимо от состояния сплава — расплав или твердый раствор.

При нормальной температуре сталь может содержать следующие ***структурные составляющие***:

- феррит Ф при очень малом (менее 0,006 %) содержании углерода;
- феррит и перлит (Ф + П) при содержании углерода менее 0,83 % (***доэвтектоидная сталь***);
- перлит П при содержании углерода 0,83 % (***эвтектоидная сталь***);
- перлит и цементит (П + Ц) при содержании углерода 0,9 ... 2 % (***заэвтектоидная сталь***).

Эвтектика и эвтектоид — понятия по смыслу аналогичные (от греч. ***éutēktos*** и ***éüdos*** — ***легкоплавкий***), но различие заключается в том, что эвтектика — легкоплавкая смесь, образующаяся из расплава (жидкого раствора), а эвтектоид — из твердого раствора. Из диаграммы видно, что эвтектические превращения относятся к области чугуна, а эвтектоидные — к стали.

Рассмотрим превращения в стали, происходящие при медленном охлаждении ее расплава, содержащего 0,83 % углерода. Затвердевание (кристаллизация) расплава начнется в точке *1* (рис. 2.2): выпадут кристаллы аустенита, состав которого обозначен точкой *2*. При этом изменение состава расплава происходит по линии *BC*, а состава кристаллов — по линии *JE*. Когда состав кристаллов достигнет точки *3*, кристаллизация закончится. При образовании твердого раствора одновременно протекает процесс диффузии в твердом состоянии, в результате чего при медленном охлаждении состав всех кристаллов получается одинаковым.

До точки *S* (см. рис. 2.1) аустенит охлаждается без изменений, но при температуре 727 °С произойдет его эвтектоидный распад с образованием структуры, состоящей из пластинок феррита Ф и цементита Ц, которая на травленом шлифе имеет блеск перламутра. Поэтому эта структура получила название «перлит» П.

При температуре 1 147 °С из расплава, содержащего 4,3 % С (точка *C*), выделяется эвтектический сплав в виде смеси аустени-

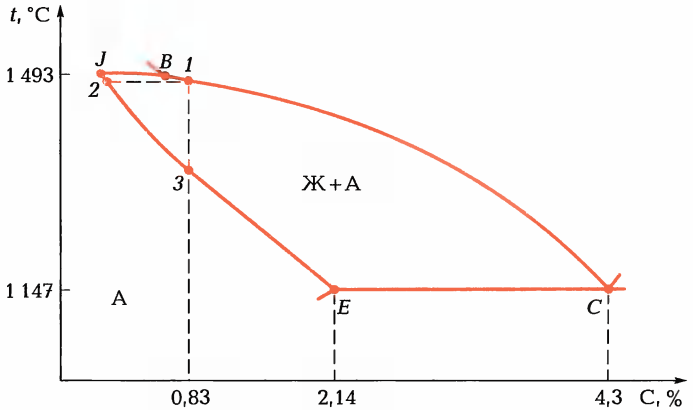


Рис. 2.2. Фрагмент *EJBC* диаграммы состояния сплавов железо—углерод:

1, *2*, *3* — точки соответственно затвердевания расплава, выпадения кристаллов аустенита и окончания кристаллизации; *BC* — линия изменения состава расплава при обогащении его углеродом; *JE* — линия изменения состава кристаллов в процессе кристаллизации

та А и цементита Ц, у которого кристаллизация начинается и заканчивается при одной и той же постоянной температуре. Образование данной эвтектики (***ледебурит***) делает чугуны нековкими, но низкая температура ее плавления способствует использованию высокоуглеродистых сплавов (чугунов) в качестве литейных материалов.

Таким образом, на основании изучения диаграммы состояния сплавов железо—углерод можно сделать важный вывод: при комнатной температуре железоуглеродистые сплавы всегда состоят из двух структурных элементов: мягкого пластичного феррита и твердого цементита, упрочняющего сплав. Эти структурные составляющие могут образовывать механическую смесь либо находиться в свободном состоянии. Причем структурные превращения, протекающие при охлаждении железоуглеродистых сплавов, являются обратимыми. В процессе нагревания произойдут обратные явления. Диаграмма отражает процессы только при медленном охлаждении или нагревании сплавов традиционного состава без специальных присадок.

Известно, что плавление сплавов происходит не при определенной температуре, как у чистых металлов, а в интервале температур и имеет более сложный характер, чем плавление составля-

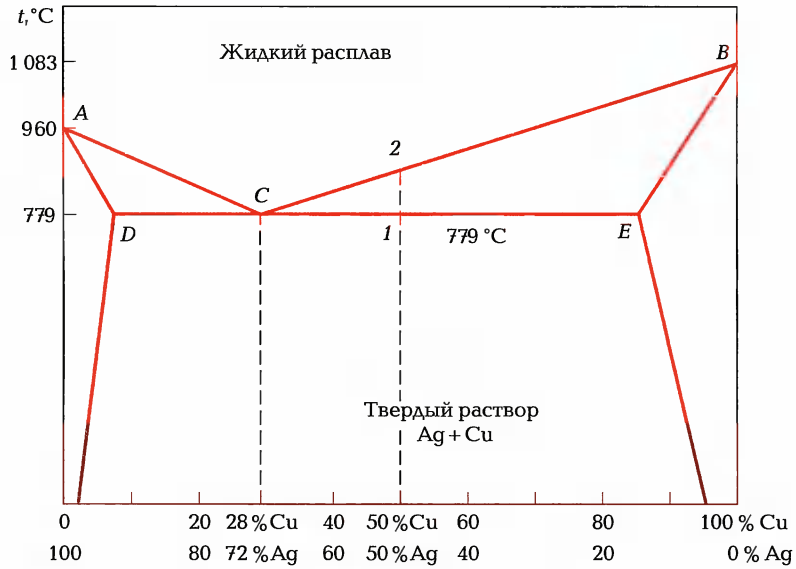


Рис. 2.3. Диаграмма состояния сплавов серебро—медь:

A, *B*, *C* — точки температуры плавления соответственно серебра, меди и эвтектического сплава; *ACB* — линия самой низкой температуры, при которой металл полностью расплавляется (линия ликвидуса); *ADCEB* — линия наивысшей температуры, при которой металл полностью затвердевает (линия солидуса)

ющих компонентов. Для примера рассмотрим диаграмму состояния сплавов серебро—медь (рис. 2.3) и поясним некоторые термины, необходимые для ее понимания.

Линия солидуса — кривая *ADCEB*, соответствующая наивысшей температуре, при которой сплавы полностью затвердевают, а ***линия ликвидуса*** — кривая *ACB*, соответствующая самой низкой температуре, при которой сплавы полностью расплавляются. Чистое серебро (точка *A*) имеет температуру плавления 960 °С, а чистая медь (точка *B*) — 1 083 °С. Эвтектический сплав (точка *C*), содержащий 72 % Ag + 28 % Cu, плавится и становится полностью жидким при 779 °С (самая низкая температура плавления сплавов Ag—Cu). Такой состав имеет припой ПСр72.

Сплавы любых других составов (неэвтектические) будут полностью расплавляться при более высокой температуре. Например, сплав, состоящий из 50 % Ag и 50 % Cu, начнет плавиться в точке *1* при температуре 779 °С, а полностью станет жидким только в точке *2* при температуре 867 °С (соответственно температуры со-

лидуса и ликвидуса). Разницу между температурами линий солидуса (кривая *ADCEB*) и ликвидуса (кривая *ACB*) называют ***интервалом плавления***. В этом интервале температур одновременно присутствуют жидкая и твердая фазы сплава.

2.2. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Термическая обработка — важнейшее звено в технологическом процессе всех производств, работающих с металлами и сплавами, заключается в тепловой обработке металлов и сплавов с целью изменения их структуры и свойств и состоит в нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью. Термическая обработка может быть ***промежуточной***, когда с ее помощью улучшают обрабатываемость металлов, и ***окончательной***, обеспечивающей требуемые механические, физико-химические свойства изделий. Основными видами термической обработки являются отжиг, закалка, отпуск, старение и др.

Отжиг — это процесс нагрева стали до определенной температуры (рис. 2.4), некоторой выдержки при этой температуре и последующего медленного охлаждения, обычно вместе с печью. Разновидностями отжига являются нормализация и изотермический отжиг.

Полный отжиг применяют для получения мелкозернистой структуры, снижения твердости, улучшения обрабатываемости и вязкости, снятия внутренних напряжений, уменьшения структурной неоднородности и зерна, а также для подготовки стали к последующей термообработке.

Обычно полному отжигу подвергают изделия после обработки давлением (объемная штамповка, горячая ковка и др.) и получившим нагартовку. Для отжига их нагревают на 30...50 °С выше линии *GSK*, некоторое время выдерживают, а затем охлаждают вместе с печью. В результате получают конечную структуру феррит + перлит, имеющую низкую твердость. Неравномерное распределение загрязнений (посторонних включений), полученных при первичной кристаллизации слитка, отжигом не устраняется. На качество отжига сильное влияние оказывает температура. Перегрев способствует значительному росту зерен. Кроме того, при сильном нагреве стали в окислительной среде возможен ее пере-

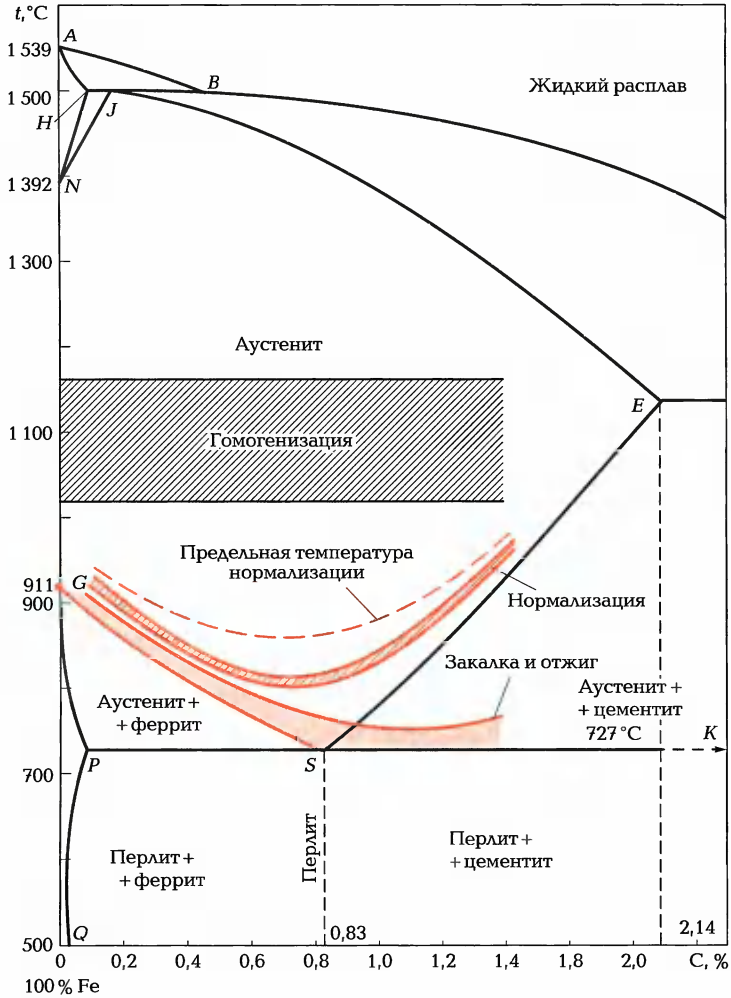


Рис. 2.4. Фрагмент диаграммы состояния сплавов железо—углерод с указанием температурных зон отжига, закалки и нормализации:

AB, *HB*, *NJ*, *GS*, *JE*, *SE*, *PSK*, *GPQ* — линии фазовых превращений

жог, который исправить уже невозможно. Не менее важна также скорость охлаждения. При очень медленном охлаждении стали,

содержащей до 0,2 % углерода, по границам зерен образуется свободный цементит, что вызывает образование трещин при загибе образцов на 90° и приводит к снижению ударной вязкости. У стали с нормальной структурой (феррит и перлит) такого явления не наблюдается. Повышенная скорость охлаждения после нагрева стали выше линии *GSE*, т. е. охлаждение вне печи, делает структуру мелкозернистой. Такую структуру называют ***сорбитом***. Увеличив скорость охлаждения до 50 °С/с, можно получить очень мелкую структуру, называемую ***троститом***.

Восстановить пластичность и мелкокристаллическое строение наклепанной стали удается отжигом при нагреве ниже рекомендованной температуры. Такой процесс восстановления структуры стали называется ***рекристаллизацией***, а вид термической обработки, при помощи которого этот процесс осуществляется, — ***рекристаллизационным отжигом***. Такого рода отжиг проводят при температуре 450...700 °С.

Нормализация — это нагрев стали выше линии *GSE* на 30... 50 °С (см. рис. 2.4), небольшая выдержка при этой температуре и последующее охлаждение на воздухе. Скорость охлаждения стали при нормализации значительно выше, чем при полном отжиге и охлаждении с печью. В результате зерна перлита и феррита получаются более мелкими, а структура сплава равномернее. Кроме того, после нормализации сталь становится более твердой и прочной. Эти качества зависят от содержания углерода в обрабатываемой стали и условий охлаждения. Чем выше содержание углерода в стали, тем большую твердость она приобретает при охлаждении, и чем изделие тоньше, тем оно быстрее затвердевает после нагрева и твердость его повышается.

Ударная вязкость низкоуглеродистой стали, содержащей до 0,25 % углерода, после нормализации возрастает и дополнительная термическая обработка для стали не требуется. Стали с более высоким содержанием углерода, а также легированные стали, из которых изготовлены изделия сложной формы, после нормализации необходимо подвергать отпуску для снятия внутренних напряжений.

Изотермический отжиг — это нагрев сталей до соответствующей температуры отжига и двухступенчатое охлаждение с относительно высокой скоростью. Первая ступень — быстрое охлаждение до 600...670 °С и выдержка при этой температуре; вторая ступень — быстрое охлаждение до комнатной температуры. Время и температура выдержки, а также скорость охлаждения подбирают опытным путем в зависимости от состава металла и тре-

буемой структуры. Этот способ отжига сокращает время термической обработки и повышает производительность термических установок.

Закалка — нагрев металла до температуры получения структуры аустенита, т. е. выше температуры превращения по линиям *GS* и *SK*, и последующее быстрое охлаждение до комнатной температуры. При этом получается структура металла в неравновесном (закаленном) состоянии, которое при комнатной температуре сохраняется продолжительное время без изменения вследствие недостаточной подвижности атомов металла для перехода в равновесное состояние.

Нагрев до высокой температуры необходим для перевода структуры металла в состояние аустенита, достаточной выдержки при этой температуре для перевода основной массы сплава в новое состояние. Быстрое охлаждение при закалке способствует скорейшему прохождению температурного диапазона 600...400 °С, в котором есть опасность превращения аустенита в перлит, что недопустимо, так как закалка проводится с целью получения структуры мартенсита для повышения твердости и прочности изделий. Минимальная скорость охлаждения, при которой основная часть переохлажденного аустенита превращается частично или полностью в мартенсит, называют ***критической скоростью закалки*** и по своей величине должна значительно превосходить скорость, при которой образуется равновесная структура металла.

Мартенситное превращение аустенита при быстром (т. е. бездиффузионном) охлаждении стали, нагретой под закалку, означает, что успевает измениться только тип решетки $\gamma \rightarrow \alpha$, а весь углерод, ранее растворенный в решетке аустенита, остается в решетке феррита, не успев продиффундировать из нее. Таким образом, получается очень твердая структурная составляющая закаленной стали — мартенсит.

Мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α-железе, так как решетка γ-железа успевает перестроиться при охлаждении металла до комнатной температуры, а углерод не успевает продиффундировать из нее.

Полная закалка стали получается при ее нагреве выше линии *GSK* на 20...30 °С для мелких деталей и на 50...75 °С для крупных изделий. При последующем быстром охлаждении в воде со скоростью 150...200 °С/с аустенит сохраняется без изменений до 300...200 °С и только при дальнейшем охлаждении происходит образование новой структуры, не перлита, а мартенсита — структу-

ры в виде пересекающихся мелких игл, обладающих очень большой твердостью и высокой хрупкостью.

Кроме мартенсита в структуре закаленной стали присутствует немного аустенита. Его содержание тем выше, чем больше содержится углерода в стали. При содержании в стали таких примесей, как марганец, никель, хром, можно сохранить большое количество аустенита в закаленной стали и даже получить полностью аустенитную структуру, т.е. структуру немагнитной стали, так как она не будет притягиваться магнитом. Так как удельный объем[1] мартенсита значительно больше удельного объема аустенита и всех других структурных составляющих стали, то сталь после закалки увеличивается в объеме, что способствует появлению напряжений, изменению размеров окончательно изготовленного изделия. При работе с углеродистыми сталями это явление необходимо учитывать. Кроме того, для мартенсита ТКЛР в полтора раза меньше ТКЛР аустенита, что также увеличивает внутренние структурные напряжения в стали при охлаждении, когда одновременно с мартенситом присутствует аустенит. Все это является причиной коробления и растрескивания изделий после закалки.

На качество закалки большое влияние оказывает охлаждающая жидкость. Большой охлаждающей способностью обладает вода, в которую иногда добавляют соли, способствующие быстрому охлаждению и удалению окалины. Проточная вода и движение закаливаемого изделия в ней препятствуют образованию паровой рубашки, затрудняющей доступ воды к поверхности охлаждаемой детали. Изделия сложной формы и с тонкими стенками, изготовленными из легированных сталей с большим содержанием углерода, охлаждают обычно в масле (режим умеренного охлаждения).

Главной целью закалки является получение в стали структуры мартенсита, обеспечивающей достижение высокой твердости — до 60...67 HRC. При этом с учетом прокаливаемости стали удается за счет глубины образования мартенситной структуры обеспечивать получение в нем высокой твердости, что особенно важно для массивных изделий. Детали из углеродистых сталей прокаливаются на толщину слоя менее 20 мм, добавка легирующих элементов (марганец, хром, никель, молибден и др.) приводит к значительному увеличению толщины слоя термической обработки.

---

[1] Объем, занимаемый единицей массы вещества, т.е. величина, обратная его плотности ($1/\rho$, $м^3/кг$).

С учетом изложенного можно дать следующее определение прокаливаемости. ***Прокаливаемость*** — способность стали или других сплавов воспринимать закалку на определенную глубину. Чем больше толщина закаленного слоя, тем выше прокаливаемость.

Быстрорежущие стали подвергают особой термической обработке, которая заключается в нагреве до высокой температуры 1 250...1 320 °С под закалку и двух- трехкратному отпуску при температуре нагрева 540...580 °С. Большее повышение стойкости достигается при цианировании быстрорежущей стали при температуре 520...580 °С.

Поверхностная закалка применяется в случаях, когда важно иметь высокую поверхностную твердость и вязкую сердцевину изделия. Такая закалка широко используется в машиностроении, где особенно важно повышение усталостной прочности стальных деталей.

Наиболее применимы два способа нагрева изделий под закалку — газовым пламенем и токами высокой частоты (ТВЧ). ***Первый способ*** прост и может быть использован даже в полевых условиях: для этого достаточно иметь кислородно-ацетиленовую горелку с баллонами газа и опыт равномерного прогрева поверхности обрабатываемой детали до нужной температуры. ***Второй способ*** требует стационарных условий, так как для нагрева деталей ТВЧ необходим высокочастотный (ВЧ) генератор и водоохлаждаемый индуктор. Нагрев ТВЧ и соответственно поверхностная закалка имеют ряд достоинств, основные из них — сохранение вязкой сердцевины, уменьшение деформаций при нагреве и охлаждении, отсутствие окисления и обезуглероживания и в целом невысокие затраты на проведение термической обработки.

Поверхностной закалке подвергают, как правило, изделия, изготовленные из углеродистых сталей с содержанием углерода 0,34...1,24 %. Наиболее широко используют стали 40 и 45 (ГОСТ 1050—88), твердость которых после закалки и отпуска составляет 40...50 HRC, а глубина закаленного слоя 3...4 мм. Высокочастотной закалке подвергают детали, изготовленные из низколегированных сталей (40Х, 40ХС, 40ХН и др.), при этом полученная твердость после закалки и отпуска составляет 54...64 HRC, а достигаемая глубина прокаливаемости 6...8 мм.

Сложность закалки изделий из легированных сталей после нагрева ТВЧ состоит в том, что они чувствительны к колебаниям температуры нагрева, многие легирующие элементы ограничивают рост зерен аустенита, т.е. приводят к повышению минималь-

ной температуры нагрева и не всегда дают стабильные результаты.

Из других известных способов закалки отметим изотермическую закалку, обеспечивающую получение бейнитной структуры.

Изотермическая закалка — это закалка стали с быстрым охлаждением до температуры 300...350 °С и выдержкой при этой температуре в процессе охлаждения. Сталь при указанной температуре некоторое время находится в состоянии аустенита, достаточно пластична, допускает правку короблеых деталей без поломок, далее структура ее превращается в мартенсит, но более пластичный, чем обычно (так называемый ***бейнит***). Достоинствами изотермической закалки являются отсутствие трещин и коробления при обработке пил, пружин, труб, рабочих элементов штампов и других деталей, а недостатками — необходимость иметь специальное оборудование для охлаждения и большая длительность процесса термической обработки.

В некоторых случаях (отсутствие нужного оборудования, срочная необходимость ремонта оборудования, малая партия деталей и др.) при определенном опыте приближенно температуру нагрева углеродистых конструкционных сталей для ковки, отжига, нормализации и закалки определяют по цвету каления, которому соответствует определенная температура. Так, темно-красный цвет каления соответствует нагреву стали до температуры 650... 730 °С, желто-красный — 900...1 050 °С, а светло-желтый — 1 150... 1 250 °С.

В аналогичных случаях подвергать закаленные детали отпуску можно исходя из цветов побежалости при температуре нагрева до 400 °С. Принцип тот же. Изменяющийся при охлаждении цвет нагретой детали соответствует определенной температуре. Например, синий (васильковый) цвет соответствует температуре нагрева 300 °С, а соломенно-золотистый — 225 °С. При появлении нужного цвета побежалости на поверхности детали его фиксируют, т. е. охлаждают изделие. Причем такой отпуск можно проводить либо специально нагревая закаленную деталь, либо непосредственно после закалки при охлаждении ее до температуры 400...350 °С ждать появления нужного цвета и повторно опустить в закалочную ванну (самоотпуск).

Описанный способ термической обработки примитивен, но иногда используется.

Отпуск закаленной стали — это ее нагрев до температуры ниже критической точки и последующее охлаждение с определенной скоростью. Отпуск предназначен для снятия внутренних напряже-

ний, уменьшения твердости и хрупкости, а также повышения вязкости стали до определенного предела. При этом отпущенный металл не доводится до равновесной структуры как после отжига.

Отпуск подразделяют на низкий, средний и высокий. Так, инструмент обычно подвергают ***низкому отпуску***, т. е. нагревая инструмент до температуры 150...200 °С снимают частично напряжения, уменьшая хрупкость, сохраняя твердость и неизменные размеры. При охлаждении аустенит распадается и образуется структура мартенсита отпуска. ***Средний отпуск*** проводят при температуре 300...400 °С, получая высокие прочность и упругость, но малую пластичность. Отпущенная сталь приобретает структуру троостита. Такую сталь используют для рессор, пружин, кос, пил по дереву и др. ***Высокий отпуск*** проводят путем нагрева до температуры 500...650 °С и после охлаждения получают более высокую механическую прочность. Образующаяся структура сорбита отпуска мягче троостита, но тверже перлита.

При проведении **закалки стали с последующим высоким отпуском** происходит изменение (уменьшение) поперечного сечения деталей, но при этом повышается их ударная вязкость, чему способствует остаток мартенсита в структуре углеродистых сталей. Изменение геометрических размеров термически обработанных сталей следует учитывать при выборе материала и конструировании изделий. Закалку с высоким отпуском называют ***улучшением стали***.

Твердость различных структур стали составляет: перлита 160... 200 НВ, сорбита 270, троостита 400, мартенсита 720, аустенита 155, феррита 90, графита 3 и цементита 820 НВ.

Обработка сталей холодом относится к разновидностям термической обработки. Обычно таким способом обрабатывают высокоуглеродистые, быстрорежущие и цементированные закаленные стали, которые охлаждают ниже 0 °С (обычно до температуры –80 °С).

Охлаждение сталей до низких температур является продолжением закалки, которая была прервана при достижении комнатной температуры. При этом из остаточного аустенита продолжает образовываться дополнительно мартенсит. В результате такой обработки твердость стали повышается, структура выравнивается, становясь однородной, увеличивается стабильность размеров изделия и улучшаются режущие свойства (например, это важно для инструмента). Следует отметить, что количество аустенита, превращаемого в мартенсит, максимально, если охлаждение проведено сразу после закалки.

При содержании в стали менее 0,6 % углерода обработка холодом практического эффекта не дает, так как в такой стали мало

остаточного аустенита и дополнительного образования мартенсита не происходит.

С течением времени изделия изменяют свои свойства и размеры. **Естественным старением** называют явление, связанное с длительным хранением ***стальных изделий*** при обычных условиях. Естественное старение в ряде случаев недопустимо, как, например, для калибров и других измерительных инструментов. Поэтому используют **искусственное старение** — повторный (после низкого отпуска) нагрев стали до температуры 200 °С и медленное охлаждение до комнатной температуры. В результате старения образовавшийся при закалке сталей мартенсит постепенно выделяет углерод, сталь становится менее хрупкой и более плотной, что способствует стабилизации размеров деталей точных приборов. Разница в искусственном и естественном старении заключается в основном в длительности процесса. Например, ***чугунные отливки*** проходят естественное старение в течение 6—12 мес, а искусственное старение можно провести в течение нескольких часов, если нагреть чугунные отливки до температуры 500...550 °С, выдержать при этой температуре в течение 1...8 ч (в зависимости от скорости нагрева, толщины стенок и химического состава чугунных изделий) и далее охладить их медленно вместе с печью.

Для ***алюминиевых сплавов*** процесс старения основан на явлении дисперсионного твердения — выпадении из раствора очень мелких (дисперсных) кристалликов химических соединений (силицидов, алюминидов и др.). В результате закалки образуется пересыщенный раствор легирующих элементов (меди, магния, кремния, цинка и др.) в алюминии. Сплав в таком состоянии имеет малую прочность. Если его состарить, то произойдет выпадение из раствора дисперсных кристалликов химических соединений, значительно повышающих прочность алюминиевых сплавов. Таким же образом достигается дисперсионное твердение при старении других цветных и черных сплавов (бериллиевых бронз, коррозионно-стойких сталей).

С целью получения требуемых свойств у цветных металлов их также, как и сталь, подвергают термической обработке. Так, для ***дюралюминия*** высокие механические свойства даже после обработки давлением можно достигнуть лишь закалкой. Для этого его нагревают, например в электрической печи до 520 °С, некоторое время выдерживают (продолжительность выдержки зависит от размеров заготовки), а затем быстро погружают в емкость с проточной водой температурой 10...15 °С. Такое быстрое охлаждение

предотвращает выпадение из твердого раствора химических соединений магния с кремнием (силицид магния) и меди с алюминием (алюминид меди), выполняющих функции упрочнителей дюралюминия. До дальнейшей термической обработки дюралюминий проходит естественное старение — выдержку на воздухе в течение 4—6 сут, в результате которой прочность его повышается. Отжиг дюралюминия выполняют при температуре 340...400 °С с выдержкой, зависящей от размеров заготовки, а затем медленно охлаждают в печи.

Магниевые сплавы также закаливают и старят, но эффект от этого значительно меньше, чем при термической обработке алюминиевых сплавов. Фасонные отливки из магниевых сплавов отжигают при температуре 300...350 °С, а закаливают при 380 °С, далее выдерживают 8...16 ч и охлаждают на воздухе, повышая механические и пластические свойства. Старят металл после нагрева до 170...180 °С, охлаждая на воздухе в течение 16 ч. Наивысшую пластичность ***титан*** получает при его кратковременном отжиге в вакууме при температуре 600...650 °С, а максимальную твердость — при закалке с нагревом до 900...1 000 °С и старении при 100...300 °С. ***Медь*** после отжига становится мягкой и пластичной. ***Бериллиевая бронза*** подвергается закалке и старению при 325 °С.

Термическую обработку металлов выполняют в термических установках (печах), в которых температура на заданном уровне поддерживается с помощью автоматической системы регулирования. Обычно датчиками в этих системах служат термоэлектрические преобразователи (термопары) и термометры сопротивления. Дополнительный контроль за состоянием печи и уровнем заданной температуры осуществляют визуально оптическим пирометром.

2.3. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Химико-термическую обработку проводят с целью улучшения многих качеств сталей, в частности, обеспечивается повышение поверхностной твердости, износостойкости, красностойкости, усталостной стойкости и др. Достигается такая обработка насыщением поверхности изделий углеродом (цементация), азотом (азотирование), алюминием (алитирование), одновременно углеродом и азотом (цианирование), кремнием (силицирование), хромом (хромирование), цинком (цинкование) и другими металлами. Оз-

накомимся с наиболее широко применяемыми в машиностроении процессами химико-термической обработки.

Цементация (науглероживание) — процесс диффузионного насыщения поверхности низкоуглеродистых сталей углеродом. Глубина науглероживания обычно бывает в пределах 0,5...2,0 мм, что зависит от конкретного предназначения деталей. После цементации обязательны закалка и отпуск, так как поверхность детали «корка» должна быть твердой, чтобы сопротивляться истиранию, а сердцевина — вязкой, способной выдерживать динамические нагрузки. Такая деталь будет хорошо работать на износ, изгиб, удар и скручивание. Источник углерода (карбюризатор) может быть твердым, жидким и газообразным.

При ***цементации*** стали ***в твердом карбюризаторе*** детали укладывают в металлический ящик, пересыпая их древесным углем (коксом), герметично закрывают ящик крышкой, сверху вставляют несколько прутков («свидетелей») из материала той же марки, что и обрабатываемые детали. Ящик помещают в печь, процесс ведут при температуре 900...930 °С в течение определенного времени, исходя из того, что скорость цементации составляет 0,10...0,15 мм/ч. Дополнительно ход процесса контролируют по толщине слоя цементации на «свидетелях». Перед загрузкой деталей изолируют на них различными способами не подлежащие цементации места. Используют для этого обмазку, меднение, глушат отверстия пробками, в том числе и резьбовыми, защищая их от выгорания.

При ***газовой цементации*** карбюризатором могут служить газы (природный, коксовый и др.) или жидкие углеводороды (пропан, керосин, бензол и др.), которые, разлагаясь в рабочем объеме непрерывно работающей печи, насыщают поверхность обрабатываемых изделий углеродом.

Ванна для ***цементизации в жидкой среде*** может состоять из карбоната натрия (основа) и добавок хлорида натрия и карборунда. Такой вид цементации обычно применяют для упрочнения поверхности мелких деталей. Процесс происходит довольно быстро (нужная толщина насыщенного углеродом слоя 0,15...0,20 мм достигается за 40 мин) при температуре 870...900 °С.

Азотирование — это процесс диффузионного насыщения азотом поверхностного слоя (0,2...0,8 мм) изделий из конструкционных, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей, титановых сплавов и тугоплавких металлов с целью повышения их твердости, износостойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости и сопротивления усталости. Процесс проводят в герметичной аммиачной печи при температуре 580...600 °С в течение довольно длительно-

го времени (20...60 ч). Лучшие результаты получены при азотировании изделий из легированных сталей, содержащих алюминий (35ХМЮА). Следует отметить, что процесс производства азотированных изделий планируется таким образом, чтобы закалка и отпуск предшествовали азотированию, т.е. чтобы после азотирования оставались только шлифование, полирование и доводка. Обработанная азотом поверхность изделий тверже цементированной и для нее не требуется последующая термическая обработка, как после цементации, что может привести к изменению размеров и формы изделий. Однако азотирование дороже цементации и сам процесс довольно длительный.

Алюминирование (алитирование) — это процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали и чугуна алюминием для повышения жаростойкости (окалиностойкости, жароупорности), которое может осуществляться разными методами: диффузионным, газопламенным и плазменным распылением, погружением в расплав, вакуумным напылением и плакированием.

Названными методами алюминий наносится (осаждается) на изделия, после чего необходимо провести процесс закрепления («вжигания») его на поверхности и на некоторой глубине. Так, при температуре 800 °С глубина диффузионного слоя достигает 0,02...0,025 мм и зависит от длительности и температуры вжигания. Благодаря тонкой пленке оксида алюминия жаростойкость алитированной углеродистой стали в несколько десятков раз выше стали без покрытия. Алитированный слой хорошо противостоит при высокой температуре среде, содержащей сероводород. Этим методом повышают жаростойкость жаропрочных сталей. Алитированный слой, полученный методом погружения в расплав, обеспечивает защиту металла от коррозии и используется иногда вместо цинкования. Плакирование отличается от других методов алитирования тем, что в этом случае алюминий наносят на изделие в процессе прокатки, т.е. закрепление защитного слоя происходит за счет механического схватывания.

Цианирование — это процесс одновременного насыщения углеродом и азотом поверхности стали. Процесс может проводиться в газовой среде или в соляных ваннах и преимущественно применяется для обработки уже изготовленного металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали. При цианировании, проводимом при температуре 850...900 °С, в течение 1,5...2 ч получают цианированный слой глубиной до 40 мкм.

Цианированый слой обладает повышенной красностойкостью, твердостью до 70 HRC и обеспечивает стойкость инструмента, в

1,5—2 раза превышающую стойкость нецианированного инструмента.

Диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных деталей можно проводить и другими металлами — цинком, кремнием, хромом и др. Например, **цинкование**, как правило, применяют для крепежных деталей (болты, винты, гайки, шайбы, витые пружины и др.). Для этого их поверхности предварительно очищают от оксидных загрязнений, обезжиривают, обрабатывают в горячем растворе флюса и высушивают. Далее детали вместе с цинковым порошком крупностью 75...300 мкм и массой, в 5—10 раз большей массы деталей, загружают в герметичный стальной барабан, который помещают в электропечь с температурой нагрева 350...600 °С. Толщина получаемого на деталях диффузионного слоя зависит от температуры в печи и продолжительности выдержки деталей при этой температуре. Так, при температуре 350...400 °С в термической установке и продолжительности обработки 1 ч толщина получаемого покрытия 20 мкм.

При **силицировании** стальные детали насыщают кремнием, источником которого служит порошкообразная смесь ферросилиция с хлоридом аммония. При температуре 1 100 °С за 10...24 ч получают на деталях диффузионный слой толщиной 0,8...1,0 мм. Силицирование можно вести и в газовой среде — в парах хлорида кремния IV.

Для защиты деталей от коррозии, восстановления изношенных поверхностей, придания необходимых поверхностных свойств изделиям на них наносят ***металлизованные покрытия***. Данный процесс металлизации проводят разными металлами — высокоуглеродистой сталью, бронзой, никелем, медью, алюминием и другими, применяя специальные металлизаторы, в которых используемый для покрытия металл в виде проволоки электрической дугой или газовой горелкой расплавляется и струей сжатого газа направляется на обрабатываемую поверхность. Качество нанесенного металла зависит от расстояния металлизатора до обрабатываемой поверхности, скорости распыления частиц (100...200 м/с) и размеров самих частиц (0,02...0,4 мм), а производительность процесса металлизации в среднем 2,5...3,0 кг металла/ч.

Хромирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя стального изделия хромом. Диффузантом (источником хрома) служит сплав металлического порошка хрома, каолина и хлорида аммония. Процесс выполняется при температуре 1 000...1 150 °С в течение 20...25 ч. За указанное время толщина диффузионного слоя, насыщенного хромом, достигает 0,02...0,10 мм.

Получаемая в процессе хромирования на поверхности изделия из стали или чугуна пленка хрома обеспечивает повышение коррозионной стойкости, кислотоустойчивости и поверхностной твердости, износостойкости.

Наряду с этим хром, нанесенный на изделия по подслою меди и никеля, придает им красивый внешний вид. Такому хромированию подвергают детали автомобилей, мотоциклов и другой техники. Хромирование используется для увеличения отражательной стойкости зеркал, отражателей, прожекторов (при этом хром, заменяя алюминий и серебро, обеспечивает более высокую стойкость против окисления); для повышения износостойкости инструмента — штампов, пресс-форм, литейных форм, используемых в производстве изделий из пластмасс, резины, стекла, керамики и металла (исключает налипание перерабатываемых материалов и снижает смачиваемость ими стенок формообразующих устройств); для производства цилиндров и поршневых колец двигателей внутреннего сгорания (пористое хромирование дает возможность создать слой, способный удерживать в порах смазку); для восстановления размеров изношенных деталей (в этом случае увеличение срока эксплуатации достигается нанесением так называемого «твердого хрома», который осаждают на термически обработанные изношенные изделия толщиной до 500 мкм, далее проводят механическую обработку — шлифование, полирование. Нанесение хрома выполняют способами, ранее рассмотренными для нанесения других металлов).

Все представленные методы являются вариантами химико-термической обработки стали и чугуна. Места на изделиях из стали и чугуна, не подлежащие химико-термической обработке, должны быть изолированы разными способами (обмазка и др.).

2.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Механические испытания металлов — это определение механических свойств металлических сплавов (для краткости — металлов), их способности выдерживать разного рода нагрузки в определенных пределах. По характеру действия на металл нагрузки, а соответственно, и испытания разделяют на статические (растяжение, сжатие, изгиб, кручение), динамические (ударные — ударная вязкость, твердость), усталостные (многократные циклические нагружения), длительные (воздействие атмосферных сред, ползучесть, релаксация) и специальные. Из всего многообразия испы-

таний основными являются испытания на растяжение, твердость, удар, изгиб и некоторые другие.

При **испытаниях металлов на растяжение** используют унифицированные образцы и специальные машины. В процессе испытаний по мере нарастания усилия все изменения, происходящие с металлическим образцом, фиксируются в виде диаграммы (рис. 2.5) с координатами: нагрузка по оси ординат и удлинение по оси абсцисс. С помощью диаграммы определяют предел пропорциональности $\sigma_{пц}$, предел текучести $\sigma_т$, максимальное усилие — временное сопротивление $\sigma_в$ и разрыв. ***Предел пропорциональности*** — это наибольшее напряжение (отношение усилия к площади сечения образца), до которого сохраняется прямая пропорциональность между напряжением и деформацией, когда образец упруго деформируется пропорционально нагрузке, т. е. во сколько раз увеличивается нагрузка, во столько же раз увеличивается удлинение. Если нагрузку снять, то длина образца вернется к начальной или увеличится незначительно (на 0,03...0,001 %), определяя ***предел упругости***.

Предел текучести — это напряжение, при котором образец деформируется (удлиняется) без заметного увеличения растягивающей нагрузки (горизонтальная площадка на диаграмме). Если снять нагрузку, то длина образца практически не уменьшится. При дальнейшем увеличении нагрузки на образец создается напряжение, которое соответствует наибольшей нагрузке на растяжение, предшествующей разрушению образца, называемое ***временным сопротивлением*** $\sigma_в$ (***пределом прочности при растяжении***). Далее удлинение образца увеличивается, образуется шейка, по которой образец разрывается.

Диаграмма растяжения дает возможность судить о способности металла деформироваться (растягиваться), не разрушаясь, т. е. характеризует его пластические свойства, которые можно выра-

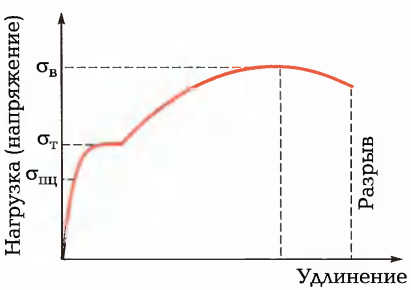


Рис. 2.5. Диаграмма растяжения металла:

$\sigma_{пц}$, $\sigma_т$, $\sigma_в$ — напряжения в металле образца по мере его нагружения

зить также относительным удлинением и сужением образца в момент разрыва (оба параметра выражают в процентах).

Относительное удлинение — это отношение приращения длины образца в момент перед разрывом к первоначальной его длине.

Относительное сужение — это отношение уменьшения площади поперечного сечения шейки образца в месте его разрыва к первоначальной площади поперечного сечения образца.

Испытание на твердость — простой и быстрый способ проверки прочности металлического материала (далее для краткости металла) в условиях сложнонапряженного состояния. В производстве наиболее широко применяют методы Бринелля, Роквелла, Виккерса, а также некоторые другие. Поверхностные слои испытуемого металла не должны иметь поверхностных дефектов (трещин, царапин и др.).

Суть способа определения твердости ***методом Бринелля*** (твердость НВ) заключается во вдавливании стального закаленного шарика в испытуемый образец (изделие) при заданном режиме (величина нагрузки, продолжительность нагружения). После окончания испытания определяют площадь отпечатка (лунки) от шарика и вычисляют отношение величины усилия, с которым вдавливался шарик, к площади отпечатка в испытуемом образце (изделии).

Учитывая по опыту предполагаемую твердость испытуемого образца, применяют шарики разных диаметров (2,5; 5 и 10 мм) и нагрузки 0,6...30 кН (62,5...3 000 кгс). На практике используют таблицы перевода диаметра отпечатка в число твердости НВ. Данный способ определения твердости имеет ряд недостатков: отпечаток шарика повреждает поверхность изделия; сравнительно велико время измерения твердости; невозможно измерить твердость изделий, соизмеримую с твердостью шарика (шарик деформируется); затруднительно измерить твердость тонких и мелких изделий (происходит их деформация).

При определении твердости ***методом Роквелла*** используется прибор, в котором индентор — твердый наконечник *6* (рис. 2.6) под действием нагрузки проникает в поверхность испытуемого металла, но измеряется при этом не диаметр, а глубина отпечатка. Прибор настольного типа, имеет индикатор *8* с тремя шкалами — А, В, С для отсчета твердости соответственно в диапазонах 20...50; 25...100; 20...70 единиц шкалы. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 2 мкм. При работе со шкалами А и С наконечником служит алмазный конус с углом 120° при вершине или конус из твердого сплава. Алмаз-

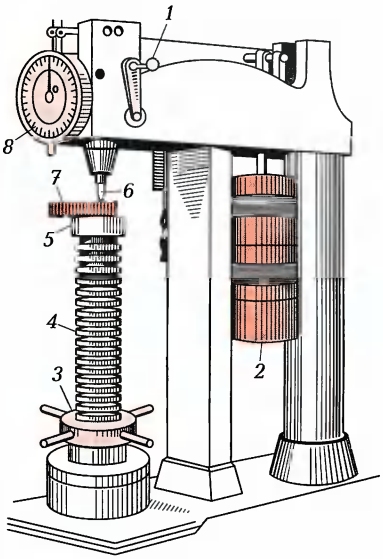


Рис. 2.6. Прибор Роквелла для определения твердости:

1 — рукоятка освобождения груза; *2* — груз; *3* — маховик; *4* — подъемный винт; *5* — столик; *6* — наконечник прибора; *7* — образец испытуемого металла; *8* — индикатор

ный конус применяют при испытаниях твердых сплавов, а твердосплавный конус — для деталей неответственного назначения твердостью 20...50 единиц.

При работе со шкалой В индентором служит маленький стальной шарик диаметром 1,588 мм ($^1/_{16}$ дюйма). Шкала В предназначена для измерения твердости сравнительно мягких металлов, так как при значительной твердости шарик деформируется и проникает в материал слабо, на глубину менее 0,06 мм. При пользовании шкалой С наконечником является алмазный конус, в этом случае прибором измеряют твердость закаленных деталей. В производственных условиях, как правило, пользуются шкалой С. Вдавливание наконечников осуществляют при определенной нагрузке. Так, при измерении по шкалам А, В и С нагрузка составляет соответственно 600; 1 000; 1 500 Н, твердость обозначают в соответствии со шкалой — HRA, HRB, HRC (величины ее безразмерные).

При работе на приборе Роквелла образец испытуемого металла *7* размещают на столике *5* и с помощью маховика *3* подъемным винтом *4* и грузом *2* создают требуемое усилие на наконечнике *6*, фиксируя его перемещение по шкале индикатора *8*. Затем поворотом рукоятки *1* снимают усилие с испытуемого металла и определяют значение твердости по шкале твердомера (индикатор).

Метод Виккерса — способ определения твердости материала вдавливанием в испытуемое изделие алмазного наконечника (индентора), имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды с двухгранным углом при вершине 136°. Твердость по Виккерсу HV — отношение нагрузки на индентор к площади пирамидальной поверхности отпечатка. Выбор вдавливающей нагрузки 50...1 000 Н (5...100 кгс) зависит от твердости и толщины проверяемого образца.

Известны другие способы испытаний металлов на твердость, например ***на приборе Шора*** и динамическим вдавливанием шарика. В тех случаях, когда твердость закаленной или закаленной и шлифованной детали необходимо определить, не оставив какого-либо следа от замера, пользуются прибором Шора, принцип работы которого основан на упругой отдаче — высоте отскока легкого ударника (бойка), падающего на поверхность испытываемого тела с определенной высоты.

Твердость на приборе Шора оценивается в условных единицах, пропорциональных высоте отскока бойка с алмазным наконечником. Оценка приближенная, так как, например, степень упругости тонкой пластинки и массивной детали большой толщины при одинаковой твердости будет разной. Но, поскольку прибор Шора портативен, его удобно применять для контроля твердости значительных по размерам деталей.

Для ориентировочного определения твердости очень больших изделий (например, вал прокатного стана) можно использовать ручной ***прибор Польди*** (рис. 2.7), действие которого основано на динамическом вдавливании шарика. В специальной обойме *3* находится боек *2* с буртиком, в который упирается пружина *7*. В щель, находящуюся в нижней части обоймы *3*, вставляются стальной шарик *6* и эталонная пластина *4* с известной твердостью. При определении твердости прибор устанавливают на проверяемую деталь *5* в месте измерения и по верхней части бойка *2* ударяют молотком *1* со средней силой один раз. После этого сравниваются размеры отпечатков лунок на проверяемой детали *5* и эталонной пластине *4*, полученных одновременно от шарика при

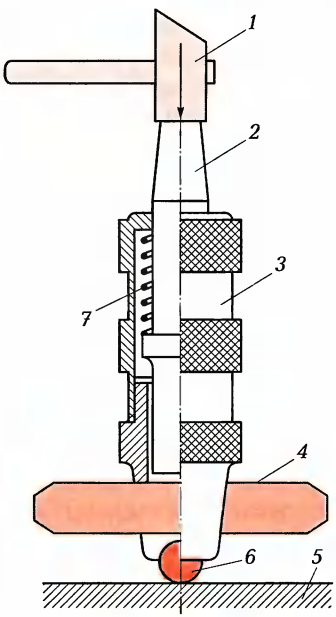


Рис. 2.7. Ручной прибор Польди для определения твердости:

1 — молоток; *2* — боек; *3* — обойма; *4* — эталонная пластина; *5* — проверяемая деталь; *6* — шарик; *7* — пружина; ⟶ — направление усилия на боек

ударе по бойку. Далее по специальной таблице определяют число твердости испытуемого изделия.

Кроме рассмотренных твердомеров в производстве применяют ***универсальные портативные электронные твердомеры*** ТЭМП-2, ТЭМП-3, предназначенные для измерения твердости разных материалов (стали, меди, алюминия, резины и др.) и изделий из них (трубопроводов, рельсов, шестерен, отливок, поковок и др.) с использованием шкал Бринелля (HB), Роквелла (HRC), Шора (HSD) и Виккерса (HV).

Принцип работы твердомеров динамический, основан на определении отношения скорости удара и отскока ударника *6* (рис. 2.8) (шарика *7* диаметром 3 мм), которое преобразуется электронным блоком *1* в трехзначное число условной твердости, отображаемое на жидкокристаллическом (ЖК) индикаторе *2* (например, 462). По измеренному числу условной твердости с помощью переводных таблиц находят числа твердости, соответствующие известным шкалам твердости.

Для измерения твердости этим методом прибор подготавливают следующим образом. Толкателем *3*, расположенным на электронном блоке *1*, заталкивают шарик *7*, находящийся в датчике *5*, в цанговый зажим и одновременно взводят спусковую кнопку *4*, находящуюся сверху датчика *5*. Далее датчик плотно прижимают опорным кольцом *8* к испытываемой поверхности *9* изделия и нажимают на спусковую кнопку *4*. После соударения ударника *6* с испытуемой поверхностью изделия на ЖК-индикаторе появится результат в виде трехзначного числа условной твердости.

Окончательным значением измеренной условной твердости является среднее арифметическое пяти измерений. Один раз в год выполняют периодическую поверку прибора, пользуясь образцовыми мерами твердости не ниже второго разряда соответствующих шкал твердости (Бринелля, Роквелла, Шора и Виккерса), соблюдая при этом нормированные условия. С помощью указанных приборов кроме твердости можно определять временное сопротивление (предел прочности на растяжение) и предел текучести.

Наряду с твердомерами в производстве для определения твердости материала используют ***тарированные напильники***. С их помощью контролируют твердость стальных деталей в тех случаях, когда нет твердомера или когда площадь для измерения очень мала или место недоступно для индентора прибора, а также тогда, когда изделие имеет весьма значительные размеры. Тарированные напильники — это напильники с заведомо известной твердостью, изготовленные из стали У10, они бывают трехгран-

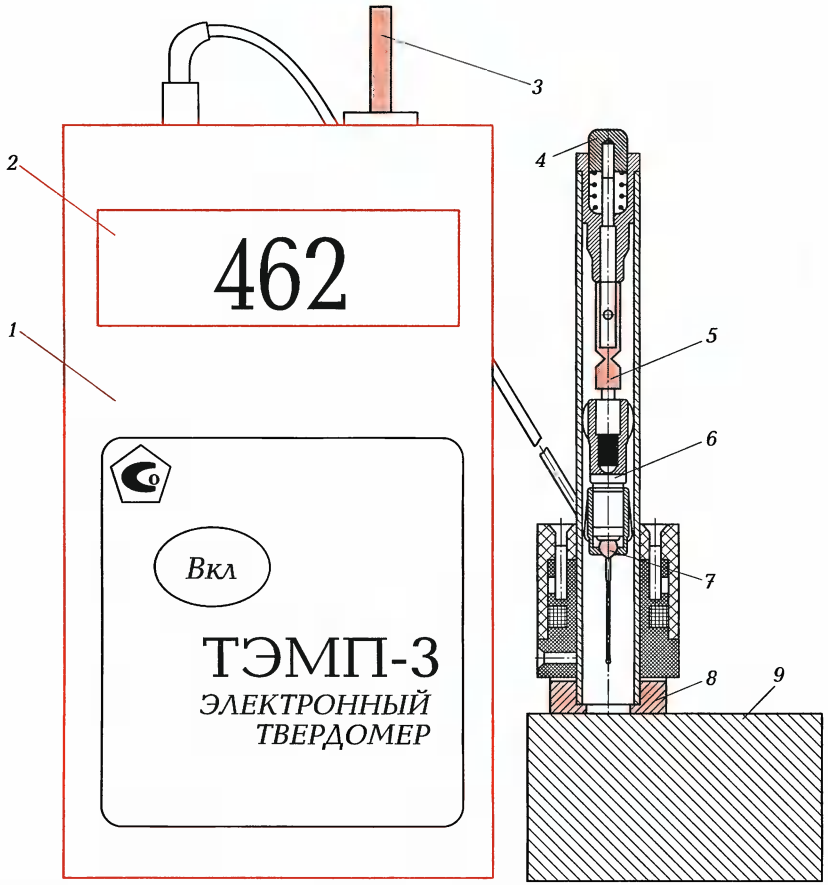


Рис. 2.8. Портативный электронный твердомер ТЭМП-3:

1 — электронный блок; *2* — ЖК-индикатор; *3* — толкатель; *4* — спусковая кнопка; *5* — датчик; *6* — ударник; *7* — шарик; *8* — опорное кольцо; *9* — испытываемая поверхность изделия

ные, квадратные и круглые с определенной насечкой. Сцепляемость насечки напильника с контролируемым металлом определяется по наличию следов царапания на контролируемой детали без смятия вершин зубьев на напильнике. В процессе эксплуатации острота зубьев напильника должна периодически проверяться на сцепляемость с контрольными образцами (кольцами). Напильники изготавливают двух групп твердости, соответственно для контроля нижнего и верхнего пределов твердости изделий. Контрольные кольца (пластинки) делают трех видов с твердостью

57...59; 59...61 и 61...63 HRC для поверки тарированных напильников, твердость которых соответствует пределам твердости контрольных образцов.

Испытание на удар (ударный изгиб) является одной из важнейших характеристик (динамической) прочности металлов. Особенно важно также испытание изделий, работающих при ударных и знакопеременных нагрузках и при низких температурах. В этом случае металл, легко разрушающийся под действием удара без заметной пластической деформации, называют ***хрупким***, а металл, разрушающийся под действием ударной нагрузки после значительной пластической деформации, — ***вязким***. Установлено, что металл, хорошо работающий при испытании в статических условиях, разрушается при ударной нагрузке, так как не обладает ударной вязкостью.

Для испытания на ***ударную вязкость*** (сопротивления материала ударным нагрузкам) применяют маятниковый копер Шарпи (рис. 2.9), на котором разрушают специальный образец — менаже, представляющий собой стальной брусок прямоугольной формы с односторонним U- или V-образным надрезом посередине. Маятник копра с определенной высоты ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу, разрушая его. При этом определяют работу, совершенную маятником до удара и после удара, учитывая его массу и высоты падения H и подъема h после разрушения образца. Разницу работ относят к площади поперечного сечения образца. Полученное при делении частное и характеризует ударную вязкость металла: чем вязкость меньше, тем материал более хрупкий.

Испытанию на изгиб подвергают хрупкие материалы (закаленная сталь, чугун), которые разрушаются без заметной пластической деформации. Так как момент начала разрушения определить не представляется возможным, то об изгибе судят по отношению изгибающего момента к соответствующему прогибу.

Испытание на кручение проводят для определения пределов пропорциональности, упругости, текучести и других характеристик материала, из которого изготовлены ответственные детали (коленчатые валы, шатуны), работающие при большой нагрузке на кручение.

Помимо рассмотренных проводятся и **другие испытания металлов**, например на усталость, ползучесть и длительную прочность. ***Усталость*** — это изменение состояния материала изделия до его разрушения под действием многократных знакопеременных (циклических) нагрузок, которые изменяются по величине или направ-

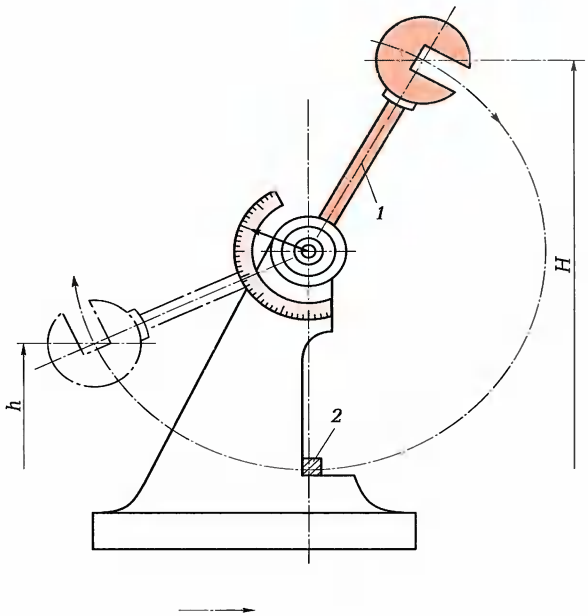


Рис. 2.9. Маятниковый копер Шарпи:
1 — маятник; *2* — образец; *H*, *h* — высоты падения и подъема маятника; ——→ — траектория движения маятника

лению, или и по величине, и по направлению. В результате длительной службы металл постепенно переходит из пластического состояния в хрупкое («устает»). Сопротивление усталости характеризуется ***пределом выносливости*** **(*пределом усталости*)** — наибольшим напряжением цикла, которое может выдержать материал без разрушения, при заданном числе повторно-переменных нагружений (циклы нагружения). Например, для стали установлены 5 млн циклов нагружения, для легких литейных сплавов — 20 млн. Такие испытания проводят на специальных машинах, в которых образец подвергают чередующимся напряжениям сжатия и растяжения, знакопеременным изгибам, кручению, повторным ударным нагрузкам и другим видам силового воздействия.

Ползучесть **(*крип*)** — это медленное нарастание пластической деформации материала под воздействием длительно действующей нагрузки при определенной температуре, по величине меньшей нагрузки, создающей остаточную деформацию (т. е. меньше, чем предел текучести материала детали при данной температуре). При этом пластическая деформация может достиг-

нуть такой величины, которая изменяет форму, размеры изделия и приводит к его разрушению. Ползучести подвержены почти все конструкционные материалы, но для чугуна и стали она существенна при нагреве свыше 300 °С и возрастает с повышением температуры. У металлов с низкой температурой плавления (свинец, алюминий) и полимерных материалов (резина, каучук, пластмассы) ползучесть наблюдается при комнатной температуре. Испытывают металл на ползучесть на специальной установке, в которой образец при заданной температуре нагружается грузом постоянной массы в течение длительного времени (например, 10 тыс. ч). При этом периодически точными приборами измеряют величину деформации. С увеличением нагрузки и повышением температуры образца степень его деформации увеличивается. ***Предел ползучести*** — это такое напряжение, которое за 100 тыс. ч вызывает удлинение образца при определенной температуре не более 1 %. ***Длительная прочность*** — это прочность материала, который в течение длительного времени находился в состоянии ползучести. ***Предел длительной прочности*** — напряжение, которое приводит к разрушению образца при заданной температуре за определенное время, соответствующее условиям эксплуатации изделий.

Испытания материалов необходимы для создания надежных машин, способных длительное время работать без поломок и аварий в чрезвычайно тяжелых условиях. Это винты самолетов и вертолетов, роторы турбин, детали ракет, паропроводы, паровые котлы и другое оборудование.

Для устройств, работающих в иных условиях, проводят специфические испытания, подтверждающие их высокую надежность и работоспособность.

2.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ПРОБЫ

В ответственных случаях прежде чем использовать приобретенный материал в производстве проводят технологические испытания с целью убедиться в том, что гарантируемые сопроводительными документами свойства этого материала являются удовлетворительными. Конкретные испытания и пробы материалов зависят от требований, предъявляемых к ним, принятого технологического процесса изготовления изделий из этих материалов, назначения изделий и других факторов.

В машиностроении и других производствах общепринятыми являются требования и технологические испытания (пробы) с целью убедиться, что передаваемый для изготовления изделий металл соответствует требуемому по типу и качеству. Самый простой способ для этого — проверить металл на искру.

Искровая проба — это ориентировочный способ определения типа стали по характеру и цвету искр, нитей (линий), образующихся при соприкосновении испытываемого металла (изделия) с вращающимся абразивным кругом. Для этого необходимо иметь ***набор образцов*** различных сталей, применяемых в данном производстве, и заточный станок (точило). Определение типа стали необходимо выполнять ***при определенных условиях***: пробы проводить на одном и том же точиле с постоянными скоростными характеристиками станка и абразивного круга, проверяемые детали должны быть чистыми, без окалины. При определении типа стали по искре важен не только цвет искры, но также форма и длина искровых нитей, их количество, размер звездочек и стрелочек, образующихся на концах нитей. При ограниченном числе типов сталей, используемых для изготовления деталей машин и инструмента, и некотором опыте можно легко и просто определить

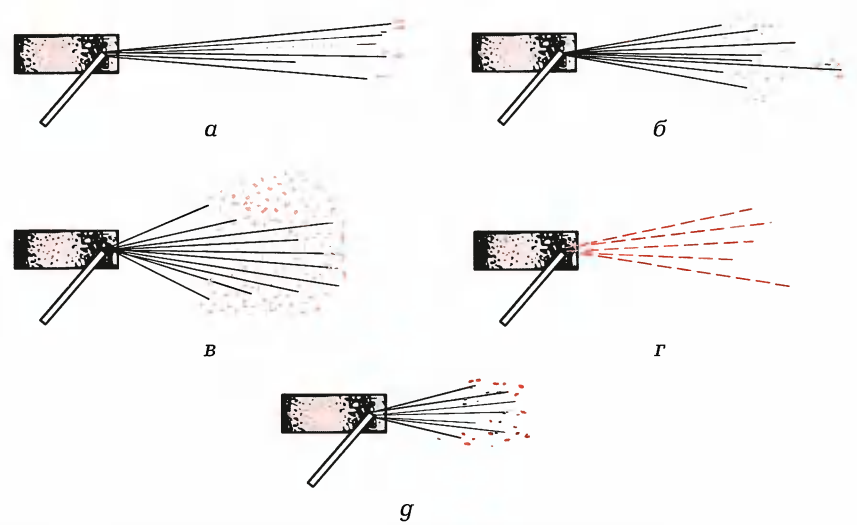


Рис. 2.10. Определение типа стали по искровой пробе:

а — низкоуглеродистая; *б* — среднеуглеродистая; *в* — высокоуглеродистая инструментальная; *г* — быстрорежущая; *д* — марганцовистая

марку материала. В сомнительных случаях пользуются образцами для сравнения.

Из опыта известно, что низкоуглеродистая сталь (рис. 2.10, *а*) дает длинный желтый пучок искр без звездочек; среднеуглеродистая (рис. 2.10, *б*) — пучок со значительным количеством светлых звездочек; высокоуглеродистая инструментальная (рис. 2.10, *в*) — короткий широкий пучок искр с большим числом мелких светлых звездочек; быстрорежущая сталь (рис. 2.10, *г*) — пучок искр без звездочек в виде прерывистых темно-красных линий; марганцовистая (рис. 2.10, *д*) — бело-желтые линии со звездочками.

Способность листового металла к холодной штамповке и вытяжке характеризуется глубиной выдавленной лунки: чем глубже лунка, получаемая до появления первой трещины в пластинке, зажатой в кольцевой поверхности, тем большей способностью к вытяжке (листовой штамповке) обладает данный металл. При входном контроле глубина лунки контролируемых металлов должна быть не меньше указанной в сопроводительной документации, ТУ или ГОСТах (табл. 2.1).

Глубину выдавливания лунки определяют на приборе Эриксена. Вырезанную из испытуемого материала заготовку *3* (рис. 2.11) зажимают между винтом *5* и матрицей *4*. Далее вдавливают в образец сферический пуансон *2* до появления на матрице первой трещины. Наблюдение ведут с помощью зеркала *1*. Для перемещения

Таблица 2.1. Минимальная глубина лунок для разных металлов, проверяемых на приборе Эриксена (для ленты шириной 30...50 мм)

Материал, марка	Радиус пуансона в приборе Эриксена, мм	Глубина лунки, мм, при толщине ленты, мм				
		0,10...0,15	0,20...0,25	0,30...0,55	0,60...1,1	1,2...1,5
Медь М1, М2, М3	10	7,5	8,0	9,0	9,5	10,0
Никель (отожженный)	4	3,4	3,8	4,0	—	—
Сталь 10 (мягкая, отожженная)	4	—	4,2	4,5...5,1	5,4...6,2	6,7

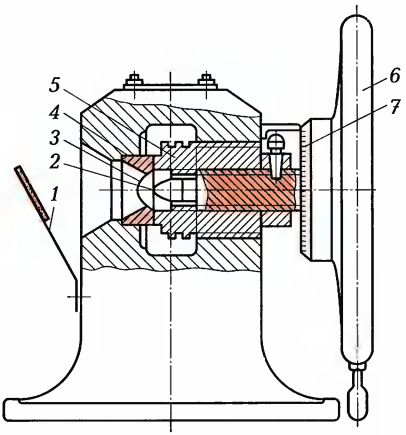


Рис. 2.11. Прибор Эриксена для определения способности листового металла к вытяжке:

1 — зеркало; *2* — пуансон; *3* — заготовка; *4* — матрица; *5* — винт; *6* — маховик; *7* — шкала

пуансона служит маховик *6*, на котором имеется барабан со шкалой *7* для определения глубины лунки с точностью до 0,01 мм.

Пластичность — свойство твердых тел необратимо деформироваться под действием механических воздействий. Процесс деформации сопровождается разрывом некоторых межатомных связей в твердом теле и образованием новых. Благодаря пластичности имеется возможность обработки материалов давлением — ковкой, прокаткой и др.

Испытание на загиб выполняют в холодном или нагретом состоянии образца металла для определения его способности принимать заданные размеры и форму без разрушения. Загиб и разгиб проводится попеременно в противоположные стороны на 90°. Выдержавшим пробу считается образец, не имеющий после испытания нарушений в его материале и покровном слое.

Испытание на перегиб проводится для определения способности металла выдерживать повторные перегибы при заданном их числе без разрушения. Таким испытаниям подвергают круглую проволоку, прутки, ленты, полосы, листы, перегибая их поочередно на угол 90°.

В приборостроении в качестве технологических испытаний применяют, например, проверку на отсутствие «водородной болезни» для меди, контроль ТКЛР для стекла и металлов. Бескислородную

медь проверяют на отсутствие «водородной болезни», так как если в меди окажется примесный кислород, то при ее нагреве в среде водорода начнется реакция между кислородом и водородом, образуются пары воды, которые внутри металла приведут к образованию пор и микротрещин, т. е. нарушат вакуумную плотность меди. Обычные сорта меди термически обрабатывать в среде водорода нельзя.

Отсутствие «водородной болезни» в бескислородной меди определяют на образцах толщиной 2 мм и шириной 10 мм. После нагрева в среде водорода образцы должны выдерживать не менее шести перегибов под заданным углом.

Температурный коэффициент линейного расширения стекла обычно определяют методом двойной нити. В пламени газовой горелки изготовляют спай двух стекол — эталонного и испытываемого, из которого вытягивают нить. При равенстве ТКЛР эталона и образца нить после охлаждения остается прямой, а при имеющемся различии — изгибается. По степени изгиба нити судят о величине ТКЛР образца.

Температурный коэффициент линейного расширения ***платинита*** определяют по таблице и диаграмме, прилагаемых к ТУ на платинит, на основании измеренных содержания никеля в сердечнике и толщины медной оболочки.

Температурный коэффициент линейного расширения ***ковара***, ***керамики*** и других материалов определяют с помощью, например, кварцевого дилатометра, принцип действия которого основан на изменении размеров тела под воздействием теплоты. Чувствительность такого измерения до 10^{-12} м.

Универсальный дилатометр позволяет определить ТКЛР абсолютным или дифференциальным методом расширения или сжатия образца материала соответственно при нагревании и охлаждении. При абсолютном методе контролируют расширение образца при нагревании. Дилатометр через автоматическое программное устройство нагревает образец с определенной заданной скоростью, поэтому расширение образца фиксируется в зависимости от времени. При дифференциальном методе с помощью оптического устройства дилатометра определяют разность расширений контролируемого и эталонного образцов в заданном диапазоне температуры нагрева. В обоих случаях данные измерений фиксируются на светочувствительной ленте.

Дилатометр состоит из четырех самостоятельных устройств: собственно дилатометра, печи с механизмом его перемещения, стола-пульта и автоматического программного устройства регули-

рования температуры с заданной скоростью. В головке дилатометра размещены источник света для главной оптической системы и измерительное оптико-механическое устройство. В качестве эталона применяют образцы из сплава пирос, который характеризуется полной обратимостью удлинения и сжатия при нагреве и охлаждении в диапазоне температур 0...1 000 °С.

Оптическая система дилатометра состоит из подвижных плоских и сферических зеркал. При определении ТКЛР абсолютным методом расширение испытываемого образца через систему зеркал фиксируется на светочувствительной перемещаемой ленте, на которой записывается кривая зависимости расширения испытываемого образца от времени.

При определении ТКЛР дифференциальным методом фиксируется одновременное расширение образца и эталона. В результате получают расширение образца в зависимости от расширения эталона. Так как расширение эталона зависит от температуры, записанная в известном масштабе кривая выражает зависимость разности расширений образца и эталона от температуры.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение стали и чугуна.
2. Каково назначение диаграммы железо—углерод?
3. Каково назначение нормализации?
4. Почему изменяются размеры изделий из углеродистых сталей после термообработки?
5. Для чего применяют отпуск и отжиг металлов?
6. Каковы основные принципы измерения твердости?
7. Каково назначение отжига?
8. Зачем закаливают металлические сплавы?
9. Как по диаграмме состояния системы железо—углерод определить температуру закалки углеродистой стали?
10. Что такое цементация?
11. Как определить твердость с помощью тарированных напильников?

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНО- И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

II

ЧАСТЬ

Глава 3. Конструкционные материалы
Глава 4. Неметаллические конструкционные материалы

Глава 3

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА

Конструкционные материалы — это материалы, применяемые для изготовления устройств (машин, механизмов, приборов, аппаратов, транспортных средств и др.), воспринимающих силовую нагрузку. Данные материалы могут быть ***металлическими*** (сплавы на основе железа, меди, никеля, титана, алюминия и других металлов), ***неметаллическими*** (пластмассы, стекло, резина, керамика, древесина и др.), ***композиционными*** (волокнистые, слоистые, порошковые) и др.

Металлические материалы для краткости обычно называют **металлами** и подразделяют на ***черные*** (железо и сплавы на его основе — 95 % всей металлопродукции) и ***цветные*** (все металлы и сплавы, кроме сплавов железа), в числе которых ***легкие*** — алюминий, магний, бериллий, титан, стронций, цезий, барий, натрий, кальций и калий; ***тяжелые*** — медь, никель, свинец, олово, цинк, кобальт, сурьма, ртуть, висмут, кадмий; ***тугоплавкие*** — вольфрам, молибден, тантал, ванадий, ниобий, рений, хром, цирконий, гафний; ***благородные*** (драгоценные) — золото, платина, серебро и платиноиды (палладий, родий, рутений, осмий, иридий) и др.

Предметом нашего рассмотрения являются металлы, имеющие промышленное применение в качестве конструкционных.

Чугун — черный металл, представляющий собой сплав железа с углеродом (более 2 %) и некоторым количеством марганца, кремния, серы, фосфора и других элементов (см. подразд. 2.1). Основная доля получаемого в доменных печах чугуна предназначается для передела в сталь и такой чугун называют ***передельным***. Кроме того, выплавляется ***литейный чугун*** и ***ферросплавы*** — специальные чугуны с увеличенным содержанием кремния, алюминия,

хрома, ванадия, никеля, титана. Ферросплавы применяются для раскисления и легирования сталей.

Присутствие в чугуне свободного углерода С (графита) проявляется в сером цвете излома, и такой чугун называют серым, а если углерод находится в связанном состоянии, т.е. в виде карбида железа Fe_3C, то излом чугуна будет светлым, блестящим и чугун называют белым.

Серый чугун является основным материалом машиностроения благодаря хорошим литейным свойствам, малому удлинению, пониженной чувствительности к нагреву, хотя прочность и износостойкость его невысоки. Из этого чугуна преимущественно отливают детали достаточно сложной формы, к которым не предъявляются жесткие требования к сохранению заданных габаритных размеров, и толщина стенок изделий определяется не условиями прочности, а технологией производства. Серые чугуны малой прочности обладают лучшими литейными свойствами, характеризуются меньшими механическими напряжениями и короблением, чем серые чугуны повышенной прочности.

Отливки из серых чугунов средней прочности наиболее широко применяют в машиностроении для изготовления корпусных и опорных деталей станков и машин. Для таких целей используют чугуны марок СЧ10, СЧ15, СЧ18 (буквы «СЧ» — серый чугун, цифры[1] — предел прочности при растяжении, кгс/мм^2). Например, чугун марки СЧ18 — это серый чугун с пределом прочности на растяжение не менее 180 МПа.

Коленчатые валы, детали передач, тяжелонагруженные станины и направляющие, работающие на износ в условиях значительных нагрузок, скоростей и напряжений, производят из серых чугунов повышенной прочности — марки СЧ30 и СЧ35 (ГОСТ 1412—85).

Улучшение прочности серого чугуна достигается при обеспечении выделения и равномерного распределения мелкопластинчатого графита путем специальной обработки — ***модифицирования***. Модифицируют чугуны введением в расплав графитизирующих добавок (ферросилиций, силикокальций, силикоалюминий и др.), которые образуют дополнительные центры графитизации, в результате чего и получается мелкопластинчатый графит. Такой чугун называют ***модифицированным***, он отличается от обычного серого чугуна более высоким сопротивлением разрыву, улучшен-

---

[1] Предел прочности определяется в Н/мм^2 или в МПа. Для пересчета используется соотношение: 1 кгс/мм^2 ≈ 10 МПа = 10 Н/мм^2.

ными литейными свойствами, однородностью структуры. Его применяют для изготовления отливок ответственного назначения (дизельные цилиндры, блоки цилиндров, кулачковые коленчатые валы и др.).

Высокопрочные чугуны получают модифицированием серого чугуна магнием (0,5...1,2 %), кальцием, церием и др. Эти добавки способствуют тому, что графит при кристаллизации чугуна формируется в виде шаров, придавая чугуну высокую прочность на растяжение до 1 ГПа (100 кгс/мм^2) и удлинение 8...10 %. Такая пластичность, как у чугуна с шаровидным графитом, отсутствует даже у самых лучших серых чугунов с мелкопластинчатым графитом. Кроме того, благодаря шаровидному графиту чугун приобретает высокую стойкость против истирания и хорошие антифрикционные свойства.

Структура отливки из чугуна при одном и том же составе может быть разной в зависимости от толщины отливки. Чтобы обеспечить необходимую структуру отливок разной толщины, нужно знать их химический состав.

Тонкостенные отливки выполняют из чугунов с содержанием углерода до 3,6 % и кремния до 2,8 %, повышению жидкотекучести чугуна способствует фосфор (но пластические свойства чугуна фосфор снижает; для получения чугуна с высокими пластическими свойствами содержание фосфора не должно превышать 0,08 %). В чугуне для тонкостенных отливок и для художественного литья содержание фосфора может быть до 1,2 %. Антифрикционные свойства отливок повышают добавками никеля и хрома, снижая содержание кремния, серы и фосфора одновременно. Повышенное содержание хрома и никеля в чугуне делает его жаро- и коррозионно-стойким.

Изделия, работающие в условиях повышенного износа (тормозные колодки, щеки камнедробилок и др.), высоких температур (колосники и др.), химического воздействия реагентов (емкости и арматура для агрессивных сред), изготовляют методом литья из ***белого чугуна***. Прокатные валки, вагонные колеса, гидроцилиндры и другие изделия делают из ***отбеленного чугуна*** (поверхностный слой его состоит из белого чугуна, а основная масса изделия имеет структуру и свойства серого чугуна). Отбеленный чугун хорошо сопротивляется изнашиванию.

Белые чугуны бывают ***легированные*** и ***нелегированные***. Введение в состав белых чугунов никеля и бора делает их износостойкими, легирование хромом придает им износо- и теплостойкость, а кремнием — кислотостойкость.

По названию легирующего компонента, содержание которого в чугуне наибольшее, легированные чугуны могут называться никелевыми, алюминиевыми, хромистыми и др. Например, легированный никелевый чугун марки ЧН19Х3Ш, обладающий повышенными коррозионной стойкостью, прочностью, пластичностью, содержит 17...20 % никеля, 2,5...3,5 % хрома и суммарно менее 0,08 % серы. Буква «Ш» в марке означает, что углерод (графит) в структуре данного чугуна имеет шаровидную форму. Алюминиевый чугун марки ЭАЧЮ-22 как жаростойкий и износостойкий материал (буква «А» — антифрикционный) имеет в своем составе 19...25 % алюминия и пластинчатый углерод.

Сплав ***чугаль*** — жаростойкий и коррозионно-стойкий чугун, содержащий 19...25 % алюминия. Из него изготовляют детали отжиговых печей, работающих в парах серы, тигли для плавления алюминия и др.

Хромистые чугуны (марки ЖЧХ1—ЖЧХ30) предназначены для изготовления жаростойких (буква «Ж» в марке чугуна), коррозионно-стойких и износостойких отливок. Предельная рабочая температура для изделий из хромистых чугунов, содержащих 13...16 % хрома, составляет 900 °С, а для чугунов с 20...30 % хрома — 1 200 °С.

Ковкий чугун — чугун, характеризующийся по сравнению с серым чугуном более высокими прочностью, пластичностью и вязкостью. Ковкий чугун получают специальной термической обработкой белого чугуна. В результате ковкий чугун может быть со структурой чистого феррита с внедренными в него включениями углерода отжига (графит хлопьевидной формы). У такого чугуна предел прочности при растяжении составляет 0,35...0,4 ГПа (35...40 кгс/мм^2) и удлинение 1,5...15 %. Ковкий чугун с перлитной основой имеет предел прочности при растяжении 0,5...0,6 ГПа (50...60 кгс/мм^2), но низкое удлинение 2...4 % и значительно меньшее сопротивление удару, чем у ковкого чугуна со структурой феррита. Но главным преимуществом перлитного ковкого чугуна перед ферритным — высокое сопротивление изнашиванию. Ковкий чугун ориентировочно содержит 0,5...1,6 % углерода, 0,3...0,5 % марганца, менее 0,2 % фосфора и менее 0,1 % серы.

Ковкие чугуны представляют собой наиболее дешевый и удобный материал для изготовления мелких литых изделий сложной формы. Из них получают литьем детали автомобилей, станков, водопроводной арматуры, конвейеров и элеваторов. Достоинством ковкого чугуна является высокое отношение предела теку-

чести к пределу прочности, относительно высокое сопротивление изгибу и кручению, он износостоек, литая поверхность обладает коррозионной стойкостью, хорошо обрабатывается режущим инструментом, имеет малую плотность.

Ковкие чугуны маркируют по их названию и некоторым механическим свойствам. Например, в марках КЧ 40-4 и ВЧ 60-8 буквы «Ч» — чугун, «К» — ковкий, «В» — высокопрочный, а цифры — предел прочности при растяжении (40 и 60 кгс/мм^2, т.е. 400 и 600 МПа) и относительное удлинение в процентах (4 и 8 % соответственно).

Стали по химическому составу подразделяют на два класса: нелегированные (углеродистые) и легированные. ***Нелегированная (углеродистая)*** сталь — сплав железа с углеродом (0,04...2 % С) и постоянными примесями марганца, кремния, серы и фосфора, которые неизбежно присутствуют в связи с условиями его производства. По содержанию углерода нелегированную (углеродистую) сталь подразделяют на подклассы: низкоуглеродистая (до 0,25 % С), среднеуглеродистая (0,25...0,60 % С) и высокоуглеродистая (более 0,60 % С). ***Легированная*** сталь подразделяется на подклассы низко-, средне-, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой, никелевой основе и др. В технике используется классификация сталей по их назначению, качеству и др.

По назначению выделяют группы сталей: конструкционная; инструментальная; топочная и котельная; для железнодорожного транспорта (рельсовая, для колес и др.); подшипниковая; рессорно-пружинная, трубная и др.

По качеству различают группы сталей обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные.

Углеродистые стали обыкновенного качества обозначаются буквами «Ст» (от слова «сталь») и номером марки от 0 до 6 в порядке возрастания прочности; в конце марки указаны буквы, характеризующие способ раскисления: «сп» — спокойная; «пс» — полуспокойная; «кп» — кипящая, т.е. сталь нераскисленная, менее однородная, так как содержит растворенные газы. Цена на такую сталь снижается примерно на 12 %. Углеродистые стали обыкновенного качества используют в конструкциях, требующих при изготовлении гибки, резки, пробивки отверстий, холодной высадки с большим деформированием металла (элементы котлов и резервуаров, крепежные изделия — заклепки, шайбы, болты). Например, металлические крановые и строительные конструкции изготовляют из стали Ст3пс и Ст3кп.

Стали качественные бывают ***легированные*** и ***углеродистые***. Обозначение марок легированных сталей включает в себя примерный химический состав стали. Первые цифры в обозначении, например, конструкционных сталей — среднее содержание углерода в сотых долях процента, а в обозначении инструментальных сталей — в десятых долях процента. Легирующие элементы обозначаются следующими буквами русского алфавита: азот (не в конце марки) — А, алюминий — Ю, бор — Р, ванадий — Ф, вольфрам — В, кремний — С, марганец — Г, медь — Д, молибден — М, никель — Н, титан — Т, хром — Х и др. Цифры, стоящие в марке после букв, указывают примерное процентное содержание соответствующего легирующего элемента. Если содержание элемента приблизительно или менее 1 %, то цифра не указывается. Высококачественные легированные стали дополнительно отмечают буквой «А» в конце марки, которая указывает, что в данной стали суммарное содержание вредных примесей — фосфора и серы — содержится менее 0,05 %. Буква «Л» в конце марки — литейная.

Конструкционные качественные углеродистые стали широко применяют в машиностроении для изготовления разных деталей как термически обрабатываемых, так и необрабатываемых термическим способом. При маркировке этого материала после слова «сталь» указывают двухзначную цифру — среднее содержание углерода в сотых долях процента. Марки этой стали: 08; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 58; 60; 65; 70. Считается, что закалку начинает принимать сталь, содержащая 0,30...0,35 % углерода. Когда необходимо иметь твердую поверхность и мягкую сердцевину, используют низкоуглеродистую качественную сталь (например, сталь 20). Из этой стали изготовляют детали, которые подвергают цементации и закалке до получения твердости 60...64 HRC, после чего их обрабатывают окончательно.

Среднеуглеродистая качественная сталь (например, сталь 45) закалку принимает, но твердость при этом будет 42...44 HRC. Для деталей, изготовляемых на токарных автоматах, используют так называемые автоматные стали с повышенным содержанием фосфора и серы. Эти стали обозначают буквой «А» и двухзначным числом — содержание углерода в сотых долях процента. Например, автоматная сталь А12 содержит в среднем 0,12 % углерода. Детали из автоматных сталей имеют калиброванный наружный диаметр (для зажима прутка из таких сталей цангой) с малой шероховатостью, они хорошо обрабатываются резанием, образуя обычно мелкую стружку скалывания.

Из конструкционной стали производится большой ассортимент сортового проката простого и фасонного профиля: холоднокатаные (толщиной 0,05...3,6 мм) и горячекатаные (2,2...3,6 мм) ленты, тонкий (0,2...4 мм) и толстый (4...160 мм) лист, полоса (4...8 мм), широкая полоса (6...60 мм), изделия круглого, квадратного, шестигранного сечений, уголки (равнобокие и неравнобокие), швеллеры, двутавры, фасонный прокат, трубы (электросварные, бесшовные, волоченые) и др.

Для изготовления стальных изделий методом литья используют специальные углеродистые стали. По свойствам получаемые отливки подразделяют на три группы: I — обыкновенного, II — повышенного и III — особого качества. Стальные отливки, как правило, имеют несколько худшую структуру и соответственно более низкие механические свойства, чем стальные изделия, изготовленные давлением.

Легированная сталь — это сталь, в которой наряду с обычными примесями (углерод, кремний, марганец, сера, фосфор) содержатся специально вводимые легирующие элементы или кремний и марганец в повышенном количестве. При суммарном содержании легирующих элементов до 2,5 % сталь считается ***низколегированной***, 2,5...10 % — среднелегированной и более 10 % — высоколегированной. Легирующими элементами служат хром, никель, молибден, вольфрам, ванадий, марганец, титан. По основным легирующим элементам стали называют соответственно хромистыми, никелевыми, хромоникелевыми, молибденовыми и другими и указывают легирующие элементы в марке. Например, в конструкционной высококачественной (буква «А» в конце марки) хромоникелевой стали марки 40ХН2МА содержится 0,4 % углерода, примерно 1 % хрома, примерно 2 % никеля и примерно 1 % молибдена.

Коррозионно-стойкие стали также являются конструкционными материалами, широко используемыми в промышленности. ***Коррозионно-стойкими высоколегированными*** называют стали, устойчивые к коррозии в воздушной атмосфере, морской и речной воде, а также в некоторых агрессивных средах. Наиболее известны хромистые (содержат 12...27 % хрома) и хромоникелевые (18 % хрома и 9 % никеля) стали, которые могут иметь в своем составе и другие добавки (титан, алюминий). Коррозионно-стойкие высоколегированные стали можно классифицировать по назначению, выделяя группы конструкционных, инструментальных, кислотостойких, жаростойких, окалиностойких (жароупорных) материалов, а также стали с большим электрическим сопротивлением. Ознакомимся с некоторыми из них более подробно.

Коррозионно-стойкие стали можно также подразделить на две большие группы атмосферостойких и кислотостойких (стойкие в агрессивных средах) сталей. Следует заметить, что атмосферные воздействия выдерживают все коррозионно-стойкие стали, однако по экономическим соображениям в качестве атмосферостойких рекомендуется использовать стали марок Х14, 20Х13, 30Х13, 40Х13, Х13Н4Г9 и др. Из указанных сталей изготовляют лопатки для турбин, клапаны гидравлических прессов, шестерни, предметы бытового обихода. Сталь 40Х13, используемая для производства хирургического, режущего, мерительного инструментов, принимает закалку (содержит до 0,4 % углерода) и удерживается на магнитном столе при проведении шлифования.

Кислотостойкими являются стали Х17, Х17Н2, Х25, Х28, 20Х18Н9, Х18Н9Т, Х18Н11Б и другие, из которых делают оборудование для азотно-кислотных заводов, баки, трубопроводы, теплообменники, абсорбционные башни. Кроме того, из сталей Х17, Х17Н2 изготовляют оборудование кухонь, столовых, консервных заводов и предметы домашнего обихода.

Сернистой, кипящей фосфорной, муравьиной и уксусной кислотам хорошо противостоит сталь Х18Н12М3Т, которую используют для производства соответствующего оборудования и приспособлений, контактирующих с данными средами.

Окалиностойкая сталь противостоит образованию окалины при воздействии на нее газовой атмосферы с высокой температурой.

Жаростойкость — способность сплава сопротивляться химическому разрушению в газовых средах при высокой температуре эксплуатации (выше 550 °С).

Жаростойкая сталь способна работать в агрессивной среде при высокой температуре, сохраняя механические свойства. С этими сталями будем знакомиться одновременно, так как свойства окалино- и жаростойкости, дополняющие одно другое, стали приобрели благодаря введению больших количеств хрома (до 30 %) и никеля (до 78 %). Повышению жаростойкости инструментальных сталей способствуют также добавки вольфрама и молибдена.

Некоторые жаростойкие стали являются жаропрочными, т. е. могут работать в агрессивной среде и в условиях высоких температур в течение определенного времени в нагруженном состоянии. Например, стали Х18Н25С2 и Х25Н2С2 окалиностойки при температуре до 1 100 °С, жаростойки и кислотостойки и жаропрочны. Их используют для изготовления таких изделий, рабо-

тающих в сильно нагруженном состоянии, как конвейерные ленты для печей, которые испытывают одновременное силовое воздействие больших перемещаемых термически обрабатываемых изделий и высокой температуры. Стали Х20Н14С2, Х23Н13 и Х23Н18 окалиностойки до температуры 1 000 °С, они жаропрочны и кислотостойки. Из них делают подвески и опоры в котлах, детали в установках пиролиза газа, сварочную проволоку, трубы и др. Такие стали, как Х9С2, Х12ЮС, Х14Н14В2М (ГОСТ 20072—75), применяют для производства деталей паровых и газовых турбин, пароперегревателей и др., работающих в условиях высоких давлений и температур (до 800 °С), так как они не образуют окалины и жаропрочны. Задвижки, штоки, отдельные детали насосов, трубы и другие изделия, выдерживающие температуру до 650 °С в условиях воздействия паров серной кислоты, выполняют из стали Х6СМ и Х7СМ, которые в этих условиях не окисляются. Детали из стали Х18Н9Т способны работать при температуре нагрева до 600 °С. Эта сталь не подвержена межкристаллитной коррозии (коррозия по границам зерен), не выделяет газов при нагреве и поэтому используется для изготовления вакуумных систем.

Нитраллой — общее название группы сталей (например, 38ХЮ, 38ХМЮА), предназначенных для изготовления деталей, работающих в тяжелых условиях и поэтому специально азотируемых. Легирующими элементами таких сталей являются алюминий, хром, молибден, ванадий, образующие мелкокристаллические твердые нитриды, придающие поверхностному азотируемому слою большую твердость (до 1 200 HV) и износостойкость.

Хромансиль — конструкционная среднелегированная сталь, имеющая в своем составе по одному проценту хрома, марганца и кремния и характеризующаяся благоприятным сочетанием прочности и пластичности. Такую сталь используют в машиностроении для изготовления различных конструкций.

3.2. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ И НИКЕЛЯ

Рассмотрим медные, никелевые и другие сплавы, нашедшие применение в машиностроении в качестве конструкционных. Обозначения легирующих компонентов цветных сплавов при их маркировке отличаются от обозначений, принятых для сплавов на основе железа. Приведем некоторые из обозначений компонен-

тов цветных сплавов: алюминий — А (АЛ), бериллий — Б, железо — Ж, кадмий — Кд, кремний — К (Кр), марганец — Мц (Мр), медь — М, никель — Н, олово — О, свинец — С (Св), сурьма — Су, титан — Ти, фосфор — Ф, хром — Х, цинк — Ц и др.

Медь является основой для многих промышленных сплавов, главными из которых являются латуни, бронзы, медно-никелевые сплавы.

Латунями называют двойные или более сложные сплавы меди, в которых главным легирующим элементом является цинк. Для улучшения свойств двойной (***простой***) латуни ее дополнительно легируют алюминием, оловом, кремнием, железом, свинцом и др. Получаемые сложные (***специальные***) латуни именуются по вводимым кроме цинка легирующим компонентам. Так, известны свинцовые (до 1...2,5 % свинца), кремнистые (2,5...4,5 % кремния), марганцевые (1...2 % марганца), оловянные латуни, а также железомарганцевые (1 % железа и 1 % марганца) и многие другие сложные латуни. Марки латуни обозначаются буквой «Л», а далее в марке простой латуни следуют цифры — содержание меди в процентах. В марках сложных (специальных) латуней указываются соответствующие буквенные обозначения добавки (свинец, железо, никель, марганец и др.) и далее через дефис цифрами — их содержание после указания содержания меди. Например, ЛА72-2 — латунь алюминиевая, содержащая 72 % меди, 2 % алюминия, остальное — цинк.

Латуни подразделяют на обрабатываемые давлением и литейные. Присутствие разных компонентов в латуни изменяет ее свойства. Например, добавки свинца в латуни ЛС59-1 делают ее хорошо обрабатываемой режущим инструментом. Стружка в этом случае становится сыпучей, не завивается в длинную спираль, которую необходимо удалять. Наличие кремния в латуни повышает механические свойства, обрабатываемость режущим инструментом, улучшает жидкотекучесть при литье, а при введении примеси свинца делает ее антифрикционной. Марганцевая латунь имеет повышенные механические свойства, противостоит коррозии и нагреву. Алюминий в такой латуни повышает ее прочность и сопротивление воздействию морской воды.

Простые латуни, используемые в машиностроении, содержат до 45 % цинка, а остальное — медь. Специальные латуни кроме цинка и меди могут содержать много других элементов — например, алюминий, никель, кремний, марганец в алюминиевоникель-кремнистомарганцевой латуни ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5. Но есть латуни с большим содержанием меди (до 88...97 %, остальное (до

10 %) цинк), их называют ***томпаком*** (Л96, Л90) и ***полутомпаком*** (Л80). Эти латуни обладают высокой коррозионной стойкостью. Их применяют для изготовления биметаллических материалов сталь — латунь, деталей конденсационно-холодильного оборудования, а также художественных изделий благодаря внешнему сходству с золотом (ювелирные и декоративные изделия). Латуни Л68 и Л62 иногда используют для производства штучных объемных изделий способом выдавливания на токарных станках с промежуточным отжигом заготовок.

Специфической особенностью медно-цинковых сплавов является разрушение нагартованных[1] деталей, связанное с частой сменой тепловых и атмосферных условий, называемое «сезонной болезнью». Например, изделие из латуни, находящееся под нагрузкой (шпилька с резьбой на концах и др.), может самопроизвольно и неожиданно оборваться. Длительность работы такого изделия в зависимости от степени нагартовки и концентрации напряжений может быть от нескольких минут до нескольких дней и даже месяцев.

Бронзы — это сплавы на основе меди, в которых добавками (за исключением цинка и никеля) могут быть олово (основной легирующий элемент), алюминий, бериллий, кремний, свинец, хром и другие элементы. Старейшим сплавом являются оловянные бронзы, позже появились безоловянные бронзы. В маркировке первые две буквы «Бр» — вид сплава — «бронза», последующие буквы обозначают ее компоненты, а цифры через дефис — их процентное содержание. Например, бронза БрОЦС6-6-3 — оловянная, содержит 6 % олова, 6 % цинка, 3 % свинца, а остальное — медь. Для получения изделий из бронзы используют обработку резанием или литье. Бронзы имеют высокие литейные и антифрикционные свойства, красивый внешний вид, стойки против коррозии.

Как и латуни, бронзы, как правило, называют по легирующим присадкам (кроме меди), например оловянные (2...7 % олова), кремнистые (2,75...3,5 % кремния и дополнительно 1...5 % марганца), алюминиевые (8...12 % алюминия), свинцовые (до 33 % свинца) и др. Известные с древних времен ***оловянные*** бронзы довольно широко применяются в технике. Из-за дефицита олова появились заменители оловянной бронзы, например кремнистая латунь. Оловянные бронзы обладают высокими литейными, антифрикционными и антикоррозионными свойствами, хорошо обрабатыва-

[1] Нагартовка — повышение твердости и прочности металлических материалов путем холодной обработки давлением.

ются резанием, поэтому их используют для изготовления скульптур и художественного литья, а в технике — для производства арматуры, работающей в пресной и морской воде, а также пара при давлении до 2,5 МПа. Из оловянных бронз изготовляют подшипники скольжения. Недостатком этих бронз считается большой интервал ее затвердевания (до 150 °С), что способствует формированию пористости отливок и росту их негерметичности. Устраняется этот недостаток повышением скорости охлаждения отливок разными способами (применением метода центробежного литья, использованием металлических форм, введением в бронзу цинка, проведением кристаллизации под давлением). Обнаруженную в отливках негерметичность можно устранить также отжигом при температуре 650...700 °С в течение не менее 2 ч (в зависимости от толщины стенок) с охлаждением изделия вместе с печью до температуры 300...350 °С.

Для снижения содержания олова в бронзе с целью его экономии и улучшения некоторых качеств бронзы в ее состав вводят разные добавки. Легирование цинком улучшает механические и литейные свойства бронзы. Свинец повышает литейные, антифрикционные и антикоррозионные свойства, а никель (до 1,5 %) улучшает механические качества и препятствует ликвации свинца в бронзе. Наличие кремния в ***кремнистой*** бронзе делает ее упругой, а дополнительное легирование ее марганцем повышает прочность и прокаливаемость. Такие бронзы используют для изготовления пружин и фасонного литья. Бронзы хорошо себя зарекомендовали как электродный материал для электрических контактных машин. К ним относятся ***кадмиевая*** (0,9...1,2 % кадмия), ***хромовая*** (0,4...0,7 % хрома), ***никель-бериллиевая*** (1,4...1,6 % никеля, 0,2...0,4 % бериллия и 0,05...0,15 % титана) и другие бронзы. Эти бронзы выпускаются в виде прутков разных диаметров, полос, плит, тянутыми и прессованными в термообработанном и термонеобработанном состояниях. Указанные бронзы обладают свойствами, необходимыми для электродов. Главными из свойств являются высокая электропроводность и механическая прочность при повышенной температуре эксплуатации. Повышенная электропроводность обеспечивается за счет компонентов бронзы, а механическая прочность создается специально нагартовкой или наклепом. Твердость по Роквеллу должна быть не ниже 61...64 HRB. Каждая марка электродной бронзы имеет свое назначение. Например, никель-бериллиевая бронза типа БрНБТ используется для электродов точечной и шовной сварки коррозионно-стойких сталей, титана и др.

Свинцовые бронзы, имеющие в своем составе 60 % свинца и 2,25...2,79 % никеля, используют как заменитель оловянной бронзы вместо высокооловянного баббита[1], применяемого для покрытия стальной ленты во вкладышах подшипников скольжения. Примесь никеля в свинцовой бронзе предупреждает ликвацию свинца и меди, повышая при этом прочность сплава.

К **медно-никелевым сплавам** относят конструкционные сплавы — мельхиоры и нейзильберы. ***Мельхиоры*** — сплавы на основе меди, содержащие 20...30 % никеля и небольшие количества легирующих железа и марганца, а ***нейзильберы*** — также сплавы на основе меди с 5...35 % никеля и 13...45 % цинка. Благодаря стойкости против коррозии в воде, в том числе морской, конструкционные медно-никелевые сплавы нашли широкое применение в судостроении, в приборах точной механики. Из них изготовляют медицинский инструмент, посуду, художественные изделия, монеты, а также паровую и водяную арматуру. Мельхиоры хорошо обрабатываются давлением в холодном и горячем состояниях. Нейзильберы характеризуются повышенной прочностью и упругостью после деформации, удовлетворительной пластичностью в холодном и горячем состояниях.

Кроме того, известен медно-никелевый сплав — ***копель*** (содержит 43 % никеля и 0,5 % марганца), применяемый в качестве отрицательного термоэлектрода в паре с хромелем для целей пирометрии[2]. Из всех медно-никелевых сплавов копель имеет максимальную термоэлектродвижущую силу (термоЭДС) в термопаре с хромелем. Этот сплав работает при температуре до 600 °С и кратковременно до 800 °С. Из копеля исполняют компенсационные провода.

Манганин — медно-никелевый сплав, применяется в электротехнике.

Никель — металл, обладающий комплексом ценных свойств, основными из которых являются прочность, высокая пластичность, коррозионная стойкость, низкое давление его насыщенного пара, повышенная температура плавления и др. Благодаря этому никель нашел широкое применение в машиностроении, электротехнике, медицинской аппаратуре, приборостроении и других

---

[1] **Баббиты** — легкоплавкие антифрикционные сплавы, основными компонентами которых являются пластичные олово или свинец с добавками более твердых меди, сурьмы, никеля.

[2] Измерение температуры бесконтактным методом, т. е. действие пирометра основано на использовании собственного теплового излучения нагретых тел (в нашем случае — термоэлектродов).

отраслях техники. Кроме того, никель применяют в качестве антикоррозионных и декоративных покрытий, для изготовления литейных и деформируемых сплавов и легирования сталей.

Никелевые сплавы условно можно подразделить на несколько групп: низколегированные для электротехнических целей; термоэлектродные (хромель, алюмель); коррозионно-стойкие (монель — металл); жаростойкие (нихром и ферронихром). Легирующими элементами в никелевых сплавах являются алюминий, кремний, марганец, хром, медь и железо. Так, алюминий значительно изменяет термоэлектрические свойства никеля, повышая его электрическое сопротивление, а также жаростойкость. Кремний способствует увеличению жаростойкости, а марганец еще и повышает электрическое сопротивление. Добавки хрома приводят к увеличению электрического сопротивления и тепловых свойств (жаропрочности и жаростойкости) сплавов, а легирование медью способствует увеличению их коррозионной стойкости и прочности.

По коррозионной стойкости сплавы никеля с медью превосходят отдельно взятые никель и медь. Сплав никеля с 30 % меди отличается наиболее высокой устойчивостью в пресной, морской воде, на воздухе и в агрессивных средах.

Подробнее ознакомимся с некоторыми наиболее характерными свойствами никелевых сплавов с титаном, железом и другими металлами.

Нитинол — сплав никеля (55 %) с титаном (45 %) — обладает эффектом запоминания формы[1].

Нимоник — жаропрочный (работающий при температуре до 1 000 °С) никелевый сплав, легированный хромом, титаном, алюминием, кобальтом и другими элементами — используется для изготовления деталей газовых турбин, ракет и других конструкций.

Пермаллои — группа сплавов никеля с железом, имеющих высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу и низкие потери на гистерезис. Различают две группы этих сплавов — низконикелевые (40...50 % никеля) и высоконикелевые (70...83 % никеля) — являющихся магнитомягкими материалами, используемыми в приборах вычислительной техники и техники связи, в радиотехнике.

---

[1] Восстановление исходной формы деформируемых металлических изделий в результате нагрева. Эффект связан с образованием кристаллов мартенсита в процессе пластической деформации и их исчезновением при последующем нагревании.

Перминвар — магнитомягкий материал, представляющий собой сплав с постоянной магнитной проницаемостью и малыми потерями на гистерезис в слабых полях. Этот сплав никеля (45...46 %), железа (30 %) и кобальта (23...25 %) (есть перминвар, содержащий до 70 % никеля и до 7,5 % молибдена) применяют в радио- и электротехнике для изготовления высокостабильных сердечников трансформаторов и дросселей.

Перменорм — магнитомягкий материал с повышенными магнитными свойствами, состоящий из 50 % никеля и 50 % железа (железоникелевый пермаллой), применяется для изготовления деталей реле, трансформаторов, дросселей, работающих с подмагничиванием.

К никелевым относятся хромель и алюмель — сплавы, используемые для составления термопар. ***Хромель*** — сплав никеля с хромом (9...10 %) и кобальтом (1 %) — применяется в качестве положительного электрода и компенсационных проводов термопар. Удельное электрическое сопротивление хромеля примерно 1 мкОм·м, предельная рабочая температура 1 000 °С. ***Алюмель*** — сплав никеля с алюминием (1,8...2,5 %), марганцем (1,8...2,2 %) и кремнием (0,85...2 %) — применяется в качестве отрицательного электрода термопар, способного работать при температуре до 1 000 °С.

3.3. ЛЕГКИЕ СПЛАВЫ

Металлы, обладающие малой плотностью, называют легкими металлами. Из широко используемых к ним относятся алюминий (плотность 2 700 кг/м^3), магний (1 740), бериллий (2 848) и титан (4 505). Из этих металлов получают **легкие сплавы**, а также их применяют в качестве легирующих добавок к другим сплавам. Из легких металлов и сплавов изготовляют детали и устройства воздушного и водного транспорта, в которых большая масса является критичной для работы конструкции. Легкие металлы и сплавы характеризуются высокой ***удельной прочностью***, т. е. высоким отношением механических свойств к их плотности. Так, алюминиевые сплавы в литом состоянии по удельной прочности превосходят все другие литейные сплавы, а в деформированном состоянии равноценны конструкционным высокопрочным сталям.

К легким конструкционным сплавам относятся алюминиевые, бериллиевые, магниевые и титановые сплавы, у которых удельная

прочность выше, чем, например, у конструкционных сплавов на основе железа или никеля. Так, при одинаковой прочности дюралюминий в 3 раза легче котельной стали и его удельная прочность примерно в 3 раза выше, чем у стали.

Алюминий — основа многих легких сплавов, в которые легирующие добавки (медь, кремний, магний, цинк, марганец) вводят главным образом с целью повышения прочности основы.

Основные **сплавы алюминия** — дуралюмины и силумины, получившие широкое применение в авиационной, автомобильной, судостроительной, тракторной промышленности и приборостроении. Эти сплавы подразделяют на обрабатываемые давлением (деформируемые) и литейные. ***Дуралюмины*** — сплавы алюминия с добавками 3,8...5,2 % меди, 0,4...1,8 % марганца и 0,4...1,0 % магния. Кроме указанных элементов в дуралюмины могут входить и другие (например, никель) улучшающие его механические характеристики элементы. ***Силумины*** — это литейные сплавы алюминия с кремнием.

Алюминиевые литейные сплавы по физико-химическим свойствам можно разделить на несколько групп исходя из содержания определяющих их основные характеристики легирующих элементов.

Алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния (5 % и более) обладают высокой литейной способностью — повышенной жидкотекучестью, малой усадкой, отсутствием трещин в горячем состоянии и т.д. (это сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9 и др.).

Алюминиевые сплавы с высоким содержанием магния (4 % и более) имеют самую малую плотность из всех литейных алюминиевых сплавов, коррозионно-стойкие и сравнительно высокопрочные (это сплавы АЛ8, АМг5, АМг6).

Алюминиевые сплавы с высоким содержанием меди (4 % и более) особыми свойствами не обладают — значительная плотность, низкие коррозионная стойкость и жидкотекучесть, поэтому пригодны для изготовления изделий неответственного назначения (это сплавы АЛ7, АЛ12, АЛ19).

Алюминиевые сплавы с высоким содержанием цинка (10...12 %) ***и кремния*** (6...8 %) характеризуются тем, что хорошо заполняют литейную форму, дают чистую поверхность, не требуют специальной термической обработки (это сплав АЛ11 и др.).

Многофазные сплавы с гетерогенной (неоднородной) и устойчивой структурой (сплавы типа АЛ1) являются жаропрочными и используются для деталей, работающих при повышенной темпе-

ратуре. При этом, чем выше жаропрочность сплава, тем хуже его технологические свойства.

Из деформируемых алюминиевых сплавов можно отметить, например, низколегированные и термически не упрочняемые сплавы типа АМц, АМг и др. К этой группе относят сплавы с постоянными примесями железа и кремния, иногда с добавкой титана. Сплавы, содержащие 2...7 % магния, образуют семейство материалов типа ***магнолит***, они имеют высокую коррозионную стойкость, пластичны, хорошо свариваются. Основной способ упрочнения — нагартовка. Из этих сплавов изготовляют профили, трубы, листы, прутки и др. Сплавы типа дюралюмин (Д16) применяют в закаленном и состаренном состояниях, они работоспособны при температуре до 200 °С, поэтому эти сплавы используют для производства конструкций, работающих при повышенных температурах. Если из этого материала изготовить заклепки, то время их расклепывания ограничивается малым временем после закалки.

Наряду с дюралюминами и силуминами используют другие сплавы на основе алюминия — авиаль и магналии.

Авиаль — сплав на основе алюминия, содержащий до 0,45 % магния, 0,5...1,2 % кремния, 0,2...0,6 % меди, 0,15...0,35 % марганца или хрома. Этот сплав обладает высокой пластичностью и удовлетворительной атмосферной коррозионной стойкостью. Термической обработкой (закалкой и старением) авиаль упрочняют. Так как сплав обладает достаточной пластичностью и хорошо обрабатывается давлением, из него изготовляют детали сложной формы (лопасти винтов вертолетов).

Магналии — сплавы на основе алюминия, легированные 1...13 % магния, — бывают литейные (4...13 % магния) для изготовления сложных фасонных отливок и деформируемые (1...7 % магния), хорошо сваривающиеся и имеющие высокие показатели по коррозионной стойкости и пластичности. Такие сплавы используют в судостроении и ракетостроении.

Бериллий и бериллиевые сплавы становятся все более востребованными в связи с бурным развитием специальной техники — ракетостроения, авиации, созданием космических и глубоководных аппаратов и других изделий, так как данные материалы обладают комплексом ценных свойств.

Даже при небольших добавках бериллия в цветные металлы или в стали их свойства значительно улучшаются. Например, сплав меди с 1...5 % бериллия (***бериллиевая бронза***) обладает прочностью на разрыв большей, чем многие легированные стали.

В отличие от чистого бериллия такой материал хорошо обрабатывается механическими способами, из него можно изготовить ленты толщиной 0,1 мм. Бериллиевая бронза используется для изготовления пружин, рессор, амортизаторов, подшипников, шестерен и других изделий, от которых требуется большая прочность, хорошая сопротивляемость усталости и коррозии, сохранение упругости в широком интервале температур.

Стали, легированные бериллием, обладают повышенными прочностью, коррозионной стойкостью и свариваемостью. По сравнению с другими сталями сталь, легированная бериллием, проявляет стойкость к воздействию морской воды, нефти, мазута и других видов углеводородного топлива. Подобные стали находят применение в судостроении и при изготовлении глубоководных аппаратов.

Содержащие бериллий сплавы используют в разных областях науки и техники, но больше всего в ядерной физике, авиации, ракетостроении, космических устройствах, машиностроении, медицине. Например, масса крыла самолета из бериллия меньше массы аналогичного крыла из стали на 60 %, а из титана на 30 %. Из бериллиевых сплавов изготовляют обтекатели самолетов, детали турбореактивных и турбовинтовых двигателей, передние кромки крыльев сверхзвуковых самолетов, лонжероны, тормозные диски колес и рули наведения. Использование данных сплавов для космических устройств обусловлено сочетанием высокой удельной прочности с большой удельной жесткостью. У бериллия жесткость в пределах упругих деформаций в 6 раз превышает жесткость других конструкционных материалов.

Улучшить свойства металлов можно как путем легирования бериллием на этапе получения сплава, так и поверхностным насыщением изделия бериллием по аналогии с цементацией. Технология несложная: стальную деталь помещают в бериллиевый порошок и выдерживают в нем при температуре 900...1 100 °С в течение 10...15 ч. В результате диффузии на поверхности стальной детали образуется слой толщиной 0,15...0,40 мм из соединения бериллия с железом и углеродом. Этот слой делает сталь жаростойкой, устойчивой к морской воде, азотной кислоте, кроме того, хорошо работающей на износ.

Используя бериллиевые волокна и синтетическую бумагу, можно изготовить новый композиционный материал — это специальная жаропрочная бумага (работает при воздействии температуры до 2 200 °С), которая не боится термических ударов (резкой смены температур), химически инертна и обладает высокими

тепло-, звуко- и электроизоляционными свойствами. С учетом указанных качеств ее применяют в космических кораблях, реактивных двигателях, газовых турбинах и ракетах.

Весьма ценным является керамический материал из оксида бериллия (***брокерит***, ***бромеллит***), обладающий одновременно высокими диэлектрическими и теплопроводными свойствами и в то же время довольно легкий — его плотность равна 2 957 кг/м^3, а теплопроводность составляет примерно 50 % теплопроводности меди.

Бериллий обладает высокой теплотворной способностью — при сгорании 1 кг бериллия выделяется 60 000 кДж теплоты, поэтому его используют в качестве добавки в ракетное топливо. Кроме металлического бериллия добавками служат соединения бериллия, например, гидрид бериллия и некоторые бериллийорганические вещества.

Наряду с достоинствами бериллий и его соединения имеют и недостатки, главным из которых является высокая токсичность (ядовитость). Особенно вредны мелкие частицы соединений бериллия, и чем выше их дисперсность (т.е. чем они мельче), тем они токсичнее. Уровень токсичности зависит от температуры спекания — оксид бериллия (бромеллит), спеченный при температуре 1 600 °С, менее вреден, чем тот же материал, но созданный при температуре 500 °С. Попав в живой организм, бериллий соединяется с костной и легочной тканями и разрушает их. Кроме того, он вызывает сильные воспалительные заболевания кожи — дерматиты. Предельные допустимые концентрации (ПДК) оксида бериллия в воздухе для работающих очень малы и составляют одну тысячную долю микрограмма на один кубический метр.

Магний с алюминием (до 11 %) и другими металлами (марганец до 2,5 %, цинк 2...3 %, медь 0,25 %, кремний 1,5 % и титан) образует **сверхлегкие сплавы**, изделия из которых для авиационной промышленности получают преимущественно обработкой давлением с подогревом до температуры 400...430 °С и литьем.

Магниевые сплавы закаливают и подвергают старению, но эффект термической обработки по сравнению с алюминиевыми сплавами меньше. От коррозии магниевые сплавы защищают оксидированием и покрытием лаками. Магниевые сплавы подразделяют на литейные и деформируемые. К ***литейным*** относятся сплавы МЛ2 (1...2 % марганца), МЛ6 (9,0...10,2 % алюминия, 0,6...1,2 % цинка, 0,15...0,50 % марганца и др.), к ***деформируемым*** — сплавы МА1 (1,3...2,5 % марганца), МА5 (7,8...9,2 % алюминия, 0,15...0,50 % марганца, 0,2...0,8 % цинка и др.).

Достоинством сплава МЛ2 является хорошая коррозионная стойкость и свариваемость, термической обработке он не подвергается. Литейные свойства этого сплава низкие, поэтому из него отливают бензобаки, бензомасляную арматуру и другие детали простой конфигурации. Сплав МЛ6 имеет хорошие литейные свойства, отливки из него получают литьем в землю, в кокиль и под давлением. Свариваемость сплава МЛ6 удовлетворительная, а коррозионная стойкость ниже по сравнению с другими сплавами. Из этого сплава изготовляют тяжелонагруженные детали двигателей, так как сплав имеет повышенный предел текучести. Литейные сплавы для проведения литья нагревают до температуры 700...800 °С, кристаллизация происходит в интервале температур 600...440 °С, линейная усадка при этом составляет в среднем 1,2...1,4 %.

Магниевые деформируемые сплавы изготовляют в виде листов, прутков, профилей, плит, поковок в термообработанном и необработанном виде. Фасонные отливки, как правило, отжигают, закаливают и старят.

Титан по распространенности в недрах занимает четвертое место после алюминия, железа и магния. Этот легкий металл (плотность 4 540 кг/м^3) плавится при температуре примерно 1 660 °С, легко образует соединения с кислородом, азотом, углеродом — оксиды, нитриды, карбиды, которые довольно твердые и тугоплавкие. Титан имеет высокие прочность и коррозионную стойкость. В виде добавок входит в состав многих металлических материалов, образует жаропрочные сплавы, а его карбиды являются одними из основных составляющих твердых сплавов. Этот металл хорошо обрабатывается резанием, при нагреве до 900 °С куется, а при температуре примерно 1 000 °С прессуется в прутки разных профилей и трубы, прокатывается в холодном состоянии, но быстро упрочняется и требует частых отжигов в вакууме (гелии), после которых становится пластичным. Сваривают титан аргонно-дуговой сваркой.

Промышленные **титановые сплавы** содержат, например, 8 % марганца, или по 4 % марганца и алюминия, или по 2 % железа, хрома и молибдена, или 3 % алюминия и 5 % хрома и др. Главными достоинствами титановых сплавов являются высокая жаростойкость, жаропрочность, коррозионная стойкость, значительное электрическое сопротивление и благоприятная удельная прочность. С учетом этого титановые сплавы используют в авиационной промышленности. Из титановых сплавов изготовляют детали обивки фюзеляжа, крыльев, хвостового оперения и др., в турбо-

реактивных двигателях — моторные рамы, диски и лопатки компрессоров, распорные кольца и другие детали. Поплавки гидросамолетов производят из титанового сплава, обладающего стойкостью в морской воде. Корпуса подводных лодок и глубоководных

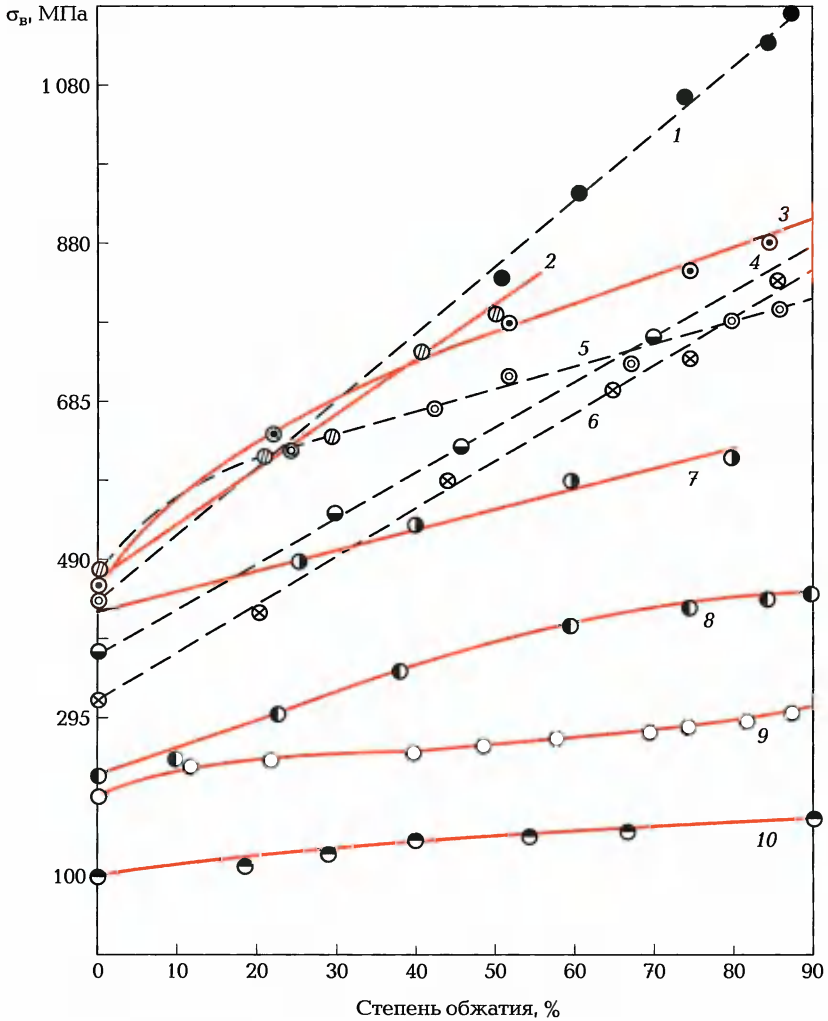


Рис. 3.1. Диаграмма изменения пределов прочности $\sigma_в$ цветных металлов и сплавов в зависимости от наклепа (степени обжатия):

1, *2* — алюминий и кольчугалюминий; *3*, *10* — медь и никель; *4*, *9* — никелины с разным содержанием компонентов; *5*, *7* — алюминиевая и фосфористая бронзы; *6* — константан; *8* — латуни

аппаратов выполняют из титановых сплавов, как и гребные винты, трубопроводы, насосы и др. Титан используют в химической (трубопроводы, резервуары для агрессивных сред), инструментальной (карбиды титана в твердых сплавах), электротехнической (сплавы с высоким электрическим сопротивлением), медицинской (внутренние протезы) и других отраслях промышленности.

Обрабатывать легкие конструкционные сплавы можно в горячем и холодном состоянии. По мере увеличения степени деформации при холодной обработке происходит постепенное повышение твердости и прочности металла. Для получения дальнейшей деформации требуется все большее усилие. При этом металл становится более прочным, менее пластичным, получает так называемый наклеп.

Наклеп и **нагартовка** (от нем. ***hart*** — твердый) — явления повышения твердости и прочности, равнозначно обозначающие повышение механических свойств металлов в результате их обработки давлением (штамповка, ковка, прокатка, волочение, выглаживание роликами, дробью и др.).

Изменения прочности цветных металлов в зависимости от наклепа приведены на рис. 3.1. Увеличение $\sigma_в$ при наклепе показано для алюминия и кольчугалюминия, меди и никеля, никелинов с разным содержанием компонентов, алюминиевой и фосфористой бронз, константана, латуни.

3.4. СВОЙСТВА ЛЕГИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Ознакомимся со свойствами важнейших элементов, широко используемых в машиностроении непосредственно в качестве компонентов сплавов и легирующих веществ в производстве чугунов, сталей и сплавов.

Алюминий — серебристо-белый металл, плавится при температуре 660 °С, имеет плотность 2 700 кг/м^3, легко прокатывается и куется при температуре 100...150 °С. На воздухе алюминий окисляется, и получаемый оксид в виде пленки защищает алюминиевое изделие от дальнейшего разрушения. Алюминий растворяется в соляной и серной кислотах и щелочах. Концентрированные, а также слабые растворы серной и азотной кислот на алюминий не действуют. С азотом и углеродом алюминий образует соответственно нитриды и карбиды.

В машиностроении применяют алюминий в виде сплавов, в чистом виде для электрических проводов и для других целей. Как конструкционный материал алюминий используется в строительстве, авиации, электротехнике, электронике (как композиционный материал служит матрицей). В качестве легирующего вещества алюминий вводят в сплавы с медью, магнием, титаном, железом и другими материалами. Оксид алюминия — ***корунд*** — используется как абразивный материал.

Смесь порошков металлического алюминия и оксида железа образует термитный материал, предназначенный для сварки (***алюминотермия***) крупногабаритных конструкций. Процессы восстановления в зоне сварки протекают при температурах до 3 000 °С. Такие же порошки используются как зажигательный материал для военных целей.

Бериллий — твердый блестящий белый металл, плавится при температуре 1 287 °С, имеет плотность 1 841 кг/м^3, хорошо куется, а при легировании сплавов способствует улучшению их механических свойств.

Бериллий обладает уникальным сочетанием технически важнейших свойств: он в 1,5 раза легче алюминия, а имеет прочность в 4 раза превосходящую прочность стали; отношение модуля упругости к плотности у бериллия наибольшое среди всех металлов; имеет очень высокую твердость (режет стекло) — по шкале Бринелля твердость равна 10^9 Н/м^2; жаростоек и коррозионно-стоек; имеет высокий модуль упругости. Бериллий со многими металлами — алюминием, никелем, железом, хромом, марганцем, молибденом и другими — образует легкие, прочные сплавы, используемые в авиационной, газовой, горнодобывающей промышленности, для целей ядерной физики и др.

Ванадий — серебристо-белый блестящий металл, плавится при температуре 1 929 °С, имеет плотность 6 110 кг/м^3, высокую твердость, устойчив к окислению на воздухе, однако растворяется в кислотах (серной, азотной, плавиковой и смеси кислот — царской водке). Ванадий применяется в производстве специальных и инструментальных сталей. Как легирующий элемент ванадий повышает износостойкость, вязкость сталей, увеличивает мелкозернистость, твердость и стойкость при высоких температурах, но в то же время увеличивает их хрупкость. Ванадий входит в состав титановых сплавов.

Вольфрам — тяжелый светло-серый металл с плотностью 19 300 кг/м^3, обладает большой твердостью, имеет наивысшую из всех металлов температуру плавления — 3 420 °С. Вольфрам пас-

сивен к окислению на воздухе, окисляется только при температуре красного каления, стоек к кислотам, в том числе к царской водке, растворяется в смеси азотной и плавиковой кислот. Вольфрам применяется для изготовления специальных сплавов, быстрорежущих сталей, нитей накаливания осветительных ламп, сохраняет твердость при повышенных температурах. Инструментальная сталь с содержанием вольфрама до 20 % способна самозакаливаться.

Вольфрам образует сплавы с добавками молибдена, меди, хрома, никеля, серебра, оксидов и карбидов. Основные достоинства этих сплавов — высокая стойкость при нагреве, малое испарение, низкий ТКЛР. Карбиды вольфрама имеют повышенную износостойкость. К недостаткам вольфрама относится низкая пластичность при комнатной температуре. Производство вольфрама и изделий из него, как правило, основано на методах порошковой металлургии. Благодаря свойствам вольфрама его используют в ядерной энергетике, космонавтике, электротехнике, электронике и других областях техники.

Железо — серебристо-белый металл, плавится при температуре 1 539 °С и имеет плотность 7 874 кг/м^3, легко окисляется на воздухе в присутствии влаги, щелочи на железо не действуют. Из всех металлов железо обладает ярко выраженными магнитными свойствами, хорошо сплавляется с углеродом, кремнием, фосфором, серой, кислородом, в машиностроении применяется в виде сплавов с углеродом и другими элементами — стали, чугуны и ферросплавы.

Добыча железосодержащих материалов примерно в 15 раз превосходит добычу всех остальных металлов вместе взятых. На долю промышленного потребления железа приходится примерно 93 % всей металлургической продукции. Железо и его сплавы принято называть черными металлами, а их производство — черной металлургией.

Железо пластично, хорошо куется и прокатывается, легко обрабатывается механическим способом. Свойства железа зависят от содержания примесей. Твердое железо способно растворять в себе углерод и другие элементы. При содержании в железе 6,67 мас.% углерода образуется карбид железа (цементит), который характеризуется сложной кристаллической решеткой, а также твердостью и хрупкостью, близкими к твердости и хрупкости алмаза.

Кадмий — белый металл с серебристым оттенком, плавится при температуре 321 °С, имеет плотность 8 650 кг/м^3. На воздухе кадмий не окисляется, с водой не реагирует, так как покрывается защитной оксидной пленкой. Кадмий медленно растворяется в

разбавленных серной и соляной кислотах. Применяют кадмий для изготовления легкоплавких и подшипниковых сплавов, припоев, защитных покрытий (***кадмирование***), в аккумуляторах, а также в ядерной энергетике. Сульфид кадмия используется в качестве краски, пигмента для стекла, керамики, фарфора; его соединения служат стабилизатором пластмасс. Кадмий сильно поглощает медленные нейтроны, поэтому кадмиевые стержни применяют в ядерных реакторах для регулирования скорости цепной реакции.

Все растворимые в воде и в разбавленных кислотах соединения кадмия ядовиты, особенно токсичными являются пары оксида кадмия, вдыхаемые с воздухом.

Кобальт — серебристо-белый металл с плотностью 8 900 кг/м^3, плавится при температуре 1 483 °С; он твердый, тягучий, похож на железо, обладает магнитными свойствами. Вода, воздух и щелочи на кобальт не действуют, а разбавленные кислоты его медленно растворяют. Кобальт входит в состав жаропрочных и жаростойких материалов, используется для изготовления постоянных магнитов (***альнико***, ***магнико***) и режущих инструментов, керметов, а также кислотоупорных и твердых сплавов. Соединения кобальта придают стеклу темно-синюю окраску, что используется для изготовления художественного стекла, мозаики.

Кремний — один из самых распространенных элементов в природе, в качестве свободного диоксида представляет собой обычный песок. Плавится кремний при температуре 1 417 °С, имеет плотность 2 330 кг/м^3. Свободный кремний встречается в двух модификациях: кристаллической и аморфной, растворяясь в ряде металлов (меди, железе, кальции, платине, висмуте и др.), образует с ними соединения (***силициды***).

Кремний нерастворим в кислотах, но хорошо растворим в щелочах. Карбид кремния (***карборунд***) по твердости приближается к алмазу и используется в качестве абразивного материала. Сплавы кремния с металлами образуют пружинные, кислотоупорные, трансформатные и другие стали, а насыщенные кремнием поверхности металла (процесс ***силицирования***) имеют повышенную жаростойкость до 800...850 °С. При выплавке кремний получают обычно в виде сплава с железом — ***ферросилиция***.

Кремнийорганические соединения (***силиконы***) используют в качестве смазок и изоляционного материала. Чистый кремний — это темно-серый кристаллический материал с металлическим блеском, имеет решетку типа алмаза, представляет собой полупроводник, свойства которого определяются введенными в него

примесями. Чистый кремний используется для изготовления полупроводниковых приборов и солнечных батарей.

Марганец — серебристый, блестящий, твердый, хрупкий металл, плавится при температуре 1 245 °С, имеет плотность 7 440 кг/м^3. На воздухе марганец покрывается оксидной пленкой, препятствующей дальнейшему окислению металла. Марганец входит в состав конструкционных и легированных сталей, повышает их прочность, твердость и прокаливаемость, но и увеличивает склонность к отпускной хрупкости. Используется марганец в составе латуней и бронз, алюмомарганцевых литейных и деформируемых сплавов, а также сплавов с высоким электрическим сопротивлением (***манганинов***). При добавке 12...14 % марганца в расплав получают высокоизносостойкий сплав.

Магний — очень легкий блестящий белый металл, плавится при температуре 651 °С, имеет плотность 1 740 кг/м^3, обладает ковкостью, при нагревании на воздухе сгорает с выделением большого количества теплоты (при этом образуется оксид); с водой марганец реагирует медленно, но растворяется в кислотах. В машиностроении марганец используется для изготовления легких сплавов, придавая высокие механические свойства сплавам с алюминием, марганцем, цинком. В металлургии стали марганец служит как присадка в ванну металла для удаления серы и кислорода из расплава; используется также в производстве титана. Смесь магниевого порошка с окислителями применяют для производства осветительных, зажигательных ракет и снарядов. Природные силикаты магния — ***асбест*** — используются как прекрасный теплоизолирующий и теплостойкий волокнистый материал.

Медь — вязкий пластичный металл, имеет плотность 8 920 кг/м^3, плавится при температуре 1 083 °С. На воздухе медь окисляется и приобретает более темный цвет, а в присутствии влаги покрывается зеленоватым налетом, при нагревании до 200...375 °С окисляется до черного цвета оксида меди. Медь широко используется в промышленности как в чистом виде, так и в виде многочисленных сплавов. Важнейшими сплавами меди являются латуни, бронзы, медно-никелевые материалы и дюралюмин. На производство указанных сплавов расходуется более 30 % всей добываемой меди. Электропромышленность потребляет 30...40 % выплавляемой меди для производства проводников, теплообменников, холодильников, деталей плазматронов и на другие цели. Медь образует много солей, которые все ядовиты. Поэтому медную посуду необходимо всегда лудить, чтобы предотвратить возможность образования токсичных солей.

Молибден — серебристо-белый металл, плавится при температуре 2 625 °С, имеет плотность 10 200 кг/м^3. При комнатной температуре молибден не окисляется на воздухе, а при нагревании превращается в триоксид молибдена белого цвета. Молибден растворяется в азотной или горячей концентрированной серной кислотах, другие кислоты при комнатной температуре на молибден не действуют.

Молибден используют для изготовления специальных и быстрорежущих сталей, металлокерамических сплавов (придает им твердость и прочность), а также нагревательных элементов термических установок. Кроме того, этот металл применяют как компонент жаропрочных сплавов для реактивных двигателей, кислотоупорных сплавов для химической промышленности. Дисульфид молибдена используется в качестве твердой смазки подшипников. Компактированный молибден получают, главным образом, методом порошковой металлургии, состоящим в прессовании порошка в штабик и последующем спекании. Молибден и вольфрам являются карбидообразующими элементами, повышающими твердость и прочность сталей при высоких температурах, увеличивают прокаливаемость сталей, придают им мелкозернистость, устраняют отпускную хрупкость.

Никель — блестящий белый металл с сероватым оттенком, плавится при температуре 1 453 °С, имеет плотность 8 900 кг/м^3, пластичен (легко куется и прокатывается), в чистом виде не окисляется на воздухе и не корродирует в воде. Кроме того, никель обладает магнитными свойствами. Его широко используют в качестве легирующего компонента для получения сталей и сплавов, обладающих прочностью, жаростойкостью, намагничиваемостью, высоким электрическим сопротивлением и термоЭДС.

Олово — серебристо-белый хрупкий металл, плавится при температуре 232 °С, имеет плотность 7 295 кг/м^3. Воздух и вода на олово не действуют, но оно растворяется в кислотах и щелочах. При длительном охлаждении олово меняет модификацию и, переходя в серое олово («оловянная болезнь»), превращается в порошок. Для восстановления свойств олова этот порошок необходимо переплавить. В промышленности олово используют для лужения жести, а также при производстве ряда сплавов — бронз, баббитов и припоев.

Сера — неметалл, плавится при температуре 119,3 °С, имеет плотность 1 960 ... 2 070 кг/м^3, в природе встречается в свободном состоянии, в соединениях с металлами (***сульфиды***), а также в виде соединений как производное серной кислоты (***сульфиты***).

Сера активно взаимодействует с галогенами (фтором, хлором, бромом, астатом, иодом), водородом, кислородом и многими металлами. Такие соединения серы, как сернистый газ и серный ангидрид, при взаимодействии с водой образуют сернистую и серную кислоты. Серу используют для вулканизации резины. Для металлов сера является вредной примесью: в чугунах сернистое железо понижает их жидкотекучесть, делая густыми; способствует образованию газовых раковин; повышает хрупкость чугуна; препятствуя выделению графита, отбеливает чугун; в сталях соединения серы легко плавятся (985 °С) и вызывают красноломкость материала (снижение ударной вязкости при температуре выше 727 °С).

Титан — металл со стальным блеском, плавится при температуре 1 665 °С, имеет плотность 4 500 кг/м^3, т. е. примерно в 1,7 раза тяжелее (плотнее) алюминия, но в 1,75 раза легче железа, примерно во столько же раз легче хрома и в 2 раза легче никеля. В обычных условиях титан устойчив к воздействию воздуха и воды. При высоких температурах титан становится активным, соединяется с кислородом, углеродом, серой, азотом, растворяется в соляной, серной и азотной кислотах.

Титан применяют для изготовления специальных сталей, твердых сплавов, высокоэлектропроводных бронз, сплавов для газотурбинных лопаток, корпусов подводных лодок и глубоководных аппаратов.

По сравнению с другими металлами титан более стоек в агрессивных средах, поэтому используется для изготовления трубопроводов, насосов, реакторов. Титан обладает способностью поглощать газы, что очень важно в вакуумной технике для получения глубокого вакуума. Диоксид титана служит пигментом в производстве эмалей, глазурей, красок, а также наполнителем и пигментом при производстве резиновых, пластмассовых изделий и бумаги.

Углерод — неметалл и один из самых распространенных элементов в природе, находящийся в составе органических и неорганических соединений. В свободном виде аллотропными формами углерода являются алмаз, графит, редко встречающийся в природе карбин, а также аморфный углерод — древесный уголь. Углерод присутствует во всех чугунах и сталях. Со многими элементами (хромом, марганцем, молибденом, вольфрамом, ванадием, титаном, железом) образует карбиды (входят в структуру легированных сталей), а с железом — цементит (структурная составляющая стали и чугуна).

Из графита изготовляют электроды, тигли, подшипники; соединения углерода используются для цементации, цианирования, борирования металлических изделий. Повышение содержания углерода в составе стали приводит к увеличению ее твердости, сопротивления пластической деформации и к понижению пластичности и свариваемости. Плотность технического углерода (сажи) находится в диапазоне 1 800...1 950 кг/м^3.

Фосфор — неметалл, встречающийся в природе в виде соединений — апатитов, фосфоритов. Чистый фосфор имеет три аллотропные модификации — белый, красный и черный фосфор. ***Белый фосфор*** — это кристаллическое вещество с плотностью 1 830 кг/м^3, температура плавления 44,14 °С, очень ядовит. ***Красный фосфор*** представляет собой аморфный порошок плотностью около 2 300 кг/м^3 с температурой плавления 593 °С, используется в спичечном производстве. ***Черный фосфор*** похож на графит, имеет плотность 2 700 кг/м^3, наименее активен. Самым активным является белый фосфор.

Фосфор обычно является вредной примесью стали (как и сера), и проведению операции его удаления уделяется большое внимание. Располагающиеся в межзеренном пространстве хрупкие прослойки, богатые фосфором, снижают пластические свойства металла, особенно при низких температурах (***хладноломкость*** стали). Содержание фосфора в углеродистых конструкционных сталях не должно превышать 0,035 %, а в высококачественной стали — 0,02 %. Однако в так называемых автоматных сталях содержание фосфора (и серы) повышено для обеспечения легкого схода стружки, малого разогрева инструмента. При повышенном содержании фосфора твердость стали увеличивается, сталь образует крупнозернистый излом и становится хладноломкой. Из этих сталей часто делают гайки. Фосфор входит в состав некоторых сплавов, например фосфористой бронзы.

В чугунах фосфор образует с углердом фосфористую эвтектику, которая твердая и хрупкая, делает чугун хладноломким, но значительно повышает его жидкотекучесть. Из фосфористых чугунов получают очень тонкие отливки с чистой поверхностью и малой усадкой, так как при затвердевании фосфористая эвтектика увеличивается в объеме.

Хром — серовато-белый блестящий, твердый металл, плавится при температуре 1 890°С, имеет плотность 7 190 кг/м^3, на воздухе не окисляется, является широко применяемым легирующим материалом. Разбавленная серная и соляная кислоты растворяют хром с выделением водорода. В холодной концентрированной азотной

кислоте хром нерастворим и после обработки в ней становится пассивным.

При введении хрома в состав стали ее прочность повышается при сохранении без изменения вязкости, прокаливаемости, сопротивления коррозии, кислотоупорности и жаропрочности. Хром используется для создания защитного покрытия металлических изделий от коррозии (процесс ***хромирования***). Из хромовых сталей изготовляют детали корпусов подводных лодок и химическую аппаратуру. Соли хрома используют в качестве красителей, окислителей, дубителей, но следует помнить, что все соли хромовых кислот ядовиты.

Цинк — белый металл с синеватым оттенком, плавится при температуре 419,5 °С, имеет плотность 7 130 кг/м^3. На воздухе цинк покрывается оксидной пленкой и теряет блеск, с водой не реагирует. Основное применение цинка в технике — ***оцинковывание*** мягкой листовой стали и проволоки для защиты их от коррозии. Кроме того, цинк широко используется как компонент сплавов с другими металлами — латуни, припои, подшипниковые сплавы и сплавы для литья под давлением.

Оксид цинка является пигментом для приготовления цинковых белил, обладающих хорошей кроющей способностью, а также как наполнитель резиновых изделий. Цинк нетоксичен.

3.5. МАТЕРИАЛЫ С УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

Материалы с высокими упругими свойствами широко используют в машиностроении для изготовления упругих элементов разных устройств — пружин и рессор. Эти элементы применяют для измерения сил в соответствующих приборах; устранения (выборки) зазоров при точных перемещениях; гашения энергии ударов в буферах и лифтовых устройствах, железнодорожных вагонах, локомотивах; накопления энергии в часовых механизмах; гашения вибрации в транспортных машинах; создания постоянных усилий сжатия или натяжения в передачах трения, тормозах, фрикционных муфтах, предохранительных устройствах и т.д.

Таким образом, работа упругих элементов заключается в накоплении энергии с последующей ее отдачей или в поддержании требуемого постоянного усилия.

Известно много конструкций пружин и рессор (рис. 3.2), работающих на растяжение, сжатие и кручение (рис. 3.2, *а*—*г*). Пре-

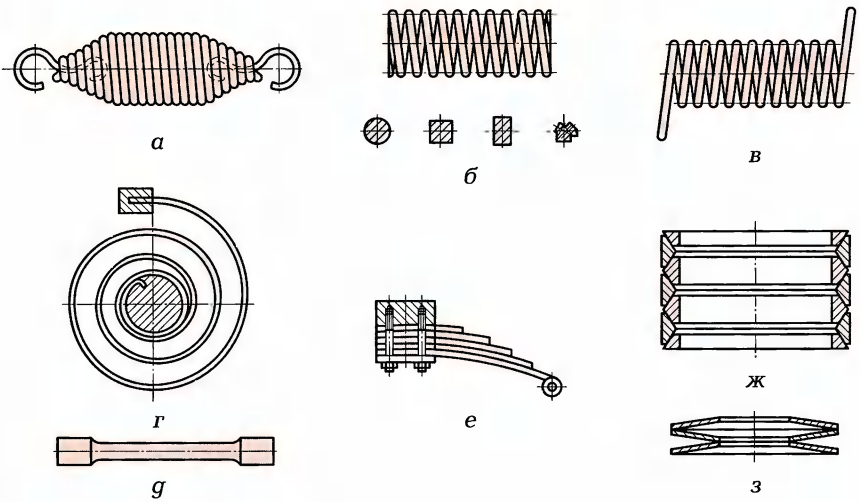


Рис. 3.2. Основные типы пружин и рессор:

а, б, в — витые цилиндрические пружины, работающие на растяжение, сжатие и кручение соответственно; *г* — плоская спиральная пружина кручения; *д* — торсионный вал; *е* — рессора; *ж* — кольцевая пружина; *з* — тарельчатая пружина

имущественное распространение получили пружины растяжения и сжатия цилиндрической формы, изготовленные, как правило, навивкой из проволоки круглого сечения. На кручение работают торсионные валы (рис. 3.2, *д*), используемые, например, в лодочных подвесных моторах для передачи вращающего момента от двигателя к гребному винту. Рессоры (рис. 3.2, *е*) в автомобилях работают на изгиб. В условиях больших нагрузок и малых упругих перемещений по оси используют тарельчатые пружины (рис. 3.2, *з*), а в качестве амортизаторов применяют кольцевые пружины (рис. 3.2, *ж*).

Пружины получают навивкой проволоки как в холодном, так и в горячем состоянии. ***Пружины холодной навивки***, как правило, изготовляют из термически обработанной проволоки и после навивки их подвергают только отпуску. ***Пружины горячей навивки*** из легированной стали в готовом виде подвергают закалке. Некоторые пружины (статического и ограниченного действия) «заневоливают», т. е. выдерживают в течение некоторого времени под нагрузкой рабочего знака, но выше предела упругости. В результате витки пружины получают остаточную деформацию, которая, складываясь с рабочей, повышает несущую способность пружины на

20...25 %. Обычно холодную навивку применяют для проволоки диаметром до 10 мм, а горячую — для проволоки свыше 10 мм.

Материалы для пружин должны обладать высокими стабильными во времени упругими свойствами. Такими свойствами в разной степени обладают высокоуглеродистые качественные, марганцовистые, кремнистые, хромованадиевые и другие стали. Например, стали 65, 70 используют для изготовления пружин с размером сечения витков до 15 мм. Из сталей 65Г, 60С2А изготовляют пружины с размером сечения витков до 20 мм, так как эти стали имеют лучшие механические свойства и хорошо прокаливаются. Для тяжелонагруженных пружин применяют сталь 50ХФА (ГОСТ 14959—68), обладающую высоким пределом выносливости и значительной теплостойкостью.

Пружины, предназначенные для работы в химически активной среде, изготовляют из разных видов бронз — бериллиевой (БрБ2), оловянной (БрОЦ4-3) (ГОСТ 18175—78 и ГОСТ 5017—74). В насосах перекачки кислот используют фторопласт для изготовления пружинящих элементов. Для защиты от коррозии пружины кадмируют, покрывают распыленным полиэтиленом.

Упругим элементом подвески транспортных средств, предназначенным для смягчения ударов на неровной дороге, является **рессора**, которая выдерживает рабочую нагрузку без остаточной деформации. Рессоры могут быть листовые, торсионные и винтовые.

Листовые рессоры имеют преимущественное применение в транспортных средствах. Для повышения гибкости их собирают из листов разной длины (см. рис. 3.2, *е*), что делает рессору брусом с равным сопротивлением изгибу. Для более плотного контакта между листами и более равномерного нагружения короткие листы изготовляют с большей начальной кривизной, чем длинные. Возникающее трение между листами работающей рессоры гасит образующиеся колебания. Обычно рессоры изготовляют из кремнистых, кремненикелевых и хромомарганцовистых сталей, подвергнутых для повышения усталостной прочности дробеструйной обработке.

Торсион — это пружина или гибкий вал, служащий для передачи вращающих моментов и работающий на кручение.

Упругие элементы изготовляют из неметаллических материалов — резины, полимеров, которые используют также для производства упругих баллонов. Рабочим телом в них может быть воздух (пневматические рессоры) или масло (гидравлические рессоры).

3.6. ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Износостойкость — это свойство материалов, деталей машин, работающих в условиях трения, противостоять изнашиванию. Данное свойство оценивается при эксплуатации или во время испытаний на стенде по длительности работы устройств до получения заданного износа, при котором изменяются размеры, форма, масса и состояние поверхности изделия вследствие разрушения верхнего слоя при трении. Износ зависит от условий трения и свойств трущихся материалов. Износостойкость можно повысить путем конструктивного усовершенствования, предусмотренной компенсацией износа и его равномерным распределением по трущимся поверхностям, а также улучшения условий эксплуатации — снижения трения при использовании более совершенных смазочных устройств и материалов, защиты от абразивного воздействия.

По механизму возникновения **износ** трущихся деталей классифицируют следующим образом:

- механический — результат попадания твердых посторонних частиц, являющихся по действию абразивом;
- молекулярно-механический — возникающий при «схватывании» трущихся деталей в результате налипания материала одной сопряженной детали на другую (процесс развивается по аналогии со сваркой трением). Такое явление возможно в тех случаях, когда выдавливается смазка (при высоких скоростях вращения и давлении), а также когда в рабочем контакте находятся незакаленные поверхности деталей или детали из однородных материалов;
- коррозионно-механический — результат истирания механическим путем коррозионного слоя (как следствие, у трущихся поверхностей нарушается характер взаимного соединения).

Разработаны специальные износостойкие стали. Например, марганцовистая сталь Г13, содержащая 1,0 ... 1,3 % углерода и 11 ... 14 % марганца, после закалки при температуре 1 100 °С имеет аустенитную структуру и, как следствие, большую способность к наклепу. Особенность такой стали состоит в том, что свою способность противостоять истиранию она приобретает только после образования поверхностного наклепа под воздействием давле-

ния и ударных нагрузок. Сталь Г13 плохо обрабатывается резанием, так как при прикосновении резца ее поверхность упрочняется. Поэтому изделия из этой стали (детали железнодорожных стрелок, щеки камнедробилок, зубья ковшей землеройных машин) изготовляют литьем с последующей обработкой абразивным кругом.

Для уменьшения износа, а следовательно, и повышения износостойкости деталей в машиностроении используются подшипники. Являясь опорами вращающихся валов или осей в разных устройствах, подшипники обеспечивают свободное вращение (или качение) валов или осей с действующими на них нагрузками. Реже подшипники используются для поддерживания устройств (шкивы, муфты, шестерни и др.), вращающихся вокруг валов и осей. По виду трения в опорах различают подшипники скольжения (трение скольжения) и качения (трение качения).

Подшипник скольжения в общем виде представляет собой втулку (рис. 3.3, *а*), в которой вращается шейка вала или ось на слое смазки. Эти подшипники воспринимают радиальную, осевую и редко радиально-осевую нагрузки. Для нормальной работы таких подшипников слой смазки должен быть оптимальным

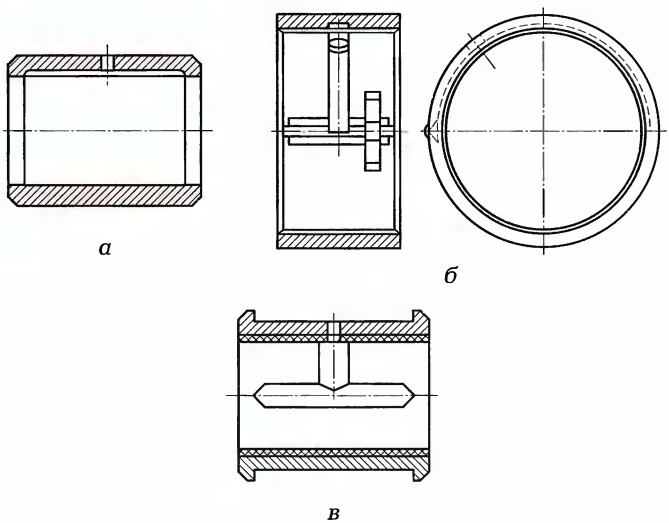


Рис. 3.3. Подшипники скольжения:

а — в виде втулки; *б* — разъемный подшипник-вкладыш; *в* — из двух половин с заливкой

и пополняться периодически или подаваться в зону трения непрерывно под давлением. По сравнению с подшипниками качения подшипники скольжения в машиностроении применяются меньше, но есть области техники, в которых их используют традиционно; это относится к разъемным подшипникам-вкладышам (рис. 3.3, *б*) коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания, опорам быстроходных точных приборов и опорам тихоходных устройств, подвергаемых большим ударным и вибрационным нагрузкам, а также к подшипникам из двух половин с заливкой (рис. 3.3, *в*), работающим в воде, агрессивных средах и загрязненной смазке.

По конструкции подшипники скольжения могут быть самыми разнообразными: цельными и разъемными, самоустанавливающимися и шарнирными, с постоянным и регулируемым зазором, со смазочной канавкой и без канавки, с предварительным закреплением антифрикционного слоя и с его заливкой в процессе сборки. В прецизионных устройствах (высокоточные станки) опорой валов может быть, например, сжатый воздух. Валы вращаются с частотой от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту и приводятся в действие электромагнитным устройством.

Учитывая, что работоспособность подшипников обеспечивает долговечность машин и механизмов, к материалам подшипников предъявляются повышенные требования в отношении ряда свойств: низкий коэффициент трения в системе материал подшипника — материал шейки вала — смазывающая среда; хорошая теплопроводность и низкий ТКЛР материалов; легкая прирабатываемость трущихся материалов и прочная адгезия (сцепление) смазывающей среды с ними; коррозионная стойкость и оптимальная структура антифрикционного слоя, состоящая из пластичной основы с твердыми опорными вкраплениями.

Материалы для подшипников скольжения подразделяют на следующие группы:

- металлические — баббиты; бронзы; сплавы на основе алюминия, цинка, свинца; чугуны;
- спеченные графитометаллические материалы;
- неметаллические — пластмассы, резины, пластики и др.

Металлические материалы, используемые для изготовления подшипников, — это прежде всего ***баббиты*** — антифрикционные сплавы на основе свинца, олова с добавками меди, сурьмы и др. Например, баббит марки СОС6-6 состоит из 88 % свинца,

6 % олова и 6 % сурьмы. Такой баббит имеет повышенное сопротивление усталости, обеспечивает малый износ шеек валов, так как не содержит твердых составляющих. Кальциевые баббиты (основа — свинец, в который добавлен кальций, натрий, магний, олово, алюминий) используют для изготовления подшипников дизелей и опор подвижного состава железных дорог, работающих при значительных нагрузках.

Свинцовые бронзы БрС-30 применяют для изготовления подшипников, работающих в условиях высоких скоростей, давлений и переменных нагрузок, а также в тех случаях, когда требуется повышенное сопротивление усталости. При этом необходимо, чтобы цапфы (шейки валов) имели высокую твердость, низкую шероховатость и были обеспечены высококачественной смазкой.

Кроме бронз для подшипников скольжения используют ***алюминиевые*** и ***цинковые сплавы***, не содержащие дефицитного олова. В тихоходных с умеренной нагрузкой машинах ставят антифрикционные чугуны, но они очень чувствительны к ударным нагрузкам и видам смазки.

В автомобильных двигателях распространение получили полиметаллические многослойные подшипники, имеющие стальную основу, слои свинцовой бронзы толщиной 0,25 мм (выполняют функции подушки с хорошей теплопроводностью и усталостной прочностью), тонкий слой никеля или сплава меди с цинком (препятствует диффузии олова в стальную основу) и поверхностный антифрикционный хорошо прирабатывающийся слой сплава олово — свинец толщиной 25 мкм.

Спеченные материалы — это комбинированные спеченные антифрикционные материалы, состоящие из металла и графита, которые получают методами порошковой металлургии. Наиболее известны железографит и бронзографит. ***Железографит*** содержит 95...98 % железа, 2...5 % графита и имеет пористость 15...30 %. ***Бронзографит*** — это композиция из бронзы (медь — основа, олово — 8,5...9,0 %) и частиц графита (1,5...3,0 %), равномерно распределенных между кристаллами металла. Поры этих материалов наполнены маслом, что позволяет изготавливать из них подшипники скольжения без применения принудительной смазки во многих случаях.

Неметаллические материалы, используемые для подшипников, — это пластмассы, твердые породы дерева (дуб, самшит, бокаут и др.), прессованная древесина (лигностон), резина и графит. Особенностью большинства неметаллических подшипниковых материалов является их низкая теплопроводность и поэтому

наиболее подходящей смазкой является вода (рабочая жидкость), одновременно служащая охлаждающей средой.

Подшипники из неметаллических материалов применяют в тех случаях, когда не может быть химического сродства с материалом вала, но должна быть хорошая прирабатываемость, когда образуются мягкие продукты износа, имеется возможность эффективной смазки водой или рабочей жидкостью (перекачиваемой погружным насосом).

Хорошо себя зарекомендовали подшипники с пористым бронзовым поверхностным слоем на стальной основе, пропитанные фторопластом-4 и свинцом, с добавками графита и двусернистого молибдена. Такие подшипники имеют высокие антифрикционные свойства, самосмазываемость и способны работать в широком диапазоне температур.

Хорошо работают ***текстолитовые*** подшипники и подшипники ***из прессованной древесины*** (рабочими являются торцовые поверхности). Их применяют в тяжелых машинах — шаровых мельницах, блюмингах и крупных сортовых прокатных станах горячей прокатки. Долговечность таких подшипников больше, чем бронзовых.

Капроновые подшипники имеют хорошие антифрикционные свойства, а скорость их изнашивания в 3—4 раза ниже бронзовых. Резиновые подшипники (подшипники Гудрича) успешно работают в качестве опоры гребного вала катеров, находящихся в воде и омываемых ей.

Графитовые подшипники со связкой, способствующей понижению коэффициента сухого трения до 0,04...0,05, сохраняют свои антифрикционные свойства в широком диапазоне температур (от −200 до +1 000 °С), имеют высокую теплопроводность и коррозионную стойкость. Поэтому их применяют в условиях затрудненной смазки или невозможности смазки.

Графит как низкофрикционный материал применяют в быстроходных устройствах с воздушной смазкой. Успешно работают графитовые подшипники, пропитанные свинцом.

К числу некоторых типов **подшипников качения** относятся радиальный шариковый (рис. 3.4, *а*); одинарный и двойной радиально-упорные (рис. 3.4, *б*, *в*); самоустанавливающийся сферический (рис. 3.4, *г*); одинарный упорный (рис. 3.4, *д*); конический и игольчатый роликовые (рис. 3.4, *е*, *ж*) подшипники.

Основными материалами для колец и тел качения подшипников качения служат специальные ***шарикоподшипниковые стали***, обозначаемые буквой «Ш». Например, сталь ШХ15, ШХ15СГ

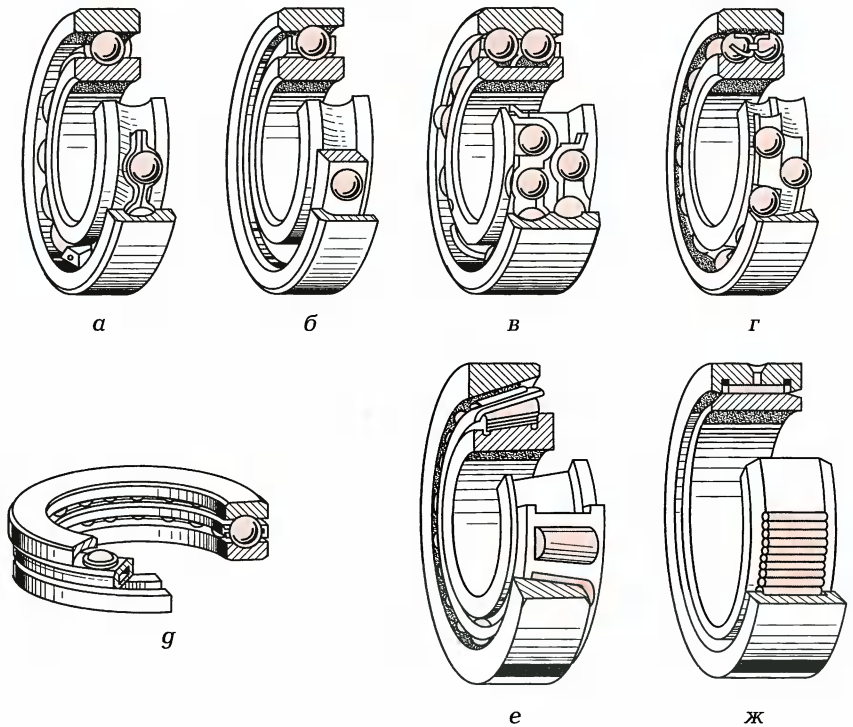


Рис. 3.4. Подшипники качения:

а — радиальный шариковый; *б*, *в* — одинарный и двойной радиально-упорные; *г* — самоустанавливающийся сферический; *д* — одинарный упорный; *е* — конический роликовый; *ж* — игольчатый роликовый

(ГОСТ 801—78) — это высокоуглеродистые хромистые стали, содержащие 1,0...1,1 % углерода, примерно 15 % хрома и добавки кремния и марганца (ШХ15СГ).

3.7. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ И СПОСОБЫ ИХ ЗАЩИТЫ

Несмотря на то что скорость самопроизвольного разрушения металлов за счет деградации (старения) механических свойств мала (до 100 мкм в год), ежегодно, по ориентировочным подсчетам, мировая потеря металла от коррозии составляет 20 млн т.

Причем более значительный вред техническому состоянию металлоконструкции наносит не естественная потеря металла, а то негативное воздействие, которое связано с разными видами коррозии. Затраты на ремонт (замену) деталей автомобилей, судов, аппаратуры химических производств во много раз превышают стоимость металла, из которого они сделаны. Существенны косвенные потери, вызванные утечкой нефти или газа из поврежденных коррозией трубопроводов. Поэтому борьба с разрушением металлов очень важна и требует больших материальных затрат.

Коррозия — это разрушение металлов под действием химических или электрохимических факторов. Процесс коррозии заключается в образовании оксидов металла и соответствующих химических соединений, которые затем нарушают сплошность структуры металла. Наиболее распространена ***атмосферная коррозия***, по мере развития которой создаются все условия для разрушения металлов. Наиболее сильному разрушению подвержены черные металлы — углеродистая сталь и чугун, тогда как цветные металлы и высоколегированные стали обладают достаточной коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и агрессивных средах.

Коррозия металла, как правило, развивается неравномерно, ее местный характер связан с тем, что металл имеет неоднородную структуру и различные включения (феррит, цементит), а также поверхностные дефекты — царапины, риски, разные среды (состав, электропроводность) и электродные потенциалы, возникающие при контакте металла с металлом. Электрический потенциал возникает в металле всякий раз, как только он попадает в жидкую электропроводную среду, т. е. в воду, в которой растворены соли, кислоты, щелочи. В результате перехода металла в раствор в виде ионов или адсорбции им ионов из раствора металл конструкции испытывает действие электрического потенциала. Величиной этого потенциала можно пользоваться для оценки взаимодействия двух металлов, находящихся в электропроводной среде, и определить направление химических реакций. При контакте двух разных металлов в этом случае за счет разности потенциалов образуется гальваническая пара, в которой металл с более отрицательным потенциалом растворяется и корродирует. Например, цинковое покрытие, имеющее больший отрицательный потенциал, чем железо, значительно лучше защищает его от разрушения, чем никелевое с более положительным потенциалом (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Нормальные потенциалы металлов

Металл	Нормальный потенциал, В	Металл	Нормальный потенциал, В
Натрий	–2,75	Хром	–0,71
Магний	–2,34	Железо	–0,44
Титан	–1,75	Кадмий	–0,40
Алюминий	–1,67	Никель	–0,25
Марганец	–1,05	Олово	–0,14
Цинк	–0,76	Медь	+0,52

Покрытия, имеющие по сравнению с металлом детали более отрицательный потенциал, называют ***анодными***, а более положительный — ***катодными***.

О характере разрушения (коррозии) металлов с анодными и катодными покрытиями можно судить по схеме развития коррозии (рис. 3.5), что важно учитывать при создании машин и любых металлических конструкций, работающих в агрессивных средах. Видно, что стальное изделие *4* (рис. 3.5, *а*) с цинковым покрытием *3* лучше противостоит коррозии, чем никелевое покрытие *5* (рис. 3.5, *б*) при воздействии влаги *2*.

Недопустим также контакт алюминиевых сплавов с нержавеющими и специальными сталями, а также с медными и никелевыми сплавами. Детали из магниевых сплавов не следует соединять

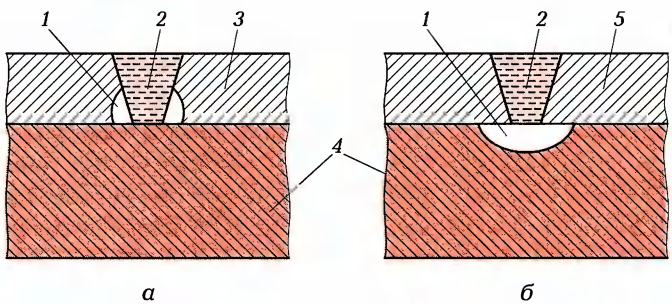


Рис. 3.5. Схема развития коррозии:

а — на анодном (цинковом) покрытии; *б* — на катодном (никелевом) покрытии; *1* — результат коррозии; *2* — влага; *3*, *5* — цинковое и никелевое покрытия; *4* — стальное изделие

со сталями, алюминиевыми, медными, никелевыми сплавами, а стальные детали — с медными и никелевыми сплавами.

Разные металлы и сплавы имеют неодинаковое сопротивление коррозии. Так, натрий, калий, литий совершенно коррозионно не устойчивы даже в обычных условиях и поэтому не пригодны для использования в технике. В то же время хром, никель, алюминий, молибден, кобальт и другие металлы довольно трудно корродируют. Железо, никель, магний, кадмий стойки против действия щелочей и разрушаются в кислотах, а цинк, алюминий и свинец не разрушаются в нейтральных средах, но подвержены воздействию кислот и щелочей.

Наиболее опасна местная коррозия, которая не всегда заметна и часто является причиной разрушения деталей еще и от механических нагрузок (***коррозионная усталость***). К тому же многие способы защиты изделий от коррозии пригодны для одних условий и не пригодны для других. В этой связи важно, прежде чем приступить к защите от коррозии, установить причину и условия ее возникновения, форму и размеры защищаемых изделий, а также экономическую целесообразность.

Основные способы защиты от коррозии следующие: получение коррозионно-стойких материалов; выращивание оксидных пленок на поверхности металлов; нанесение металлических покрытий; использование протекторов; применение неметаллических покрытий.

Создание коррозионно-стойких материалов осуществляется в процессе их производства введением специальных легирующих элементов (хрома, никеля, марганца и др.), которые повышают сопротивление металла разрушению.

Выращивание оксидных пленок широко используют в технике при изготовлении изделий из стали, алюминия и других материалов. При этом используют два основных способа — оксидирование (травление в сильных оксидных средах) и анодирование (анодная обработка в оксидных средах). При оксидировании поверхность углеродистых сталей покрывается слоем оксида железа толщиной 1...10 мкм темного (черного) цвета, защищающим металл в атмосферных условиях при низкой влажности. Воронить (оксидировать) сталь можно также нагреванием ее до темного цвета побежалости, при появлении которого его фиксируют охлаждением в масле.

Анодируют в основном алюминий и его сплавы путем образования оксидных пленок толщиной 5...25 мкм, которые защищают металл от коррозии, обладают электроизоляционными свойства-

ми и служат хорошим подслоем для лакокрасочных покрытий. Более высокую стойкость от коррозии дает пленка, полученная фосфатированием и состоящая из фосфата марганца и фосфата железа.

Нанесение металлических покрытий на защищаемый материал выполняется несколькими методами: погружением в расплав, гальваническим покрытием, диффузионным способом, плакированием (нанесение на один металл другого, как правило, в процессе прокатки).

Методом погружения металлических изделий в расплав цинка, олова, свинца или алюминия, как правило, защищают материалы, для которых температурные воздействия не имеют значения. Этот метод высокопроизводительный, но не позволяет получать равномерное заданной толщины покрытие по всему изделию. Гальванический метод защиты от коррозии металлов широко используют в технике, получая при этом мелкозернистые беспористые покрытия разными материалами толщиной 5...30 мкм, имеющие хорошую адгезию с поверхностью как сырых (незакаленных), так и закаленных изделий. Такие покрытия могут быть защитными, декоративными, восстановительными. Например, цинк, кадмий и никель служат защитными покрытиями, а никель, хром, серебро и золото — декоративными. Покрытие твердым хромом значительно повышает твердость и износостойкость деталей, работающих на истирание. Нарастив значительный слой хрома (до 500 мкм), восстанавливают изношенные рабочие поверхности изделий.

Диффузионный способ — способ поверхностного насыщения нагретых основных металлов цинком, алюминием или хромом, которые могут быть в твердой или газовой фазах. Алюминием покрывают стальные детали, работающие при высоких (до 1 100 °С) температурах. Кроме того, алитирование (алюминирование) уменьшает «схватывание» контактирующих изделий при их работе в вакууме, повышает износостойкость, защищает от коррозии в средах, содержащих серу, азот и углерод.

Плакирование заключается в совместном нагреве основного металла и используемого в качестве защитного, который накладывают на защищаемый, а затем одновременно прокатывают. В результате получают биметаллы и триметаллы. Так, железо можно защитить тонким слоем меди, коррозионно-стойкой стали, алюминия, которые повысят стойкость основного металла против коррозии. Этот метод используют не только как защитный. Например, в производстве полупроводниковых приборов никелевую ленту

плакируют полоской золота, к которой после изготовления из нее выводных рамок, присоединяют кристаллы и электродные выводы, получая при этом значительную экономию драгоценного металла.

Протекторы используют для защиты от разрушения металлических конструкций (корпуса судов, насосы, трубопроводы и др.), находящихся в воде. Защитным металлом, как правило, служит цинк, который, сам разрушаясь, сохраняет от коррозии основной металл (анодное разрушение).

Цинкование является самым распространенным и наиболее эффективным покрытием стальных изделий. Это объясняется тем, что цинк, обладая более отрицательным нормальным потенциалом, чем железо, в атмосферных условиях корродирует и разрушается раньше защищаемого металла. В данном случае анодом является цинковое покрытие, а катодом — например, листовая сталь.

Толщина цинкования зависит от условий эксплуатации и находится в интервале 3...30 мкм, а средняя скорость разрушения покрытия составляет 1,0...1,5 мкм в год.

Лужение (оловянирование) обеспечивает защитный слой, довольно стойкий к влажному воздуху, но в щелочах и кислотах он растворяется. По отношению к железу олово является катодным покрытием и поэтому защищает его только механически и то при отсутствии пор. Относительно меди и ее сплавов олово служит анодом и поэтому способно быть защитным покрытием. Толщина покрытия оловом определяется назначением и находится в интервале 1,5...8,0 мкм.

Кадмирование от цинкования отличается прежде всего повышенной стойкостью против воздействия атмосферы, насыщенной морскими испарениями, и собственно морской воды. Кроме того, кадмий более стоек в кислых растворах и нерастворим в щелочах. Толщина покрытия обычно составляет 9...45 мкм и определяется условиями эксплуатации.

Неметаллические покрытия (лаки, краски, эмали) — самые распространенные покрытия, предохраняющие изделия от атмосферных воздействий. Их действие основано на образовании пленки из органического вещества и пигмента, нанесенных на поверхность металла в виде одного или нескольких слоев, которые после высыхания образуют непрерывные защитные и декоративные покрытия.

Эмалевые покрытия — это стекловидные пленки, которые образуются в результате сплавления при высоких температурах не-

металлических порошков на основе диоксида кремния. Такие покрытия просты в употреблении и недороги, но недолговечны, так как под воздействием влаги и температуры они постепенно разрушаются.

К этому виду неметаллических покрытий относятся, например, напыленные на металл пластмассы (полиэтилен) или нанесенный слой суспензии фторопласта, подвергнутого термической обработке (30 мин при 90 °С, а затем 1 ч при 360 °С). Металл можно также гуммировать (покрывать резиной).

Кроме рассмотренных способов защиты широкое применение в производстве получило фосфатирование.

Фосфатирование — это процесс создания защитной пленки фосфата (не растворимых в воде фосфатных соединений) на поверхностях стали, чугуна под действием препарата «Мажеф». Свое название препарат получил по начальным буквам его компонентов — марганца, железа и фосфорной кислоты.

Фосфатирование является одним из самых простых, экономичных и надежных способов массовой защиты деталей из углеродистых и низколегированных марок стали и чугуна, а также цветных металлов — алюминия, цинка, магния и др. Толщина фосфатной пленки может быть в пределах от 7...8 до 40...50 мкм в зависимости от вида механической обработки изделия, способа подготовки к покрытию и режима фосфатирования.

Фосфатная пленка обладает следующими достоинствами: прочно сцепляется с металлом, образует пористую структуру, надежна как электроизолятор, не смачивается расплавленными металлами, коррозионно-стойка во всех видах горючих, смазочных и органических масел, в бензоле, толуоле и во всех газах, кроме сероводорода. Однако это покрытие нестойко в щелочах, кислотах, морской воде и водяном паре. Но этот недостаток может быть устранен, если фосфатное покрытие пропитать смазочными маслами или лаками.

Фосфатировать можно как химически, так и электролитически (с наложением электрического тока), получая при этом цвет пленки черный, светлый, темно-серый, бесцветный. Этим способом покрывают крепежные детали, пружины, шестерни, трубы для их протягивания и другие изделия машиностроения. Незначительная толщина фосфатной пленки практически не сказывается на изменении размеров покрытых деталей.

Доброкачественная фосфатная пленка в 8—10 раз повышает коррозионную стойкость лакокрасочных покрытий, нанесенных на фосфатный грунт.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы называют конструкционными?
2. Какие металлы называют сталями и чугунами?
3. На какие группы подразделяют стали и чугуны?
4. Что означает легированный металл?
5. Какие металлы называют бронзами и латунями?
6. Чем бронза отличается от латуни?
7. Какие металлы страдают «сезонной болезнью»?
8. Какие металлы называют легкими?
9. Как характеризуются алюминиевые и бериллиевые сплавы?
10. Что такое удельная прочность?
11. Для каких целей применяют алюминиевые, бериллиевые и магниевые сплавы?
12. Какие свойства придают стали сера и фосфор?
13. От чего изнашиваются металлические материалы?
14. Как можно защитить металл от коррозии?
15. Каково назначение пружин?

Глава 4

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. ПЛАСТМАССЫ

Пластмассы — это так называемые пластические массы, получаемые на основе природных и синтетических высокомолекулярных соединений (полимеров), которые способны под воздействием теплоты и давления принимать и сохранять заданную форму.

Пластмассы могут быть низкомолекулярными — мономеры и высокомолекулярными — полимеры. В промышленности нашли широкое применение синтетические полимеры, с которыми ознакомимся более подробно.

Полимеры — это соединения, в молекулах которых одинаковые звенья повторяются многократно и сходны по своему составу и строению с мономерами. Молекулы полимеров имеют очень большие размеры (макромолекулы), в их составе могут быть от нескольких десятков до нескольких десятков тысяч химически соединенных звеньев (рис. 4.1).

Строение молекул полимеров может быть линейным (рис. 4.1, *а*), разветвленным (рис. 4.1, *б*), сетчатым (рис. 4.1, *в*) и пространственным (трехмерным) (рис. 4.1, *г*). В зависимости от упаковки молекул полимеры могут одновременно иметь и кристаллическое, и аморфное строение, что и определяет их свойства.

В отличие от металлов кристалличность полимеров — это упорядоченное (параллельное) расположение звеньев и цепей, которое может достигать 90 % и изменяться в зависимости от изменения скоростей охлаждения и вытяжки. Полимеры с кристаллической структурой имеют повышенную жесткость, прочность, теплостойкость. Прочность полимера после растяжения вдоль осей молекул увеличивается в десятки раз по сравнению с первоначальной. Природными полимерами являются стекла, янтарь, канифоль, влажная глина и др.

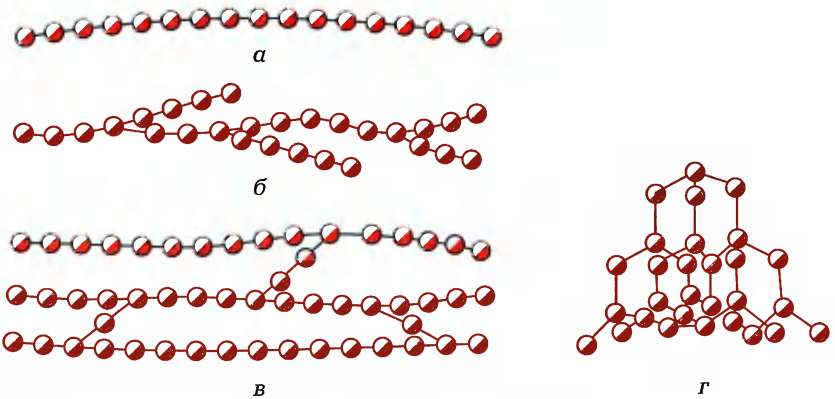


Рис. 4.1. Схема строения макромолекул полимеров:

а, *б*, *в*, *г* — молекулы соответственно линейного, разветвленного, сетчатого и пространственного (трехмерного) строения

Синтетические полимеры получают двумя основными способами: полимеризацией и поликонденсацией. ***Полимеризация*** — химический процесс, в результате которого из мономера при раскрытии кратных связей образуется высокомолекулярное соединение — полимер (рис. 4.2, *а*) без выделения побочных продуктов.

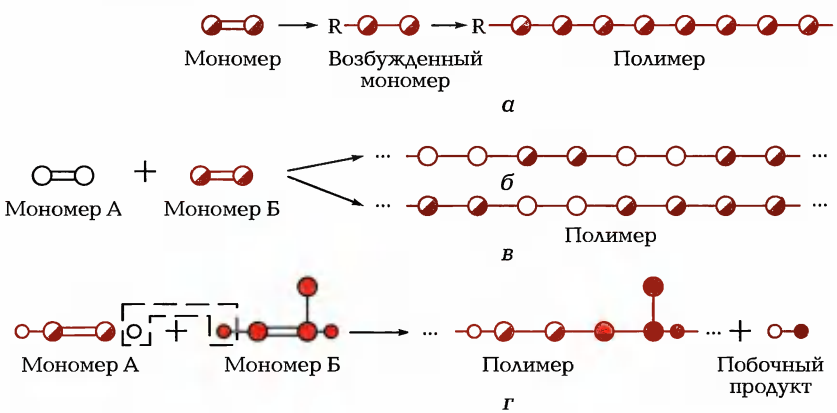


Рис. 4.2. Схемы реакций:

а — полимеризации; *б* — сополимеризации с регулярным строением; *в* — то же, с беспорядочным строением; *г* — поликонденсации; R — радикал инициатора

Радикалом (R) инициатора являются частицы с неспаренными электронами на их внешних оболочках, способствующие интенсификации полимеризации. Полимерное образование из двух различных способных к индивидуальной полимеризации мономеров А и Б (рис. 4.2, *б*, *в*) называют ***сополимеризацией***. Так, при сополимеризации стирола (индивидуально полимеризуется в полистирол) с эфиром метакриловой кислоты (индивидуально полимеризуется в полиметакрилат — органическое стекло) или хлористого винила с винилацетатом образуются материалы с другими свойствами.

Сополимеризация может быть двух видов: с регулярным (см. рис. 4.2, *б*) и беспорядочным (см. рис. 4.2, *в*) строением.

При взаимодействии мономера с полимером образуются так называемые привитые сополимеры, а при взаимодействии разных полимеров — блок-сополимеры.

Поликонденсация — химический процесс, в результате которого вступившие в реакцию мономеры А и Б (рис. 4.2, *г*) вследствие необратимого взаимодействия образуют высокомолекулярные вещества с выделением побочных продуктов. Получение полимеров осуществляется при определенном режиме (температуре, давлении), а также с применением катализаторов, растворителей, инициаторов R и др., обеспечивающих необратимый рост молекул высокомолекулярных соединений.

Посредством полимеризации и поликонденсации производят более тысячи разных полимеров, однако применение в технике находят пока несколько десятков из них. На их основе созданы сотни пластмасс разных марок и назначений.

Полимерные соединения и соответствующие им **пластмассы** подразделяют на термореактивные и термопластичные.

Термореактивные пластмассы после первого нагрева образуют неплавкие продукты, поэтому их называют также необратимыми. ***Термопластичные пластмассы*** способны многократно плавиться при нагревании, поэтому их называют также обратимыми. К термореактивным относят эпоксидные и кремнийорганические пластмассы, а к термопластичным — полистирол, полиэтилен, капрон, винипласт и др.

Пластмассы все шире внедряются в быт и технику, так как по многим свойствам превосходят традиционные материалы (металлы, древесину, стекла и др.). Отметим основные достоинства пластмасс: доступность сырья, которым может служить уголь, нефть, известь, воздух и др.; неисчерпаемость запасов указанного сырья; простота переработки пластмассы известными способа-

ми формообразования: литьем под давлением, штамповкой, прессованием, экструзией, каландрированием и т. д. (все эти способы делают производство изделий высокопроизводительным и дешевым); низкая стоимость изготовления пресс-форм (трудоемкость самых сложных деталей определяется стоимостью изготовления пресс-форм и она низка по сравнению со стоимостью производства подобных изделий механическим способом). Следует также отметить, что коэффициент использования пластмассы составляет 0,95...0,98, металлов при литье — 0,6...0,8, а при механической обработке резанием всего лишь 0,2...0,6.

Внешний вид пластмассовых изделий задается качеством изготовления оснастки (пресс-форм) и цветом исходного материала, который корректируется добавляемыми пигментами. Как правило, изделия получаются блестящими, гладкими, твердыми и дополнительной обработки не требуют кроме удаления следов от литников.

Пластмассы имеют самые разнообразные физико-механические свойства и способны в отдельных случаях заменить металлы, дерево, резину и другие материалы. В среднем пластмассы в 2 раза легче алюминия, в 5—7 раз легче стали, меди, свинца и т. д. Ультралегкими и в то же время плохими проводниками теплоты являются пено- и поропласты. По механическим свойствам пластмассы уступают металлам, но по условному показателю (отношению предела прочности к плотности) пластмассы превосходят лучшие марки сталей.

Специальное испытание на механическую прочность пластмасс называется ***прочностью при ударном изгибе***. Испытывают образцы стандартных размеров с предварительным надрезом и без надреза на приборе — маятниковом копре. По результатам испытаний, показатель прочности на образцах с надрезом у ненаполненных пластмасс в 8—12 раз меньше, чем на образцах без надреза (полистирол, винипласт, полиамиды). У целлулоида и пластмасс с порошковым наполнителем (фенопласты, аминопласты) этот показатель в 3—4 раза меньше. Пластмассы с волокнистым и слоистым наполнителем (текстолит, гетинакс, изделия из пресспорошков) имеют одинаковые показатели.

Пластмассы довольно коррозионно-стойки в отличие от металлов и противостоят не только атмосферным воздействиям, но и разным кислотам, щелочам, солям, растворителям. Особенно стойкими к воздействию многих химических веществ являются фторопласт-3 и фторопласт-4, относительно стойкими считаются полиэтилен низкого (НД) и высокого (ВД) давления.

Пластмассы характеризуются высокими оптическими свойствами. Например, органическое стекло пропускает примерно 73 % УФ-излучения, а обычное силикатное стекло — всего 1...3 %. Кроме того, полистирол, поликарбонат, органическое стекло пропускают лучи света в широком диапазоне волн, они бесцветны, прозрачны и механически достаточно прочны, поэтому нашли широкое применение в машиностроении и в оптике.

По электрическим свойствам пластмассы относятся к плохим проводникам электрического тока, т. е. являются диэлектриками (изоляторами), хорошо работают в высокочастотных устройствах, а с учетом их физико-механических качеств просто незаменимы в радиотехнике, устройствах связи, генераторах токов высокой частоты и др.

Теплопроводность пластмасс в 500—600 раз ниже теплопроводности металлов. Пенопласты примерно в 10 раз менее теплопроводны по сравнению с монолитными отливками из тех же пластмасс и поэтому нашли применение в промышленности как теплоизоляторы. Для повышения теплопроводности в пластмассы добавляют теплопроводящие наполнители (графит, металлические порошки).

Теплостойкость пластмасс различна. Большинство их удовлетворительно работают в интервале температур от –60 до +80 °С (термопласты) или +120 °С (реактопласты). Рабочие температуры пластмасс на кремнийорганической основе значительно выше — до 200 °С и более. Наибольшую морозоустойчивость имеет фторопласт-4 — до –269 °С. Такие материалы, как винипласт и полипропилен, при температуре ниже –20 °С становятся хрупкими.

Пластмассы органического происхождения горючи, но имеют разную температуру воспламенения и интенсивность горения. Из термореактивных пластмасс, например, фенопласты не плавятся, загораются с трудом, а термопластичные полиэтилены высокого и низкого давления горят синеватым светящимся пламенем с оплавлением и подтеканием полимера (при этом запах напоминает запах горящей парафиновой свечи). Многие пластмассы характеризуются низкими значениями коэффициента трения и износа, а потому, например, текстолит, древесно-слоистые пластики и капрон применяют в подшипниках скольжения. Пластмассы можно подразделить на полимеры с фрикционными и антифрикционными свойствами. У ***фрикционных пластмасс*** (фенопластов с асбестовым наполнителем) коэффициент трения 0,3...0,8 и при этом изнашивание трущихся поверхностей незначительно. Пластмассы с большим коэффициентом трения используются в тормозных ус-

тройствах. У ***антифрикционных пластмасс*** (фторопластов, полиамидов, полиформальдегида) коэффициент трения 0,14 без смазки и 0,01 при смазке маслом или водой. Пластмассы хорошо противостоят изнашиванию (например, линолеум на основе поливинилхлоридной смолы), а износостойкость капрона выше в 10—20 раз износостойкости бронзы и баббита при смазке и в 100—160 раз при сухом трении.

Наиболее эффективный антифрикционный материал — металлофторопласт — представляет собой стальную ленту толщиной 1,2...2,5 мм с покрытием, состоящим из фторопласта и пленки дисульфида молибдена толщиной 0,02 мм. Методом гиба из таких лент делают втулки — подшипники скольжения.

Кроме пластмасс в технике широко используют разные **синтетические смолы и компаунды**.

Эпоксидные смолы — полимеры, получаемые поликонденсацией эпи- или дихлоргидрина и двух- или полиатомных фенолов в щелочной среде. При добавке аминов (полиэтиленполиамина) в эпоксидную смолу она отверждается при комнатной температуре. Эпоксидные смолы используют в качестве клеев холодного и горячего отверждения для склеивания многих материалов. На их основе изготовляют заливочные компаунды, пресс-материалы и др.

Кремнийорганические смолы — полимеры, получаемые поликонденсацией акрилхлорсиланов. Обычно эти смолы находятся в жидком состоянии, т.е. в стадии резола; при нагревании до 150...260 °С кремнийорганическая смола переходит в стадию резита, т.е. находится в твердом неплавком и нерастворимом состоянии. Кремнийорганические смолы применяют в качестве высокотермостойких электроизоляционных лаков, водоотталкивающих покрытий и для производства пресс-материалов, перерабатываемых литьевым прессованием в изделия высокой термостойкости (250...350 °С).

Фенолформальдегидные смолы — синтетические полимеры, получаемые поликонденсацией фенола или его производных (крезола, ксилола) с формальдегидом в присутствии кислых или щелочных катализаторов. Разновидностью фенолформальдегидной смолы является новолачная фенолформальдегидная смола, используемая для приготовления пресс-порошков, клеев, лаков и др.

Пластмассы и компаунды представляют собой сложные композиции, состоящие из основного материала — полимерного соединения (смолы) и добавок (наполнителя, отвердителя, пластификатора, катализатора и пр.). Пластмассы называют по типу ос-

новного материала (полимера), например эпоксидные, кремнийорганические, фенольные и т. д. Наиболее широкое применение в качестве герметика в производстве нашли эпоксидные пластмассы, перспективными считаются кремнийорганические как обладающие высокой термостойкостью.

В заключение рассмотрим свойства и применение в производстве некоторых известных **пластмассовых изделий**.

Плексиглас — твердый продукт полимеризации метилметакрилата, обладающий плотностью 1 190 кг/м^3 и светопрозрачностью более 91 %, растворяется в ацетоне, дихлорэтане, бензоле, горюч, но устойчив к действию воды, водных растворов щелочей, неорганических кислот, бензина и масел. Этот материал легко обрабатывается режущим инструментом, хорошо склеивается и сваривается, в виде листов и блоков широко используется в разных отраслях промышленности.

Органическое стекло — техническое название оптически прозрачных материалов на основе полиметилметакрилата, полистирола, поликарбонатов. Производимое из него трехслойное безосколочное стекло используется как конструкционный материал в авиационной, автомобильной и судостроительной промышленности.

Текстолит — слоистый пластик из природного волокна (хлопкового) и полимерного связующего (фенолформальдегидной смолы) плотностью 1 300 ... 1 450 кг/м^3. Вырабатывается текстолит в виде листов, стержней, труб и используется в промышленности для изготовления зубчатых колес, шкивов, втулок, вкладышей подшипников, электротехнических деталей.

Гетинакс — слоистый пластик на основе бумаги и термореактивного связующего (фенолформальдегидной смолы), является диэлектриком, его плотность 1 200 ... 1 400 кг/м^3. Выпускается гетинакс промышленностью в виде листов и цилиндрических заготовок, может быть покрыт слоем медной фольги (фольгированный гетинакс) или слоем стеклоткани (стеклогетинакс). Применяется для изготовления радио-, теледеталей и аппаратуры связи, а также как декоративный материал для облицовки.

Фенопласты — полимеры на основе фенолформальдегидных смол. Такие материалы прочны, негорючи, коррозионно-стойки, хорошие диэлектрики, сохраняют свои свойства до 200 °С. В виде пресс-порошков, слоистых пластиков, стеклопластиков и пенопластиков фенопласты используются в машиностроении для изготовления зубчатых колес, вкладышей подшипников, втулок; в автомобилестроении их применяют для производства деталей зажига-

ния, декоративных изделий; в химическом машиностроении — это трубы, насосы и др.

Полистирол — твердый продукт полимеризации стирола плотностью 1 050 кг/м^3, обладает низкими значениями прочности и теплостойкости, хороший диэлектрик, стоек в воде, разбавленных растворах кислот и щелочей, дешев и поэтому используется в промышленности для производства пенопластов, корпусов радио- и телеаппаратуры. Из-за значительной хрупкости полистирол в производстве изделий разного бытового назначения чаще заменяют ударопрочным полистиролом, являющимся сополимером стирола с бутадиеновым каучуком.

Винипласт — твердый продукт поляризации винилхлорида, получаемый при введении в него до 10 % пластификатора. Такой материал устойчив к влаге, кислотам, растворам щелочей и солей, нефтяным углеводородам. Используется винипласт для изготовления антикоррозионных труб, листов, пленок, для футеровки гальванических ванн. Разновидностью винилхлорида является пластикат, содержащий до 100 % пластификатора. Этот материал эластичен, морозостоек, используется для производства гибких листов, фасонных изделий, изоляции кабелей.

Фторопласт-3 — твердый продукт полимеризации трифторхлорэтилена, имеющий плотность 2 090...2 160 кг/м^3 и плавящийся при температуре 210...215 °С. При комнатной температуре химически стоек к органическим растворителям, устойчив против действия кислот, окислителей и растворов щелочей, при температуре 130...150 °С растворяется в некоторых ароматических углеводородах. Применяется фторопласт-3 главным образом для антикоррозионных покрытий труб, насосов и изоляции электрических устройств.

Фторопласт-4 — твердый продукт полимеризации тетрафторэтилена, имеющий плотность 2 130...2 240 кг/м^3. Этот материал абсолютно химически стоек, эластичен, хладотекуч, хороший диэлектрик, разлагается при температуре 415 °С, не горюч, не поглощает воду. Предварительно отформованные изделия из фторопласта-4 спекают при 360...380 °С. Используется этот материал в электротехнической, радиотехнической и химической промышленности для изготовления труб, оболочек, кабелей. Его применяют также как антифрикционный материал.

Полиэтилен — твердый продукт полимеризации этилена, имеющий плотность 913...978 кг/м^2 и плавящийся при 102...137 °С. Этот материал обладает многими положительными свойствами — прочен при растяжении, эластичен, хороший диэлектрик, устой-

чив против действия растворов щелочей, соляной, плавиковой и органических кислот, а также радиоактивного излучения. Полиэтилен физиологически безвреден, разрушается хлором и фтором, при температуре выше 80 °С растворяется в углеводородах. В промышленности он широко используется для изготовления пленок, емкостей, труб для агрессивных жидкостей, а также в качестве изоляции.

4.2. ТЕХНИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА

Техническая керамика — это материал, полученный спеканием разных оксидов и неорганических соединений. Керамика нашла широкое применение в атомной, электровакуумной, электротехнической, электронной, радиотехнической промышленности и в других видах производств. Из всего многообразия керамических материалов ознакомимся более подробно только с корундовой (ВК94-1, ВК91-2) и бромеллитовой (ВБ100-1) керамикой, широко используемой для технических целей. При маркировке керамики первая буква указывает класс керамики (В — вакуумная), вторая — вид основного минерала (К — корунд, Б — бромеллит), числа, округленные до целого, соответствуют номинальному содержанию основных компонентов (94 и 91 % корунда, 99,5 % бромеллита), а последнее число после дефиса — номер разработки.

Корундовая керамика ВК94-1 состоит из 94,40 % корунда (оксида алюминия, глинозема), 2,76 % диоксида кремния, 0,49 % оксида хрома и 2,35 % диоксида марганца. Из корундовой керамики изготовляют литьем изоляторы различной конфигурации, технологическую оснастку и другие изделия. После спекания детали приобретают присущие данной керамике физико-механические свойства и приобретают цвет — розовый или сиреневый.

Корундовая керамика ВК94-1 обладает рядом преимуществ по сравнению с лучшими сортами стекла и другими видами керамики и отличается высокими механической прочностью и вакуумной плотностью, термической и химической стойкостью, малыми электрическими потерями в широком диапазоне частот и температур, большим интервалом температуры спекания, устойчивостью структуры. Кроме того, корундовая керамика не токсична, она состоит из трех фаз: кристаллической (кристаллов основного тугоплавкого компонента — корунда Al_2O_3, образующего прочный каркас); стекловидной (стеклофаза — раствор корунда в ми-

нерализаторе — компоненте, регулирующем спекание MnO_2—SiO_2—Cr_2O_3); газообразной (небольшого содержания (менее 0,02 %) пор). В окончательно обожженном состоянии корундовая керамика представляет собой плотно спеченный кристаллический каркас с равномерно распределенной по всему объему стеклофазой.

Кроме корундовой керамики ВК94-1 в производстве довольно широко используют корундовую керамику ВК91-2, которая состоит из 91,5 % глинозема (корунда), 5,9 % диоксида кремния, 0,5 % оксида магния, 1,2 % оксида кальция и 0,9 % диоксида циркония. Керамика ВК91-2 имеет примерно такие же диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь, как керамика ВК94-1, но меньшие значения удельного объемного электрического сопротивления (в 1 000 раз) и электрической прочности (в 5 раз).

Бромеллитовая, или ***бериллиевая***, ***керамика*** (бромеллит) представляет собой спеченный оксид бериллия BeO и используется для изготовления изоляторов, подложек и других деталей приборов. Эта керамика обладает уникальным комплексом тепловых, электрических, химических и механических свойств и поэтому все шире применяется в разных областях техники. В производстве приборов бромеллитовая керамика нашла применение благодаря чрезвычайно высокой теплопроводности и хорошим электроизоляционным свойствам.

Теплопроводность бромеллитовой керамики при 20 °С составляет $(1{,}67 \ldots 2{,}52) \cdot 10^2$ Вт/(м·К), что в 7 раз выше теплопроводности корундовой керамики и соответствует уровню теплопроводности стали, алюминия и свинца. С повышением температуры теплопроводность бромеллита резко снижается, оставаясь тем не менее более высокой, чем теплопроводность других керамических материалов и некоторых металлов. Так, при температуре 100 °С теплопроводность бромеллитовой керамики в 2 раза меньше теплопроводности меди, но в 120 раз больше теплопроводности корундовой керамики и приближается к теплопроводности алюминия высокой чистоты. При температуре 1 000 ... 1 500 °С теплопроводность бромеллитовой керамики в 3—8 раз выше теплопроводности корундовой. Кроме того, теплопроводность бромеллита зависит от количества примесей и увеличивается с их уменьшением и, наоборот, уменьшается при увеличении количества примесей. С уменьшением плотности теплопроводность бромеллитовой керамики снижается и при пористости 25,5 % достигает уровня примерно 26,5 % теплопроводности при нулевой пористости. Та-

ким образом, бромеллитовая керамика является отличным проводником теплоты.

Удельная теплоемкость бромеллита при комнатной температуре составляет $1{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), что значительно выше удельной теплоемкости корунда и всех металлов (кроме бериллия). При повышении температуры удельная теплоемкость бромеллита резко падает. Обладая наиболее высокой теплоемкостью среди всех других видов керамики, бромеллит представляет собой отличный поглотитель теплоты.

Бромеллитовая керамика имеет высокую термическую стойкость, обусловленную уникальной теплопроводностью. Температура плавления бромеллита составляет 2 650 °С, а максимальная рабочая температура находится в диапазоне 1 500...2 316 °С. Эта керамика хорошо работает при термоциклировании. При повышении температуры ТКЛР бромеллита увеличивается и, например, для интервала температур 25...600 °С составляет $0{,}6 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$.

Термостойкость и ТКЛР бромеллита также являются важнейшими параметрами, принимаемыми во внимание. Высокая термостойкость бромеллита обеспечивает необходимую климатическую надежность во всем интервале рабочих температур.

4.3. СТЕКЛА

Стекло широко используют в технике, так как оно легко может изменять свой состав при введении разных компонентов, а следовательно, и свойства, и форму изделий благодаря изменению термического режима обработки. Стекло применяют в оптике, химии, медицине, бытовой технике, строительстве, электровакуумном, электронном и других производствах, получая при этом самые разнообразные изделия.

Обычное (неорганическое) стекло — это прозрачный хрупкий материал, полученный в процессе остывания расплава, содержащего стеклообразующие компоненты — оксиды кремния, бора, алюминия, фосфора, циркония, титана и др., а также оксиды металлов — лития, калия, натрия, кальция, магния, свинца и др. По типу стеклообразующего компонента различают стекла силикатные (оксид кремния), боратные (оксид бора), боросиликатные, алюмосиликатные и т. п.

Стекло — аморфное тело, которое при нагревании размягчается, постепенно переходя в жидкое состояние, а при охлаждении

затвердевает, также постепенно переходя в стеклообразное состояние.

Стекло бытового назначения, из которого изготовляют оконные пакеты, а также стеклянную посуду (стаканы, бутылки и др.), состоит из силикатов натрия и кальция, сплавленных с диоксидом кремния.

Известно ***кварцевое стекло***, получаемое непосредственно из расплава кварца в электрических печах. От обычного оно отличается тем, что может работать при более высоких температурах, пропускает УФ-лучи, его ТКЛР очень мал и почти не изменяется, благодаря чему стекло сохраняет свою целостность при термическом ударе — раскаленное кварцевое стекло при погружении в холодную воду не растрескивается. Размягчается кварцевое стекло при температуре 1 700 °С. К его недостаткам относятся трудность обработки и хрупкость. Несмотря на это, кварцевое стекло используют для изготовления ртутных ламп, излучающих много УФ-лучей, медицинской и химической посуды. Спектрально-чистое кварцевое стекло используют для изготовления рабочих каналов диффузионных термических установок, где оно длительно работает при температуре 1 300 °С.

Стекло (стекломассу) варят в футерованных огнеупорными материалами электрических печах разного типа, в их числе горшковые, ванные, непрерывного и периодического действия. Горшковые печи емкостью 100...1 500 кг предназначены для изготовления специальных стекол и хрусталя, другие печи емкостью в несколько тонн имеют производительность до 45 т/сут.

Кроме общеизвестных стеклянных изделий в производстве нашло применение ***стекловолокно***, которое получают из расплава способом вытягивания нитей через волоки (фильеры) диаметром 2...10 мкм. Изготовленные из стекловолокна ткани негорючи, химически стойки, нехрупки, обладают большой прочностью на разрыв. Кроме того, они обладают тепло-, электро- и звукоизолирующими свойствами.

При сочетании стекловолокна с разными полимерами получают ***стеклопластики*** — новые конструкционные материалы, которые, будучи в 3—4 раза легче стали, не уступают ей по прочности и способны заменить как сталь, так и другие материалы. Такие стеклопластики, не подверженные коррозии, применяют в автомобильной, авиационной и судостроительной промышленности.

Из стекла получают ***стеклопленки*** толщиной 10...200 мкм, в несколько раз более прочные, чем массивные стекла. Данные пленки имеют высокое пробивное электрическое напряжение,

это термостойкий и светопрозрачный материал. При получении пленку вытягивают из расплава стекломассы сверху вниз через калибрующее устройство. Стеклопленки используют для производства стеклопластиков, специальной высокотемпературной бумаги, для конденсаторов и других целей.

Разновидностью стекол являются ситаллы, получаемые из расплавленной стекломассы в процессе управления ее отверждением.

Ситаллы — стеклокристаллические материалы, получаемые при введении в расплавленное стекло затравок-катализаторов, в результате чего в объеме расплава возникают центры кристаллизации, на которых происходит рост микрокристаллов основной фазы. По структуре ситаллы представляют собой мелкие кристаллы, спаянные пленками незакристаллизовавшегося стекла. Они имеют высокую прочность, твердость, химическую, термическую стойкость и являются изоляторами. Из ситаллов изготовляют электроизоляторы, электронные детали, химическую аппаратуру и др.

4.4. РЕЗИНА. ПЕРЕРАБОТКА РЕЗИНЫ

Резина (вулканизат) — это продукт вулканизации композиции, содержащей каучук, вулканизирующие агенты, наполнители, пластификаторы, антиоксиданты и др. Как конструкционный материал резина обладает комплексом уникальных свойств, и важнейшие из них — высокая эластичность, или способность к большим обратимым деформациям растяжения в широком интервале температур. Кроме того, резина является материалом, который рассеивает при деформациях значительное количество энергии и, следовательно, хорошо работает как амортизатор; обладает высокими диэлектрическими свойствами; плохо истирается и не подвержена действию многих агрессивных сред. Указанные качества резины определяются в первую очередь типом каучука, который может быть натуральным и синтетическим. Оба типа каучуков еще называют эластомерами.

Натуральный каучук — природный полимер, обладающий при обычных условиях высокоэластичными свойствами, он содержит 91...96 % углеводорода, имеет плотность 910...920 кг/м^3. Каучук стоек к действию воды, хорошо растворим во многих органических растворителях, набухает в масле, при длительном хранении ниже 10 °С, а также при растяжении кристаллизуется и

приобретает высокую прочность при растяжении ненаполненных резин, составляющую примерно 30 МПа.

Резины, изготовленные с использованием натурального каучука, характеризуются высокой эластичностью (удлинение до 600... 900 %), износостойкостью и морозостойкостью, но невысокой атмосферостойкостью. Резины на основе натурального каучука применяют для изготовления шин, конвейерных лент, приводных ремней и амортизаторов, а также используют в виде латекса (водные дисперсии полимеров).

Синтетические каучуки, как и натуральные, в обычных условиях обладают высокой эластичностью и могут быть переработаны в резину. Обычно синтетические каучуки подразделяют на каучуки общего и специального назначения. Первые применяют в производстве, где главным является эластичность каучука (шины, конвейерные ленты, амортизаторы), а вторые — в производстве изделий, которые наряду с высокой эластичностью должны обладать такими специфическими свойствами, как тепло-, масло-, бензино-, морозо-, кислото-, атмосферостойкость и др. На основе синтетических каучуков получают резины с такими свойствами, которые невозможно получить с использованием натуральных.

Вулканизирующие агенты содержат все резины. Обычная серная вулканизирующая система содержит серу, ускоритель вулканизации, активатор ускорителя — оксид цинка, диспергатор оксида цинка — стеариновую или синтетические жирные кислоты. В качестве вулканизирующих агентов могут использоваться и другие вещества.

Наполнители вводят в каучуки для повышения физико-механических и эксплуатационных свойств резины и снижения ее стоимости. Такими веществами могут быть технический углерод, мел, каолин, липотон, синтетические белые сажи, аэросил, которые способствуют повышению вязкости резиновых смесей и тем больше, чем выше их дисперсность.

Пластификаторы — это высококипящие жидкие вещества, повышающие пластичность и снижающие вязкость резиновых смесей. Кроме того, они повышают ее морозостойкость и улучшают эластичные свойства. Пластификаторами служат мазуты, битумы, канифоль, сосновая смола. В бензомаслостойкие каучуки вводят синтетические пластификаторы — дибутилфталат, дибутилсебацинат и др.

Противостарители, добавляемые в резину, служат для увеличения срока эксплуатации резиновых изделий. В качестве таких добавок используют противостарители на основе вторичных ами-

нов, на основе фенолов, а также парафин или воск. Цветные резины получают введением красителей, которые могут быть неорганическими (пигменты) и органическими. Пигментами служат не растворимые в воде окрашенные соединения — оксиды титана, цинка, хрома, железа и др. Органические красители — это оранжевый лак, фталоцианин меди и др. Чтобы получить яркие цвета, резине сначала придают белый цвет, а затем окрашивают введением красителя.

Компоненты специального назначения служат для придания резинам специфических свойств. К ним относят порообразователи, антипирены, абразивы и др.

Из ингредиентов приготовляют резиновую смесь, механическим и тепловым воздействием переводят ее в вязкотекучее состояние, причем ингредиенты вводят в смесь не все сразу, а в определенной последовательности и процедуру смешения выполняют в зависимости от технологии с использованием соответствующего оборудования с учетом многих факторов — масштабов производства, сложности изделия, требований к качеству, наличия оборудования, оснастки и др.

Переработку резиновых смесей в изделия осуществляют разными способами: экструзией (шприцеванием), прессованием, литьем под давлением и т. д.

Экструзию применяют для непрерывного формования длинномерных заготовок определенного профиля продавливанием разогретой резиновой смеси через отверстие, соответствующее заданному профилю с помощью, как правило, червячной машины (рис. 4.3). В этой машине резиновая смесь непрерывно подается в загрузочную воронку *4*, захватывается червяком *1*, деформиру-

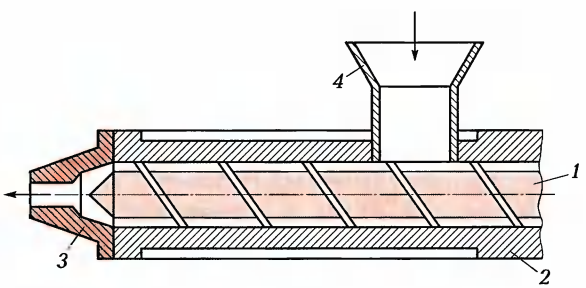


Рис. 4.3. Устройство червячной машины:

1 — червяк; *2* — цилиндр; *3* — формирующая головка; *4* — загрузочная воронка; ⟶ — подача резиновой смеси

ется в цилиндре *2* и продавливается через формирующую головку *3* вращающимся червяком, превращаясь в изделие.

Полученное изделие, имеющее в сечении простую геометрическую форму (квадрат, прямоугольник, круг и др.), это только полуфабрикат, приближенный по своей конфигурации к оснастке (форме, штампу), на которой он далее будет превращен в изделие. Если форма профиля является заказанным изделием, то сразу проводят непрерывную вулканизацию, т. е. осуществляют процесс превращения в резину нагревом в расплавах солей, высококипящих органических соединениях, горячем воздухе или нагревателях, например ВЧ-установках.

Вулканизация — это процесс термической обработки резиновой смеси в интервале температур 140...250 °С, в результате которой происходят соединения макромолекул каучука в так называемую вулканизационную сетку, образуемую химическими поперечными связями. В результате вулканизации резина становится прочной, твердой, эластичной, тепло- и морозостойкой, меньше набухает в органических растворителях.

Прессование — это способ формообразования из резиновой смеси *2* (рис. 4.4), заключающийся в пластической деформации под воздействием давления, температуры и вулканизации, в результате которой получают изделия, соответствующие пресс-форме, состоящей из пуансона *1* и матрицы *3*.

В отличие от прессования при ***литье под давлением*** (рис. 4.5) жидкую резиновую смесь из пластификатора *3* инжекторным механизмом *4* впрыскивают в сомкнутую механизмом смыкания *1* литьевую форму *2* и в ней же смесь вулканизируют.

Кроме массивных и сплошных резиновых деталей можно изготовлять пористые изделия. В упрощенном варианте для этого в резиновую смесь, помещенную в пресс-форму, достаточно ввести газообразователь (пороформ). Пороформ может быть введен в резиновую смесь заранее. При нагревании сомкнутой пресс-формы происходит вспенивание резиновой смеси за счет выделения

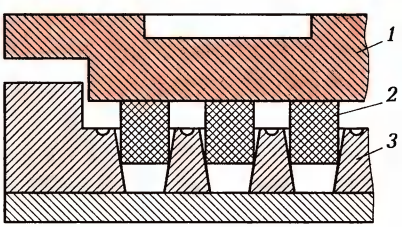


Рис. 4.4. Прессование резиновой смеси:

1 — пуансон; *2* — резиновая смесь; *3* — матрица

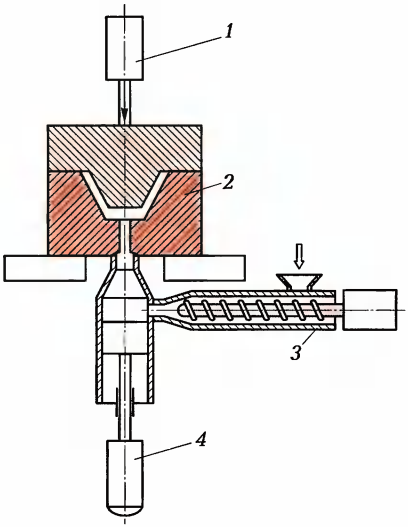


Рис. 4.5. Литье под давлением резиновой смеси:

1 — механизм смыкания; *2* — литьевая форма; *3* — пластификатор; *4* — инжекторный механизм; ⟶ — направление усилия; ⇨ — загрузка материала

газовых пузырьков газообразователем и их равномерное распределение в объеме формуемого изделия. К моменту достижения формой температуры вулканизации (140...170 °С) процесс газообразования заканчивается. Плотность пористых резин значительно меньше массивных. Такой материал становится мягким, легким и низкотеплопроводным.

4.5. ДРЕВЕСИНА И ДРЕВЕСНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Широкому использованию древесины в промышленности способствуют ее высокие физико-механические свойства, хорошая обрабатываемость, а также эффективные способы изменения свойств древесины химической и механической обработкой. Древесина имеет также малую теплопроводность, относительно высокую прочность, хорошую сопротивляемость ударным и вибрационным нагрузкам, в сухой среде древесина долговечна. Достоинствами древесины являются способность прочно склеиваться, сохранять красивый внешний вид и легко воспринимать отделку. К недостаткам следует отнести возможность легкого возгорания и заг-

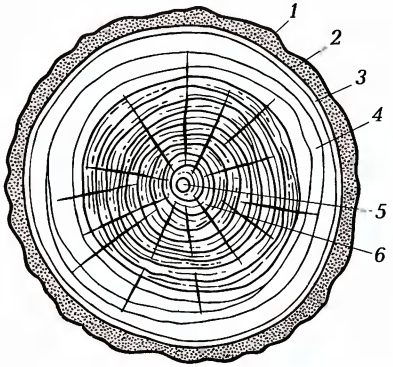


Рис. 4.6. Сечение древесного ствола:

1 — кора; *2* — корка; *3* — луб; *4* —заболонь; *5* — сердцевина; *6* — ядро

нивания, разрушение от воздействия насекомых и грибов, гигроскопичность и, как следствие, способность разбухать и усыхать, коробиться и растрескиваться. Кроме того, древесина имеет пороки биологического происхождения, снижающие ее качество.

Древесина и дерево — понятия неравнозначные. Чтобы понять что называется древесиной, рассмотрим основные части сечения **древесного ствола** (рис. 4.6) — это сердцевина *5*, ядро *6*, заболонь *4*, луб *3* и корка *2*. ***Сердцевина*** — узкая центральная часть ствола, представляющая собой рыхлую ткань в виде темного пятна диаметром 2...5 мм. Ближе к периферии ствола расположено ***ядро***, которое, как правило, темного цвета и образуется за счет отмирания живых клеток дерева. Молодые деревья ядра не имеют, оно образуется с течением времени. По размеру оно может быть разным — у одних деревьев больше, у других — меньше. За ядром ближе к коре находится ***заболонь***, которая светлее ядра и служит каналом, по которому вода с минеральными веществами поднимается от корней к листьям, а ядро создает лишь механическую прочность стволу. Поскольку заболонь пропускает жидкость, она менее стойка против загнивания.

Кора *1* покрывает дерево сплошным кольцом и состоит из двух слоев наружного — ***корки*** *2* и внутреннего — ***луба*** *3*, который проводит воду с органическими веществами, выработанными в листьях, вниз по стволу.

Кора предохраняет дерево от механических повреждений, резких перемен температуры, насекомых и других вредных воздействий окружающей среды.

Ствол поваленного дерева, отпиленный от корневой части и очищенный от сучьев, называют ***хлыстом***. При раскряжевке хлыстов их разделяют на деловую и дровяную части. Деловую

часть в свою очередь подразделяют на комлевую, срединную, вершинную части и вершинку. Деловой древесиной может быть только материал, полученный из высококачественных стволов. В зависимости от качества и назначения отрезки деловой части разной длины могут называться бревнами, кряжами и чураками. Из бревен нарезают пиломатериалы; кряжи используют для изготовления заготовок для фанеры, лыж, карандашей, а также заготовок для нужд авиации и др.; чураки, как правило, имеют определенную длину и предназначаются для переработки на деревообрабатывающих станках.

Основными видами пиломатериалов являются брусья двух-, трех- и четырехкантные (рис. 4.7, *а*—*в*); доски необрезная, чис-

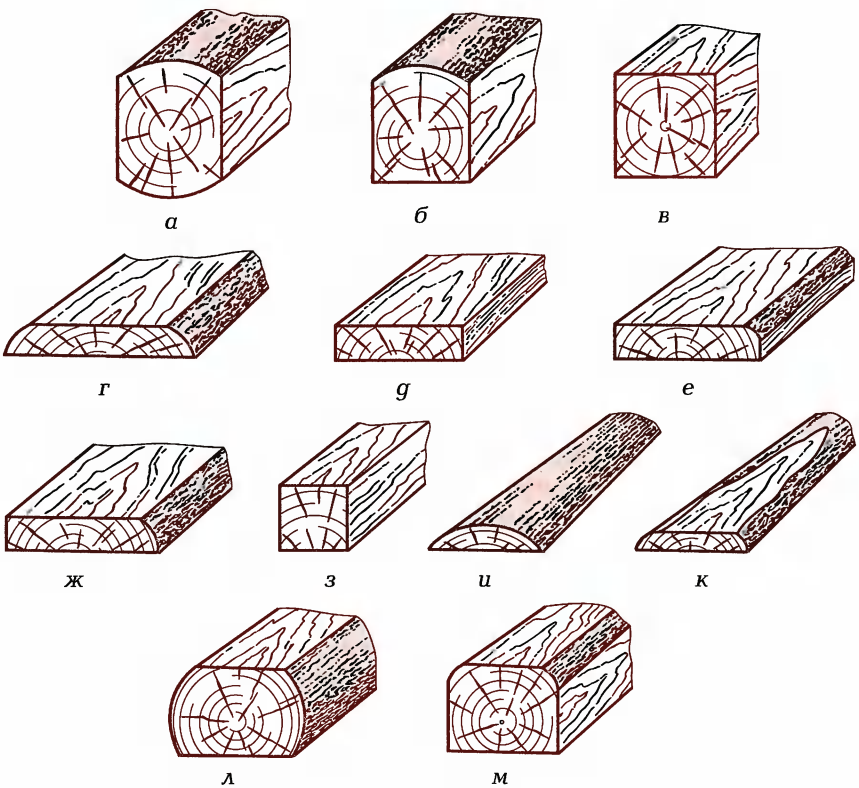


Рис. 4.7. Основные виды пиломатериалов:

а, *б*, *в* — двух-, трех- и четырехкантные брусья; *г*, *д*, *е*, *ж* — необрезная, чисто обрезная, обрезная с тупым и острым обзолом доски; *з* — брусок; *и*, *к* — горбыльный и дощатый обапол; *л*, *м* — необрезная и обрезная шпалы

тообрезная, обрезная с тупым и острым обзолом (рис. 4.7, *г*—*ж*); брусок, обапол горбыльный, обапол дощатый, шпала необрезная, шпала обрезная (рис. 4.7, *з*—*м*).

На основании изложенного сформулируем определение древесины. **Древесина** — это основная часть дерева (ствола, корней, ветвей), состоящая из разных растительных тканей, выполняющих проводящие, механические, накопительные функции, и расположенная между корой и сердцевиной. Древесина бывает ***хвойных*** (ель, сосна и др.) и ***лиственных*** (дуб, береза и др.) пород деревьев. Срубленное дерево имеет древесину, представляющую собой совокупность оболочек растительных клеток. Химический состав всех древесных пород почти одинаков: 49...56 % углерода, 43...44 % кислорода, 6 % водорода, 0,1...0,3 % азота. Древесина содержит 39...58 % целлюлозы, 17...34 % лигнина и 15...38 % гемицеллюлозы. Все свойства древесины обычно определяют при ее влажности 12 %.

Для этого материала характерна анизотропия свойств, механические свойства вдоль и поперек волокон могут различаться в несколько раз. Лиственные породы иногда обладают лучшими параметрами, чем хвойные, например, ударная вязкость лиственных пород в 2 раза выше ударной вязкости хвойных. По плотности древесину подразделяют на три группы: малой плотности — до 510 кг/м^3 (сосна, ель, тополь, липа, ольха), средней плотности — 550...740 кг/м^3 (лиственница, береза, бук, дуб, рябина, клен) и высокой плотности — свыше 750 кг/м^3 (белая акация, кизил, граб).

Древесные материалы — это общее название конструкционных, изоляционных поделочных и композиционных материалов, полученных при обработке древесины, древесных частиц, волокон, шпона при значительном давлении и повышенной температуре после предварительного их смешивания с синтетическими смолами, цементами и склеивания. Такие материалы по сравнению с обычной древесиной обладают повышенными эксплуатационными свойствами и менее анизотропны. К древесным материалам относятся древесные пластики, древесно-волокнистые плиты, древесные слоистые пластики, фанера, фибролит и др.

Древесные пластики — материалы, вырабатываемые из лущеного шпона, древесной пресс-крошки или опилок, пропитанных синтетическими смолами и склеенных под высоким давлением и при температуре. Различают древесные слоистые пластики армированные, спрессованные и склеенные из шпона и ткани, усиленные металлической сеткой.

Древесно-волокнистые плиты — материалы, вырабатываемые «отливом» на сетке обычной, а также рафинерной (очищен-

ной и измельченной), дефибраторной (истертой) и других древесных масс двумя способами: мокрым в присутствии воды и сухим, т. е. без воды, но с добавлением 4...8 % синтетической смолы. После «отлива» изделия сушат, получая мягкие и изоляционные плиты, или прессуют, изготавливая полутвердые, твердые и сверхтвердые плиты. Для повышения механической прочности, стойкости против влаги, огня, действия насекомых в состав плит вводят соответствующие смолы, гидрофобизирующие вещества, антисептики и т. п.

Мягкие плиты состоят из переплетенных волокон древесины, образующих войлокообразный ковер. Эти плиты имеют большую пористость и малую тепло- и звукопроницаемость. Их обычно выпускают толщиной 12...25 мм, шириной 1 200...1 700 мм и длиной 1 200...3 000 мм.

Полутвердые и твердые плиты представляют собой материал типа толстого картона толщиной 6...12 мм. Их используют в основном в строительстве и для изготовления мебели. Сверхтвердые плиты в процессе изготовления пропитывают синтетическими смолами или высыхающими маслами, а затем подвергают термической обработке. Обычно их выпускают толщиной 2,5...6 мм и с линейными размерами (1 000...2 140) × (1 200...5 500) мм. Основное их назначение — строительство.

Древесные слоистые пластики изготовляют из листов лущеного шпона, уложенных в определенном по направлению волокон порядке и склеенных синтетическими клеями в условиях нагревания при большом давлении. Такие материалы имеют высокую плотность и применяются в авиа-, судо- и машиностроении.

Древесно-стружечные плиты получают горячим прессованием древесной стружки со связующим веществом — карбамидо- и фенолоформальдегидными смолами. По способу прессования различают плиты плоского прессования и экструзионные, или выдавленные. Древесно-стружечные плиты перспективны в строительстве и для изготовления мебели, поэтому их производят влагостойкими, биостойкими, огнестойкими, шлифованными и нешлифованными, необлицованными и облицованными шпоном, бумагой, синтетическими пленками и т. д. Плиты плоского прессования имеют толщину 10...25 мм, ширину 1 200...2 440 мм и длину 2 440...5 500 мм.

Фанеру изготовляют из древесного материала, называемого ***шпоном***. Шпон бывает строганым и лущеным.

Строганый шпон представляет собой тонкие листы древесины, полученные при строгании бруса поперек волокон на фане-

рострогальных станках. Этот материал используют для облицовки фанеры, плит разного назначения и деталей мебели. Его вырабатывают из лиственных пород дерева — ореха, клена, груши, яблони, березы и др., а также из хвойных — тиса, лиственницы и сосны. В зависимости от породы дерева толщина строганого шпона 0,4...1,0 мм.

Лущеный шпон — это тонкий лист древесины в виде ленты, полученный при лущении чурака на специальном станке. При этом цилиндрической формы чурак вращается, а нож, вонзенный на заданную толщину, движется поступательно навстречу вращению и непрерывно снимает ленту древесины. Для придания древесине эластичности чурак перед лущением прогревают в воде при температуре 50...60 °С. Такой шпон производят из древесины березы, ольхи, липы, сосны и других пород, а используют для облицовки древесных изделий и изготовления фанеры, фанерных плит, слоистой древесины и клееных деталей мебели.

На рис. 4.8 показаны схемы изготовления строганого (рис. 4.8, *а*) и лущеного (рис. 4.8, *б*) шпона. Заготовкой для получения шпона служат брус *1* или чурак *5*, с которых ножом *4* срезается лист шпона *3* при движении древесины ему навстречу. Прижимная линейка *2* препятствует самопроизвольному скалыванию древесины.

Фанера — листовой древесный материал, получаемый склеиванием трех и более слоев лущеного шпона с перекрестным расположением его листов относительно волокон древесины. Количество слоев, как правило, нечетное, так как при четном количе-

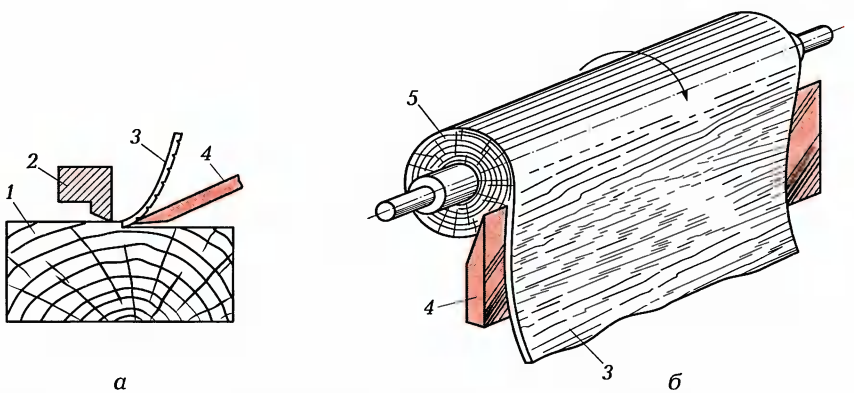


Рис. 4.8. Схема изготовления строганого (*а*) и лущеного (*б*) шпона:
1 — брус; *2* — прижимная линейка; *3* — лист шпона; *4* — нож; *5* — чурак; ⟶ — направление вращения чурака

стве слоев шпона два средних будут иметь параллельное направление волокон.

По сравнению с пиломатериалами фанера обладает рядом преимуществ, основные из которых следующие: одинаковая прочность во всех направлениях, малое коробление и растрескивание, отсутствие сквозных отверстий (трещин). Кроме того, фанера легко принимает требуемую форму, удобна для транспортирования, имеет большие размеры. Максимальные размеры фанеры 2 440 × × 1 525 мм и толщина до 18 мм. Фанеру выпускают шлифованной и нешлифованной, оклеенную синтетическими пленками, жидкими прозрачными материалами, прозрачной бумагой, пропитанной клеями и другими материалами.

К фанере специального назначения относят, например, бакелизированную и авиационную. ***Бакелизированную фанеру*** изготовляют из листов лущеного шпона, но склеивают синтетическими смолами. В результате получают материал, обладающий повышенными водостойкостью, прочностью, атмосферостойкостью.

Авиационную фанеру изготовляют из березового шпона, а склеивают слои бакелитовой пленкой, что обеспечивает ей высокие физико-механические свойства.

4.6. ТЕХНИЧЕСКИЕ КЛЕИ

Клеи (адгезивы) — это композиции на основе органических или неорганических веществ, способные соединять (склеивать) разные материалы и их сочетания — древесину, бумагу, ткани, кожу, стекло, керамику, металлы, резину, пластмассы. Склеиваимость обусловлена образованием прочной адгезионной (слипающей) и когезионной (сцепляющей) связи между клеевой прослойкой и соединяемыми поверхностями.

Основой ***органических клеев*** служат главным образом синтетические олигомеры (смолы, жидкие каустики, смазочные масла) и полимеры (фенолоформальдегидные, полиэфирные, эпоксидные полимеры, каучуки и др.), образующие клеевую пленку в результате затвердевания при охлаждении (термопластичные клеи), отверждения (термореактивные клеи) или вулканизации (резиновые клеи).

К ***неорганическим клеям*** относят алюмофосфатные, керамические (основа — оксиды магния, алюминия, кремния, щелочных металлов), силикатные (основа — калиевое или натриевое стекло), металлические (основа — ртуть).

По своему физическому состоянию клеи могут быть жидкими (эмульсии, суспензии, растворы) или твердыми (прутки, порошки, гранулы).

По признаку происхождения клеи бывают ***натуральные*** (животные, растительные, минеральные), ***синтетические*** (керамические, силикатные, цементные), ***полимерные*** (эластомерные, пластомерные) и ***комбинированные***.

По товарному виду их можно классифицировать на ***твердые*** (гранулированные, порошковые, пленочные и др.), ***пастообразные*** (герметизирующие) и ***жидкие*** (полимерные, эмульсионные, мономерные, олигомерные и др.).

По условиям отверждения подразделяют на клеи ***холодного***, ***горячего*** (термического) отверждения, а также ***влагоотверждаемые*** и ***универсально отверждаемые***.

Жизнеспособность клеевых материалов может выражаться секундами, часами, месяцами и регулируемым отверждением. Клеи могут состоять из одного, двух и многих (в том числе раздельных) компонентов.

Кроме того, по эксплуатационным свойствам клеи характеризуются стойкостью к воде, маслу, бензину и другим химическим веществам, а также к воздействию коррозии, света, температуры и др. При склеивании осуществляется комплекс физико-химических явлений, в результате которых образуется прочное адгезионное соединение как результат адгезии.

Резиновые клеи представляют собой растворы каучуков или резиновых смесей в органических растворителях (бензине «галоша», этилацетате или в их смесях). Эти клеи применяются для склеивания (сборки) резиновых и резинотканых изделий (ремней, обуви и др.), для крепления резины к металлу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называют пластмассами?
2. Каковы способы получения синтетических полимеров?
3. Какими свойствами обладает бромеллитовая керамика?
4. Какие вещества называют резинами?
5. Что такое шпон?
6. Каковы способы изготовления шпона?
7. Что представляет собой фанера?
8. Из каких основных компонентов состоит клей?
9. Из каких компонентов состоит стекло?

III ЧАСТЬ

МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Глава 5. Магнитные, электрические и тепловые свойства материалов

Глава 6. Полупроводники и приборы на их основе

Глава 5

МАГНИТНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

5.1. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

Все вещества в разной степени обладают магнитными свойствами, так как электроны, протоны и нейтроны, из которых построены атомы, имеют магнитное взаимодействие (магнитный момент). По значению и знаку магнитной восприимчивости все вещества можно подразделить на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетики — вещества, у которых при внесении их в магнитное поле во всем объеме индуктируются незатухающие вихревые микротоки, создающие собственное магнитное поле, направленное навстречу внешнему. Диамагнетизм присущ всем веществам, но у некоторых он перекрывается более сильными эффектами. К диамагнитным металлам относятся медь, серебро, золото, ртуть, цинк, кадмий, сурьма, бериллий, висмут и др.

Парамагнетики — вещества, которые, находясь во внешнем магнитном поле, приобретают намагниченность, совпадающую по направлению с напряженностью этого поля. Парамагнетизм обусловлен ориентацией во внешнем магнитном поле постоянных магнитных моментов атомов парамагнитного вещества, которыми они обладают независимо от напряженности намагничивающего поля. К парамагнитным металлам относятся молибден, вольфрам, алюминий, кальций, барий и др.

Ферромагнетики — вещества, которые самопроизвольно намагничиваются, обладают высокими значениями магнитной проницаемости (до $10^5...10^6$), изменяют форму и размеры под действием магнитного поля (магнитострикция). Характерными представителями ферромагнетиков являются железо, никель, кобальт и их сплавы, а также ряд редкоземельных металлов — гадолиний, тербий и их сплавы.

Ферромагнетики широко используются в электронике, электротехнике, радиотехнике и приборостроении. При нагреве никель, железо и кобальт теряют свои магнитные свойства соответственно при температуре 350; 759 и 1 110 °С и переходят в парамагнитное состояние.

Магнитные свойства материалов можно оценить, например, по магнитной проницаемости, которая для воздуха принята за единицу. Исходя из этого для меди магнитная проницаемость 0,99; для алюминия — 1; железа — 2 000...3 000; никеля — 300; пермаллоя — 100 000 и самую большую магнитную проницаемость имеют ферромагнитные металлы, у которых этот показатель выражается многими сотнями тысяч.

Свойства сплавов существенно отличаются от свойств компонентов, из которых они состоят. Железо сильно намагничивается, никель меньше, но сплав на основе железа с 25 % никеля, 2 % хрома и 18 % марганца немагнитен, как и сплав железа с 25 % никеля. Однако бывает наоборот, и немагнитные металлы — медь (66,5 %), алюминий (11,1 %) и марганец (22,4 %) образуют магнитный сплав.

Магнитотвердые* (*магнитожесткие*) *материалы — ферромагнитные материалы, которые намагничиваются и перемагничиваются в сильных магнитных полях, характеризующихся высокой коэрцитивной силой и остаточной магнитной индукцией. В технике используют литье и порошковые магнитные материалы на основе железа и кобальта с добавлением других веществ (в том числе и редкоземельных). Из магнитотвердых материалов делают постоянные магниты, используемые в измерительных приборах, электродвигателях и других устройствах.

Ални — общее название группы магнитотвердых сплавов на основе железа, образованное от первых букв главных компонентов: алюминия (11...18 %) и никеля (20...34 %) соответственно. Легирующими элементами этих сплавов могут быть кобальт, медь, кремний, титан.

Кроме того, известен магнитотвердый материал ***магнико*** на основе железа, содержащий кобальт (24 %), никель (14 %), алюминий (8 %) и медь (3 %). Этот сплав имеет высокое значение остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы. Анизотропию магнитных свойств магнико получают термической обработкой в магнитном поле.

Постоянные магниты изготовляют из материалов, которые способны намагничиваться и сохранять намагниченность. Для сердечников электромагнитов применяют металл, который намагни-

чивается во включенном состоянии и размагничивается в выключенном. Мощные магниты отливают из сплавов железо — никель — кобальт и алюминий — никель — кобальт (***альнико***), содержащий 10...12 % алюминия, 20...21 % никеля и 5...10 % кобальта. Поскольку этот материал хрупок, обработку отливки выполняют шлифованием.

Магнитомягкие материалы — ферромагнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в слабых магнитных полях. Эти материалы характеризуются высокими значениями магнитной проницаемости (10^2...10^5) и небольшой коэрцитивной силой (напряженность магнитного поля для полного размагничивания). К ним относятся широко известные сплавы — железоникелевые (***пермаллой***), железокобальтовые (***пермендюр***), смешанные ферриты, а также электротехнические стали для электрических машин и специального назначения термомагнитные сплавы и магнитострикционные материалы.

Подробнее ознакомимся с магнитострикцией и ее применением в технике. ***Магнитострикция*** — это явление, связанное с изменением размеров и формы тела при его намагничивании. По своему значению магнитострикция значительна у ферромагнитных материалов и может быть продольной, когда удлинение образца происходит в направлении магнитного поля, и поперечной, когда это явление происходит перпендикулярно направлению магнитного поля. Кроме того, этот эффект может быть обратимым, т. е. магнитоупругим (эффект Виллари), когда происходит изменение намагниченности образца при его деформации.

К магнитомягким материалам, кроме названных, относятся также никель, алфер, ряд ферритов и некоторые редкоземельные металлы, их сплавы и соединения. Из указанных материалов изготовляют магнитострикционные преобразователи, в которых энергия переменного электрического и магнитного полей преобразуется в энергию механических УЗ-колебаний или, наоборот, благодаря обратимому эффекту магнитострикции — в магнитное поле при механическом воздействии на преобразователь. Устройства с магнитострикционными преобразователями используются в УЗ-установках для очистки электронных блоков, разделения твердых и хрупких материалов, для измерения вибрации разных сооружений, в фильтрах и стабилизаторах электрических и радиотехнических устройств.

Электротехническая сталь относится к магнитомягким материалам. Ее подразделяют на два вида: динамную (изотропную) и трансформаторную (анизотропную). Эта сталь кроме железа и

0,1 % углерода содержит 0,3...6,0 % кремния и 0,1...0,3 % марганца. После термической обработки сталь прокатывают в тонкие листы и используют для производства сердечников трансформаторов и генераторов постоянного тока.

5.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Все материалы характеризуются электрической проводимостью (электропроводностью), которая обусловлена их природой — имеющимися в них носителями тока — подвижными электрическими зарядами. По виду этих носителей различают электронную проводимость (металлы, полупроводники), ионную проводимость (электролиты) и электронно-ионную проводимость (плазма). В зависимости от удельной электропроводности все вещества условно подразделяют на три группы: ***проводники*** (удельная электропроводность[1] больше 10^6 См/м), ***полупроводники*** (удельная электропроводность $10^{-8}...10^6$ См/м) и ***диэлектрики*** (изоляторы, удельная электропроводность которых меньше 10^{-8} См/м).

Для нашего рассмотрения интерес представляют прежде всего проводники, к которым относятся металлы, плазма и некоторые неметаллы. ***Электрическое сопротивление*** — величина, характеризующая противодействие, оказываемое электрической цепью (проводником), движущимся в ней электрическим зарядам, выражаемое в омах (Ом). Электрическое сопротивление и электрическая проводимость — понятия, обратные одно другому: чем выше электрическое сопротивление, тем ниже электрическая проводимость и наоборот.

В технике используются материалы с высокими и проводимостью, и сопротивлением. Медь и алюминий обладают самым малым из всех металлов (за исключением серебра) электрическим сопротивлением, поэтому они в основном используются для производства электрических проводов, в которых потери электроэнергии должны быть минимальными. Медь как материал для электрических проводов предпочтительнее, поскольку она хорошо проводит теплоту и электрический ток, механически прочна и коррозионно-стойка. Электропроводность чистого алюминия составляет около 60 % электропроводности меди, но это компенси-

[1] Сименс (См) — величина, обратная электрическому сопротивлению, т.е. 1 См = 1 $Ом^{-1}$.

руется вдвое меньшей плотностью алюминия, позволяющей делать провода из него более толстыми. При одинаковой электропроводности алюминиевый провод одной длины и толщины имеет массу вдвое меньше медного. Недостатком алюминия является его незначительная стойкость при изгибах и перегибах.

Такие материалы, как вольфрам, молибден, нихром, фехраль, хромаль и др., имеют большое электрическое сопротивление и применяются в тех случаях, когда электрическую энергию необходимо превратить в свет или теплоту. Чистый вольфрам в виде проволоки используют для производства нитей ламп накаливания благодаря его высокой рабочей температуре — 2 200 ... 2 500 °С. Большая светоотдача, а также очень высокая температура испарения гарантируют длительный срок их службы. Вольфрамовые прутки и проволоку применяют для изготовления нагревательных элементов высокотемпературных печей (до 2 000 °С). Удельное электрическое сопротивление вольфрама составляет 5,03 мкОм · м. Вольфрам и молибден являются дорогими и дефицитными металлами, поэтому там, где это возможно, стараются заменить эти металлы другими. Подробнее ознакомимся с некоторыми материалами промышленного назначения, обладающими высоким удельным электрическим сопротивлением.

Константан — сплав меди с никелем (39 ... 41 %) и марганцем (1 ... 2 %), обладающий удельным электрическим сопротивлением 0,48 мкОм·м, которое слабо зависит от изменения температуры. Этот материал применяют для изготовления резисторов, элементов измерительных приборов и термопар.

Манганин — медный сплав, легированный 11,5 ... 13,5 % марганца и 2,5 ... 3,5 % никеля, обладающий стабильным удельным электрическим сопротивлением при изменении температуры. Его удельное сопротивление составляет 0,4 мкОм · м. Из манганина делают проволоку и ленты для электронагревательных приборов.

Нихром — сплав никеля (65 ... 80 %) с хромом (15 ... 30 %) и некоторыми добавками кремния, алюминия и других элементов. Удельное электрическое сопротивление нихрома составляет 1,08 мкОм · м. Сплав характеризуется высокой жаростойкостью и используется для изготовления нагревателей электрических печей, бытовых приборов, резисторов, реостатов. Сплав нихрома, в котором до 20 % никеля заменено железом, называют ***ферронихромом***.

Хромаль — жаростойкий (1 000 ... 1 400 °С) сплав железа с хромом (15 ... 30 %) и алюминием (4,5 ... 6,0 %), имеющий удельное электрическое сопротивление 1,3 ... 1,5 мкОм · м. Название сплава об-

разовано от слов «хром» и «алюминий». Хромаль марок Х23Ю5Т и Х27Ю5 используют для изготовления нагревателей сопротивления электрических печей. Зарубежные аналоги хромаля — это ***канталь***, ***мегапир***.

Фехраль — жаростойкий (до 1 100 °С) сплав железа с хромом (8...12,5 %) и алюминием (3,5...5,5 %), имеющий высокое удельное электрическое сопротивление — 1,1...1,35 мкОм · м. Название сплава образовано от слов «феррум», «хром» и «алюминий». Используется фехраль в технике для производства нагревательных элементов электрических установок.

Молибден — тугоплавкий металл с удельным электрическим сопротивлением 5,17 мкОм · м, применяемый в производстве электроосветительных ламп и электровакуумных приборов, а также для изготовления электронагревателей, например для колпаковых печей, работающих в атмосфере азота и водорода.

В качестве нагревателей электрических печей служат **силитовые стержни**, которые получают при спекании смеси порошков карборунда и кремния. Такие нагреватели способны длительное время работать при высокой температуре до 2 000 °С в воздушной атмосфере.

Особые электрические свойства некоторых материалов (проводников и полупроводников) используются в технике, например, для измерения температуры в качестве термоэлектрических преобразователей и термометров сопротивления.

Термоэлектрические преобразователи (термопары), широко применяемые для измерения температур в интервале от –200 до +2 500 °С, имеют принцип действия, основанный на зависимости термоЭДС от температуры. Термопара (рис. 5.1, *а*) состоит из двух разнородных проводников, которые могут быть хромель-алюмелевые (рис. 5.1, *б*) или платинородий-платиновые (рис. 5.1, *в*). Спаянные концы термопар называют горячими, или рабочими, а свободные — холодными.

При нагревании спаянных концов в цепи термопары появляется электрический ток за счет термоЭДС. Объясняется это явление следующим образом. В разных металлах плотность свободных электронов неодинакова, поэтому в месте их спая электроны в основном будут диффундировать из металла с большей плотностью в металл с меньшей плотностью и значительно меньше в обратную сторону. Образующееся в месте соединения электрическое поле будет препятствовать этой диффузии, и когда скорость диффузионного перехода электронов сравняется со скоростью их обратного движения, под влиянием установившегося электрического поля наступит состо-

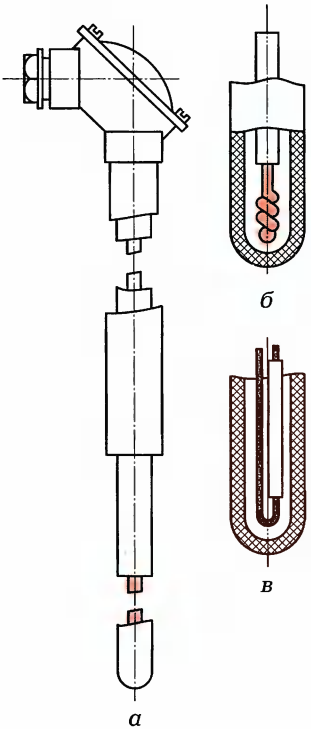


Рис. 5.1. Термопара:

а — общий вид; *б*, *в* — рабочие концы хромель-алюмелевой и платинородий-платиновой термопар

яние подвижного равновесия. В этом состоянии между разнородными металлами возникает контактная разность потенциалов. Но так как плотность свободных электронов зависит также от температуры горячего спая, в месте спая разнородных проводников при любых температурах возникает термоЭДС, для измерения которой в цепь термопары включают измерительный прибор.

В зависимости от материала, из которого изготовлены термопары, их подразделяют на две группы: из благородных или неблагородных металлов и из тугоплавких соединений или их комбинаций с другими материалами. Кроме

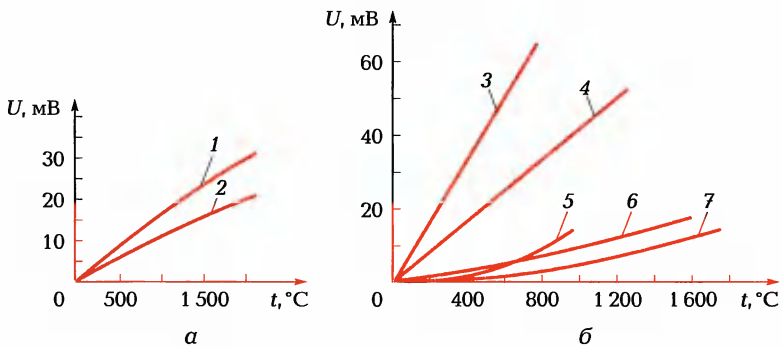


Рис. 5.2. Градуировочные кривые термопар:

а — нестандартных; *б* — стандартных; *1*, *2* — вольфрам-рениевых ВР5/20 и ВР10/20; *3* — хромель-копелевой ХК; *4* — хромель-алюмелевой ХА; *5* — из специальных сплавов НС; *6* — платинородий-платиновой ПП; *7* — платинородий-платинородиевой ПР30/6

того, термопары бывают с ***нестандартными*** (рис. 5.2, *а*) и ***стандартными*** (рис. 5.2, *б*) ***градуировочными кривыми***.

К нестандартным относятся вольфрам-рениевые ВР5/20 и ВР10/20 (см. рис. 5.2, *а*, кривые *1*, *2*), а к стандартным — все остальные: хромель-копелевые ХК, хромель-алюмелевые ХА, из специальных сплавов НС (см. рис. 5.2, *б*, кривые *3*, *4*, *5* соответственно) и из благородных металлов: платинородий-платиновые ПП и платинородий-платинородиевые ПР30/6 (см. рис. 5.2, *б*, кривые *6*, *7*).

Технические характеристики стандартных градуировок термопар приведены в табл. 5.1.

Платинородий-платиновая термопара типа ТПП, широко применяемая в технике, характеризуется высокой воспроизводимостью градуировочной характеристики и стабильностью, предназначена для работы в окислительной среде (на воздухе) для измерения температур до 1 200...1 300 °С. При повышении верхнего предела измерения ее стабильность существенно снижается, а при длительной работе вследствие летучести родия из платинородиевого термоэлектрода термоЭДС уменьшается. Недостатками этой термопары являются небольшая чувствительность и высокая стоимость термоэлектродного материала.

Платинородий-платинородиевая термопара типа ТПР предназначена для измерения температур в интервале 1 200... 1 600 °С, при которых ее градуировочная характеристика стабильна. Согласно градуировочной кривой ТПР термоЭДС этой термопары при температурах до 200 °С равна нулю, поэтому отпадает необходимость в компенсации температуры ее свободных концов.

По остальным основным характеристикам термопары ТПП и ТПР аналогичны между собой. Из-за высокой стоимости их термоэлектроды изготовляют малых размеров (диаметром 0,5...0,6 мм), и используют эти термопары только для измерения температур, превышающих 1 000 °С, так как при более низких температурах с успехом могут быть применены более дешевые термопары.

Термопары хромель-алюмелевые типа ТХА, хромель-копелевые типа ТХК и из специальных сплавов типа ТНС изготовляют из неблагородных металлов. Самыми распространенными являются термопары типов ТХА и ТХК, применяемые в разных отраслях промышленности. Хромель-алюмелевые термопары ТХА, как правило, применяют для измерения температур не выше 1 000...1 100 °С и редко до 1 250...1 300 °С. При работе на воздухе стабильность этих термопар изменяется вследствие выгорания

Таблица 5.1. Технические характеристики термопар стандартных градуировок

Термопара, тип	Градуировка	Химический состав термоэлектрода		Верхний температурный предел применения, °С		Чувствительность, мВ/°С	ТермоЭДС верхнего предела, мВ	Рабочая среда
		положительного	отрицательного	длительного	кратковременного			
Платинородий-платиновая ТПП	S(ПП)	Платинородий (90 % Pt, 10 % Rh)	Платина (100 % Pt)	1 300	1 600	0,01	16,72	Окислительная, вакуум
Платинородий-платинородиевая ТПР	B(ПР)	Платинородий (70 % Pt, 30 % Rh)	Платинородий (94 % Pt, 6 % Rh)	1 600	1 800	0,01	13,92	То же
Хромель-алюмелевая ТХА	K(ХА)	Хромель (89 % Ni, 9,8 % Cr, 1 % Fe, 0,2 % Mn)	Алюмель (94 % Ni, 2 % Al, 2,5 % Mn, 1 % Si, 0,5 % Fe)	1 000	1 300	0,04	52,41	»
Хромель-копелевая ТХК	ХК	То же	Копель (55 % Cu, 45 % Ni)	600	800	0,08	66,40	Окислительная, восстановительная, вакуум
Термопара из специальных сплавов ТНС	НС	Специальный сплав НК	Специальный сплав СА	1 000	—	0,02	13,39	Окислительная, вакуум
Вольфрам-рениевая ТВР	ВР5/20	Специальный сплав вольфрама с рением (95 % W, 5 % Re)	Специальный сплав вольфрама с рением (80 % W, 20 % Re)	2 200	2 500	0,01 ... 0,015	31,45	Восстановительная, нейтральная (инертная), вакуум

компонентов сплава. Кроме того, их стабильность зависит от продолжительности работы и диаметра термоэлектродов, которые делают по возможности более толстыми (до 3,2 мм). На точность показаний влияет также длина погружаемой в печь части термопары. Термопары типа ТХА имеют линейную зависимость термоЭДС от температуры.

Хромель-копелевые термопары типа ТХК применяют для измерения температуры до 600 °С из-за невысокой жаростойкости копеля, но чувствительность их вдвое выше, чем термопар типа ТХА.

Термопары типа ТНС отличаются от других особой формой градуировочной кривой, которая в интервале температур 0...200 °С близка к нулю и поэтому изменение температуры холодных (свободных) концов не влияет на ее термоЭДС. Это является достоинством данных термопар; их недостаток — невысокая чувствительность. Термопары типа ТНС применяют для измерения температур до 1 000 °С. В интервале температур 400...1 000 °С зависимость термоЭДС от температуры линейная.

Вольфрам-рениевые термопары типа ТВР являются нестандартными, изготовляются из тугоплавких металлов и предназначены для измерения температур до 2 500 °С в инертной атмосфере или вакууме. В окислительной атмосфере эти термопары могут работать только кратковременно (несколько десятков секунд).

Термометры сопротивления, широко применяемые для измерения температур в диапазоне от –260 до +750 °С, имеют принцип действия, основанный на свойстве веществ изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры нагрева. Наибольшее распространение получили термометры сопротивления, чувствительный элемент которых изготовляют из чистых металлов (платины, меди, никеля), реже используют приборы с чувствительным элементом из полупроводниковых материалов. Материал чувствительного элемента не должен окисляться и должен иметь высокую воспроизводимость значений электрического сопротивления в интервале рабочих температур и монотонную зависимость сопротивления от температуры.

Из перечисленных металлов в наибольшей степени указанным требованиям отвечает платина, которая устойчива в воздушной среде и длительное время сохраняет свои градуировочные характеристики до температуры 750 °С. При более высокой температуре (примерно 1 000 °С) платина начинает испаряться. Недостатками платины являются высокая стоимость и нелинейная зависимость ее сопротивления от температуры.

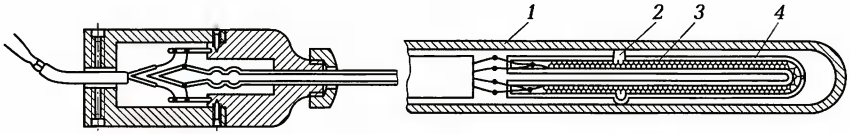


Рис. 5.3. Платиновый термометр сопротивления:

1 — защитная гильза; *2* — отверстие; *3* — стеклянная изогнутая трубка; *4* — проволочный платиновый чувствительный элемент

Платиновый термометр сопротивления состоит из проволочного платинового чувствительного элемента *4* (рис. 5.3), намотанного на стеклянную изогнутую трубку *3*, помещенных в защитную гильзу *1*. После сборки воздух из гильзы удаляют через отверстие *2*, а объем заполняют гелием и герметизируют.

Гильза предохраняет чувствительный элемент от механических повреждений, воздействия окружающей среды. Надежная работа термометров сопротивления во многом определяется высокой механической прочностью конструкции, степенью герметичности гильзы и качеством изготовления чувствительного элемента. При значительной длине чувствительного элемента (несколько сантиметров) термометр сопротивления измеряет некоторую среднюю температуру, когда его помещают в среду с неравномерной температурой.

Достоинствами термометров сопротивления являются высокая точность измерения температуры и возможность выпуска измерительных приборов к ним со стандартной градуировкой шкалы. Термометры сопротивления применяют в комплекте с логометрами, автоматическими уравновешенными мостами и автоматическими компенсационными приборами, шкалы которых отградуированы в градусах Цельсия. Градуировка прибора должна соответствовать градуировке термометра сопротивления.

Далее рассмотрим особые электрические свойства ионизированных газов.

Плазма — это частично или полностью ионизированный газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц, общий заряд которых равен нулю. Плазма подчиняется газовым законам, но проводит электрический ток и управляется магнитным полем. Для того чтобы перевести газ в состояние плазмы, необходимо хотя бы часть электронов оторвать от атомов, превратив их в ионы. Этот процесс, называемый ***ионизацией***, происходит под воздействием теплоты, излучения, электрического разря-

да. В технике для получения плазмы наиболее широко используют электрический разряд.

Механизм ионизации газа в разряде состоит в образовании лавины электронов. Этот процесс аналогичен процессу цепной реакции. Для развития лавины необходимо, чтобы воздействующее на газ электрическое поле сообщало электронам на пути их свободного пробега больше энергии, чем нужно для выбивания из атомов хотя бы еще по одному электрону. При этом достаточно образоваться в газе небольшому количеству свободных электронов, чтобы после разгона полем они начали выбивать новые электроны, количество которых начнет увеличиваться в геометрической прогрессии.

Плазму подразделяют на ***низкотемпературную***, или ***холодную***, и ***высокотемпературную***, или ***горячую***. Энергию плазмы измеряют в электронвольтах (эВ). Однако для практических целей удобнее измерять температуру ионной составляющей плазмы. Низкотемпературной холодной считается плазма, температура ионной составляющей которой $10^3 ... 10^4$ К, высокотемпературной горячей — $10^6 ... 10^7$ К. В технике используют преимущественно холодную плазму.

Человек в повседневной жизни постоянно встречается с плазмой. Так, обычное пламя обладает некоторой электрической проводимостью, а следовательно, хотя и в малой степени, но ионизировано, т. е. является плазмой. Северное сияние, светящиеся неон и аргон в лампах рекламы — это тоже плазма; короткое электрическое замыкание и молнии ионизируют газ, образуя плазму. Кроме видимых световых лучей холодная плазма испускает и невидимые УФ-лучи, а горячая плазма — также рентгеновские и инфракрасные ИК-лучи. Эти излучения имеют одинаковую природу и различаются лишь длиной волны (частотой). Так, УФ-лучи имеют длину волны 400 ... 10 нм, рентгеновские — $10^{-5} ... 10^2$ нм, а ИК-лучи — $7{,}4 \cdot 10^2 ... 2 \cdot 10^6$ нм.

Приложенное извне электрическое поле не только ионизирует газ, но и возбуждает в образовавшейся плазме электрический ток. Этот процесс называют ***газовым разрядом***. Высокочастотный газовый разряд может быть безэлектродным, так как индукционные токи, возбуждаемые переменными магнитными полями, ускоряют свободные электроны, которые ионизируют газ. При низкочастотном газовом разряде ток проходит между проводящими металлическими электродами и создает электрическое поле, которое, разделяя заряды, поляризует плазму. Для прохождения через плазму неизменяющегося тока необходимо, чтобы возника-

ющий в ней объемный заряд компенсировался приходящими извне электронами.

Так как отрицательно заряженные электроны подвижнее положительно заряженных ионов, при приложении поля они собираются положительным электродом (анодом) и образующийся между электродами столб плазмы заряжается положительно. Для прохождения тока необходимо, чтобы отрицательный электрод (катод) испускал в плазму электроны.

При низком напряжении между электродами для возбуждения эмиссии электронов на катод воздействуют коротковолновым излучением или нагревают его до высокой температуры, что соответственно приводит к возникновению фотоэффекта или термоэлектронной эмиссии. Образующийся в этом случае разряд называют ***несамостоятельным***. При высоком напряжении между электродами вследствие эмиссии электронов катода образуется разряд, называемый ***самостоятельным***. При самостоятельном разряде интенсивность эмиссии электронов ограничена, поэтому вдали от катода столб плазмы сохраняет положительный заряд и называется ***положительным столбом***.

В плотном газе при очень высоких напряжениях катод разогревается ударяющимися об него ионами газа, в результате чего образуется разряд, называемый ***горячим***, или ***дуговым***, а в разреженном газе образуется разряд, называемый ***холодным***, или ***тлеющим***. Катод при тлеющем разряде испускает электроны вследствие автоэлектронной эмиссии, при которой электрическое поле, создаваемое у поверхности металлического катода, вытягивает из него электроны. Некоторое влияние на образование тлеющего разряда оказывает также вторичная электронная эмиссия — выбивание электронов из металла катода ударяющимися о его поверхность ионами.

Процесс, обратный ионизации газа, называют ***рекомбинацией***. При этом происходят соединения ионов и электронов с образованием нейтральных атомов или молекул, которые обладают избыточной энергией, вызывающей их повторную ионизацию. Различают рекомбинацию с передачей энергии при тройных столкновениях и с излучением.

В плотной плазме происходят в основном рекомбинации при тройных столкновениях: с ионом одновременно сталкиваются два электрона, один из которых присоединяется к иону (***неупругое столкновение***), а другой поглощает избыточную энергию. В разреженной плазме происходит в основном рекомбинация с излучением, при которой энергия испускания светового кванта очень

мала, так как столкнувшиеся частицы разлетаются, обменявшись своей энергией (***упругое столкновение***).

При неупругих столкновениях частиц кинетическая энергия превращается в энергию возбуждения, ионизации или перезарядки. Если кинетической энергии достаточно для перехода электрона одного из атомов (или молекул), участвующих в столкновении, на более высокую орбиту, происходит возбуждение и излучается квант света. Если ее достаточно для отрыва электрона от атома (или молекулы), происходит ионизация. Если же при этом атом сталкивается с собственным ионом, то происходит перезарядка, т.е. ион отбирает у атома электрон и атом превращается в ион (атомный ион), а ион — в атом. Кажется, что при таком обмене ничего не изменяется, однако это не так.

Ион может ускоряться электрическим полем или удерживаться магнитным. Когда же быстрый ион отбирает у атома электрон, он превращается в быстрый атом, на который магнитное поле не действует. Никакая магнитная ловушка такой атом не удерживает, и он уходит на стенку сосуда, в котором находится газ, неся с собой кинетическую энергию, сообщенную электрическим полем. Образовавшийся при перезарядке ион — медленный и для него требуется ускорение. Такой процесс имеет место при образовании горячей плазмы.

Ионизироваться могут не только атомы, но и молекулы, из которых образуются молекулярные ионы, способные диссоциировать на атомные ионы и нейтральные частицы. В плазме возможна перезарядка, при которой ионы, сталкиваясь с атомами, отбирают у них электроны, в результате чего ионы превращаются в атомы, а атомы — в ионы. Так, многие водородсодержащие молекулы могут присоединять к себе ионы водорода (протоны). Молекулярные ионы существуют только в заряженном состоянии. Например, молекула метана может превратиться в ион CH_5^+, молекула водорода — в ион H_3^+.

Определение температуры, концентрации и состава плазмы является предметом экспериментальной физики. Среди многочисленных ***методов исследования плазмы*** наибольшее распространение получили методы спектрально-оптической, в частности эмиссионно-спектральной, масс-спектрометрической и контактной диагностики.

Широкое применение в технике получила холодная плазма. Например, плазма используется в газотронах, тиратронах, в качестве рабочего тела в реактивных двигателях (РД), а также для преобразования тепловой энергии в электрическую (в магнито-

гидродинамических (МГД) генераторах). Кроме того, холодную плазму получают в плазматронах (плазменных генераторах) и используют в металлургии, для процессов сварки, очистки поверхности и других целей.

5.3. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА

Переход теплоты из одной части пространства в другую, от одного тела к другому или внутри тела от одной его части к другой при наличии разности температур называют **теплопередачей** или **теплообменом**. Тепловые свойства материалов определяются тремя известными способами передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией и излучением (лучеиспусканием, радиацией). Механизм теплопередачи и электропередачи у металлов одинаковый — свободными электронами, поэтому хорошие проводники теплоты, как правило, являются хорошими проводниками электричества. Все металлы в той или иной степени хорошо проводят теплоту. Среди неметаллов такой закономерности не наблюдается, поскольку механизм теплопередачи другой.

Тепловые свойства материалов характеризуются рядом параметров — температурой плавления, теплопроводностью, температурным коэффициентом линейного (или объемного) расширения и др. Ознакомимся с некоторыми из них.

По **температуре плавления** различают легкоплавкие, тугоплавкие и занимающие промежуточное положение металлы. К ***легкоплавким*** металлам, применяющимся в промышленности, относятся ртуть (температура плавления –39 °С), олово (232 °С), свинец (327 °С), цинк (419 °С) и алюминий (660 °С). К ***тугоплавким*** относятся вольфрам (2 400 °С), молибден (2 695 °С), хром (1 860 °С), титан (1 800 °С) и ванадий (1 720 °С). Своеобразно ведут себя сплавы. Так, чистое железо плавится при температуре 1 539 °С, а углерод — выше 2 500 °С. При сплавлении железа с углеродом (более 2 %) образуется чугун, температура плавления которого примерно 1 130 °С, что значительно ниже температуры плавления входящих в него компонентов. Один из очень легкоплавких сплавов (67 °С) имеет состав: 4 части висмута (температура плавления 217 °С), 2 части свинца (327 °С), 1 часть кадмия (321 °С) и 1 часть олова (232 °С).

Эвтектические (легкоплавкие) сплавы — это сплавы, имеющие при соответствующем определенном соотношении компонентов

самую низкую температуру плавления для конкретной пары металлов. Например, медно-серебряный сплав ПСр72, состоящий из 28 % меди (температура плавления 1 083°С) и 72 % серебра (960 °С), имеет эвтектику с температурой плавления 779 °С.

Известны сплавы, температура плавления которых получается выше температуры плавления входящих в него компонентов. Так, сплав, состоящий из 68,5 % никеля (температура плавления 1 455 °С) и 31,5 % алюминия (660 °С), плавится при температуре 1 620 °С. Это лишний раз свидетельствует о том, что свойства сплавов могут значительно отличаться от свойств образующих их компонентов.

Для кристаллических веществ, к которым относятся металлы, температура (точка) плавления и температура (точка) затвердевания постоянны и совпадают. Для аморфных веществ (смолы, стекло) постоянной точки плавления нет. В таких случаях отмечают температуру размягчения.

Затвердевание вещества — процесс обратный плавлению. Выделяемое количество теплоты при затвердевании равно количеству теплоты, затраченной на плавление этого вещества. В данном случае действует закон сохранения энергии.

При затвердевании большинства веществ объем их уменьшается. Объем воды при замерзании увеличивается (аномалия воды). Таким же аномальным свойством обладают чугуны и некоторые другие вещества.

Скрытая теплота плавления — это количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг вещества при температуре его плавления в полностью жидкое состояние. Чтобы полностью расплавить твердое вещество, перевести его в жидкое состояние, необходимо не только нагреть его до температуры плавления, но еще затратить дополнительную тепловую энергию, которая, не повышая температуры тела, разрушает его структуру. Отсюда следует вывод о том, что твердое вещество, нагретое до температуры плавления, будет сохранять эту температуру до тех пор, пока полностью не превратится в жидкость. Повышенная мощность теплового источника может только ускорить процесс плавления, но температура расплавляемого вещества останется неизменной до его полного перехода в жидкое состояние.

Теплопроводность[1] характеризуется коэффициентом теплопроводности, показывающим количество теплоты в джоулях (Дж), проходящей за 1 с от одной точки тела к другой при разности температур на двух противоположных гранях образца

[1] Единицы измерения 1 Дж/(с · м · К) = 1 Вт/(м · К), так как 1 Дж/с = 1 Вт.

в 1 К. Среди металлов наивысшим коэффициентом теплопроводности обладает серебро — 420 Вт/(м · К), на втором месте медь — 395 Вт/(м · К).

Из неметаллов уникальные коэффициенты теплопроводности имеют бромеллитовая керамика и природные алмазы. Бромеллитовая керамика (***бромеллит***) нашла применение в технике благодаря чрезвычайно высокой теплопроводности и хорошим электроизоляционным свойствам. Теплопроводность бромеллита при 20 °С составляет $(1{,}67 \ldots 2{,}52) \cdot 10^2$ Вт/(м · К), что в 7 раз выше теплопроводности корундовой керамики (***корунда***) и соответствует уровню теплопроводности стали, алюминия и свинца. С повышением температуры бромеллита его теплопроводность резко падает, но все же остается выше теплопроводности других керамических материалов и некоторых металлов. Например, при температуре 100 °С теплопроводность бромеллитовой керамики в 2 раза меньше теплопроводности меди, но в 10 раз больше теплопроводности корундовой керамики и приближается к теплопроводности алюминия высокой чистоты. При температуре 1 000 ... 1 500 °С теплопроводность бромеллитовой керамики в 3—8 раз выше теплопроводности корундовой. Кроме того, теплопроводность бромеллита зависит от количества примесей и увеличивается с уменьшением их содержания и, наоборот, уменьшается с увеличением их содержания. На теплопроводность керамики существенно влияет ее плотность, которая снижается при увеличении пористости и соответственно повышается при ее уменьшении.

Бромеллитовая керамика имеет высокую термическую стойкость, обусловленную ее уникальной теплопроводностью. Температура плавления бромеллита составляет 2 650 °С, а максимальная рабочая температура находится в диапазоне 1 500 ... 2 316 °С. Эта керамика хорошо работает при термоциклировании. При повышении температуры ТКЛР бромеллита увеличивается и, например, для интервала температур 25 ... 600 °С этот коэффициент равен $9{,}6 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$.

Среди известных в настоящее время материалов уникальной теплопроводностью обладают природные алмазы, превосходящие в 2—6 раз по теплопроводности такой хороший проводник теплоты, как медь.

Теплопроводность алмазов I группы при 20 °С равна 9 Вт/(см · К), алмазов II группы — 24 Вт/(см · К), а удельная теплоемкость алмазов — $6{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К). Теплостойкость алмазов сравнительно невысока: при нагреве на воздухе до 800 °С и выше их частицы графитизируются.

В защитной среде водорода крупные алмазы могут выдерживать нагрев до 1 300...1 400 °С, а при нагреве до 2 000...3 000 °С в вакууме алмаз превращается в графит. Этот переход происходит медленно, но начало его заметно уже при 1 000...1 500 °С. Некоторые металлы обладают способностью частично или полностью растворять алмаз при нагреве. Так, при нагреве в присутствии железа алмаз растворяется при 800 °С и выше.

Теплопроводность алмаза зависит прежде всего от содержания в нем азота. Чем его меньше, тем теплопроводность алмаза выше.

По значению коэффициента теплопроводности все материалы можно подразделить на хорошие проводники теплоты и плохие (теплоизоляционные материалы). К хорошим проводникам теплоты относятся прежде всего металлы.

***Теплоизоляционные материалы* (*теплоизоляторы*)** — это материалы, имеющие низкую теплопроводность, обычно в пределах 0,02...0,20 Вт/(см · К), как правило, с пористостью более 60 %. Прежде всего к ним относятся строительные материалы: органические (древесно-волокнистые плиты) и неорганические (пеностекло, минеральная вата, плиты на основе асбеста). Так, кирпич как теплоизолятор значительно лучше бетона — в несколько раз, а дерево в 2—3 раза лучше кирпича. Коэффициент теплопроводности асбеста 0,21 Вт/(м · К), стекловаты 0,05...0,12 Вт/(м · К), войлока 0,05 Вт/(м · К). Для сравнения у кирпича этот параметр составляет 0,7...0,9 Вт/(м · К).

Теплоизоляторы используют для строительства печей разного назначения, тепловой изоляции паровых котлов, тепловых трубопроводов и других устройств, в которых очень важно снизить тепловые потери.

Температурный коэффициент линейного расширения разных материалов очень мал (миллионные доли первоначальной длины, измеренной при 0 °С), но его необходимо учитывать, например, в литейном производстве или при изготовлении сварных конструкций, в которых из-за неравномерного охлаждения возникают внутренние напряжения и образуются трещины. Особо важно влияние ТКЛР на точность измерительных приборов, инструмента и прецизионных устройств. Изготовление надежных металлостеклянных спаев требует применения материалов, близких по значениям ТКЛР в диапазоне рабочих температур изделий.

В измерительной технике используют ферромагнитный сплав (***инвар***) на основе железа с добавкой 36 % никеля, который имеет малый и неизменный в интервале температур –80...+100 °С ТКЛР, равный $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$. Известен ***суперинвар***, в составе кото-

рого наряду с железом содержится 32 % никеля и 4 % кобальта. Для суперинвара ТКЛР в том же интервале температур равен $1 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}. Детали из указанных сплавов используют в качестве эталонов сравнения в дилатометрах при определении ТКЛР других материалов.

Температурный коэффициент линейного расширения алмазов при 20 °С равен $8 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}, а при 100...900 °С он находится в диапазоне $(1{,}5...4{,}8) \cdot 10^{-4}$ K^{-1}.

Кратко ознакомимся с явлением диффузии, которое довольно широко используется в производстве современных материалов.

Диффузия — это процесс проникновения частиц одного вещества в другое, который может происходить в газе, жидкости и твердом теле. Для характеристики процесса диффузии в технике широко используется коэффициент диффузии.

Для описания процессов диффузии служат два закона Фика, ***первый закон Фика*** устанавливает линейное соотношение между отдельным потоком диффундирующих атомов и градиентом (разностью) их концентраций, а ***второй закон Фика*** связывает градиент концентраций с их изменениями во времени. Оба закона описываются дифференциальными уравнениями, решая которые можно определить ***коэффициент диффузии***, характеризующий число атомов, проходящих в единицу времени через единицу площади поверхности при единичном градиенте концентрации; поток атомов через данную поверхность; количество вещества, продиффундирующего за определенное время; разность концентраций легирующих компонентов (примесей) в веществе. Последний показатель — разность концентраций — является движущей силой диффузии: чем эта разница больше, тем интенсивней происходит перемещение атомов примеси из областей с большей концентрацией в области с меньшей концентрацией. Скорость диффузии зависит от температуры. Чем выше температура, тем с большей энергией и скоростью движутся атомы диффузанта (примеси) в кристаллической решетке тела. Кроме того, глубина проникновения примеси зависит и от продолжительности диффузии.

К числу наиболее известных процессов, в которых используется диффузия, можно отнести процессы горячей оцинковки стали; алитирования (диффузии алюминия в поверхность стальных и чугунных изделий); газового насыщения поверхности твердого металла (азотирование, нитрирование) и др. Указанные процессы осуществляются при высоких температурах, когда частицы жидкого или газообразного вещества проникают в поверхностный слой твердого тела.

Частицы твердого вещества также могут диффундировать и в жидкое тело. Такое явление наблюдается при изготовлении стали и сплавов, когда твердый металл растворяется в жидком.

К тепловым свойствам материалов можно отнести и метод измерения теплового сопротивления.

Тепловое сопротивление — это параметр, характеризующий изменение температуры на границе двух тел, находящихся в тепловом контакте, относительно мощности, проходящей через них. Данное явление специфично, его измеряют в тех случаях, когда очень важно передать максимальную мощность при минимальных размерах изделия с сохранением его работоспособности. Естественно, чем тепловое сопротивление изделия меньше, тем для него лучше условия работы.

Например, получение более высокого уровня отдаваемых мощностей при сохранении габаритных размеров полупроводниковых приборов требует высокоэффективных теплоотводов, которые бы рассеивали выделяемую работающим прибором теплоту. Наилучшим проводником теплоты из всех известных в настоящее время материалов является алмаз.

Наиболее ценными алмазные теплоотводы оказались для полупроводниковых приборов — генераторов СВЧ-колебаний, т. е. диодов Ганна и лавинно-пролетных диодов (ЛПД). В диодах Ганна выходная мощность в СВЧ-диапазоне ограничивается высокой рабочей температурой, так как КПД изделий, в которых используются эти диоды, уменьшается при высоких температурах и возрастает при низких. Количество теплоты, выделяемое в тонком кристалле арсенида галлия размером примерно 10 мкм, возрастает с увеличением силы тока, протекающего через кристалл. Поэтому при больших уровнях токов (для диодов с большими выходными мощностями) возникает проблема рассеяния теплоты. Диоды Ганна с использованием алмазных теплоотводов (алмаз группы IIa) имеют выходную мощность на 50 % больше при сохранении максимальной рабочей температуры для арсенида галлия. При этом их тепловое сопротивление вдвое меньше и составляет 12... 13 °С/Вт.

В ЛПД та же проблема рассеяния теплоты при больших плотностях выходной мощности, но стоит менее остро, чем в диодах Ганна, так как кремниевые кристаллы лучше проводят теплоту, чем кристаллы из арсенида галлия. Благодаря хорошей металлизации и минимальным тепловым потерям при монтаже кристаллов в корпусах с алмазными теплоотводами изготовленные ЛПД на частоте 6 ГГц имеют значительно лучший тепловой режим.

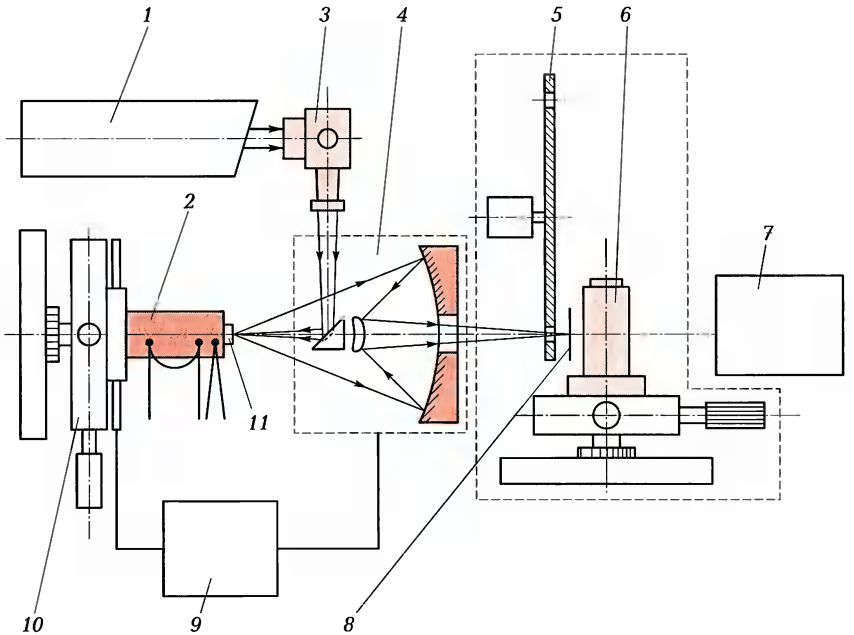


Рис. 5.4. Схема установки для измерения теплового сопротивления:
1 — твердотельный лазер; *2* — теплоотвод; *3* — оптическая система; *4* — ИК-объектив; *5* — модулятор; *6* — приемник ИК-излучения; *7* — блок усиления и преобразования электрического сигнала; *8* — фильтр; *9* — термостат; *10* — трехкоординатный столик; *11* — образец

Применение алмазных теплоотводов уменьшает общее тепловое сопротивление примерно вдвое, т.е. до 8 °С/Вт.

Алмазные теплоотводы, кроме того, увеличивают срок службы ЛПД, так как препятствуют диффузии меди из медного теплоотвода в полупроводниковую структуру, что бывает при непосредственном монтаже ЛПД на медный теплоотвод.

На рис. 5.4 показана схема установки, предназначенной для измерения теплового сопротивления бесконтактным методом. Установка включает в себя твердотельный лазер *1*, фокусирующую оптическую систему *3*, служащую для наблюдения образца *11* и точной его ориентации по отношению к излучению лазера; теплоотвод *2* с двумя термопарами (одна из них дифференциальная); трехкоординатный столик *10*, с помощью которого образец *11* выставляют в фокусе излучения лазера и оптической системы; ИК-объектив *4*, поворачивающий излучение лазера в обратную сторо-

ну сферическим и плоским зеркалами; приемник ИК-излучения *6* (фотодиод на антимониде индия); модулятор *5*, преобразующий постоянный сигнал ИК-излучения в сигнал частотой 1 кГц; фильтр *8* для задержки излучения лазера с длиной волны 1,06 мкм; блок *7* усиления и преобразования электрического сигнала; термостат *9*, стабилизирующий температуру теплоотвода; корпус ИК-объектива.

При измерении определяют температуру нагревания образца и температуру нагревания теплоотвода, находящегося в контакте с образцом. Разница температур, отнесенная к мощности излучения лазера, прошедшего через образец, и будет тепловым сопротивлением системы образец — теплоотвод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие металлы относятся к магнитным?
2. Какие частицы являются носителями электрических зарядов в разных материалах?
3. Что такое теплопроводность?
4. Какие металлы и неметаллы обладают наивысшей теплопроводностью?
5. Что называют скрытой теплотой плавления?

Глава 6

ПОЛУПРОВОДНИКИ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

6.1. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники, как показывает само название, занимают промежуточное место между проводниками (металлами) и диэлектриками (изоляторами). В тысячи, десятки и сотни тысяч раз разные полупроводники хуже проводят электрический ток, чем металлы, и отличаются от них тем, что проводимость полупроводников в очень большой степени зависит от содержания в них примесей и их природы. В металлах подобная зависимость тоже наблюдается, но не в такой степени. Введя доли процента примеси в полупроводник, можно изменить его электрическое сопротивление в десятки и сотни тысяч раз. ***Содержание примесей*** настолько мало, что его трудно измерять в долях процента, поэтому в полупроводниках содержание примесей определяют концентрацией их атомов в кубическом сантиметре.

Так, если, исходя из плотности, германий и кремний содержат по 10^{22} атомов вещества в 1 $см^3$ (атомов/$см^3$), то чистым, например, германий считается в том случае, если примесей в нем будет не более 10^{12} атомов/$см^3$ вещества. Создав концентрацию примесей 10^{18}—10^{19} атомов/$см^3$ вещества, можно снизить сопротивление полупроводника по сравнению с чистым кристаллом в сотни тысяч и миллионы раз. Повысить содержание примесей выше 10^{20} атомов/$см^3$ вещества не удается, так как это превышает предел растворимости.

Монокристаллы, например кремния, выращивают из расплава следующим образом: подготовленный и очищенный полупроводниковый материал нагревателем *5* (рис. 6.1) расплавляется в графитовом тигле *7*, изготовленном из материала очень высокой чистоты. В расплав *6* добавляют полупроводник с известным содержанием необходимой примеси. Зная массу материала и примеси

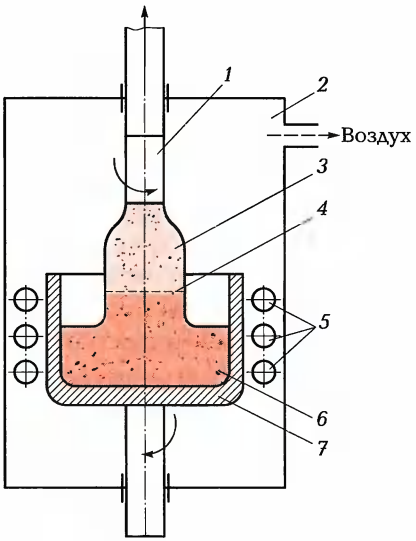


Рис. 6.1. Выращивание монокристалла кремния из расплава:

1 — затравка; *2* — вакуумная камера; *3* — слиток; *4* — граница затвердевания; *5* — нагреватель; *6* — расплав; *7* — тигель; ⟶ — направление движения затравки с тиглем

в тигле, можно рассчитать концентрацию примеси, которая получится в готовом монокристалле. При выращивании монокристаллов в тигель опускают затравку — кусочек полупроводника с соответствующей ориентацией кристаллической решетки. Для получения ***равномерного распределения примеси*** обеспечивают непрерывное вращение тигля и затравки *1*, причем затравка вращается в противоположную по отношению к вращению тигля сторону и одновременно с определенной скоростью вытягивается из расплава, увлекая за собой расплав, который затвердевает на границе *4*, сохраняя ориентацию кристаллической решетки затравки. Постепенно из тигля вытягивается слиток *3* с единой ненарушенной кристаллической структурой, присущей монокристаллу, длина которого может быть примерно 1 м при диаметре 150 мм. Процесс выращивания осуществляется в вакуумной камере *2* или в атмосфере инертного газа.

Для производства полупроводниковых приборов нужен не просто монокристалл, а монокристалл, имеющий заданный тип проводимости — электронный (отрицательный) *n* или дырочный (положительный) *p*. Для этого в процессе выращивания монокрис-

талла в расплав вводят примесь, т.е. его легируют. Если добавленное в расплав вещество принадлежит III группе Периодической системы химических элементов Д.И.Менделеева, то монокристалл будет иметь ***дырочный тип проводимости*** (*p*-тип), и примесь в этом случае называют ***акцепторной***. Если полупроводник легировать элементом V группы Периодической системы, то монокристалл получит ***электронный тип проводимости*** (*n*-тип), и примесь называют ***донорной***. В обоих случаях полупроводник теряет собственную проводимость и становится полупроводником с дырочным или электронным типом проводимости соответственно. Концентрация примесей, введенных в полупроводник, может изменяться в пределах 10^{14}—10^{19} атомов/см^3 вещества, а его проводимость увеличится в сотню тысяч раз.

Прежде чем из монокристалла сделают полупроводниковый прибор, он должен претерпеть много разных операций. Необходимо выявить ориентацию слитка по заданным кристаллографическим направлениям, затем разрезать на пластины, отполировать их, многократно очистить, ввести каким-либо способом другую примесь, чтобы создать противоположный тип проводимости, перемежая это с процессами фотолитографии и т.д. Конечными операциями являются разделение полупроводниковой пластины с активными структурами на отдельные кристаллы, монтаж в корпусе, присоединение электродных выводов, герметизация и контроль электрических параметров.

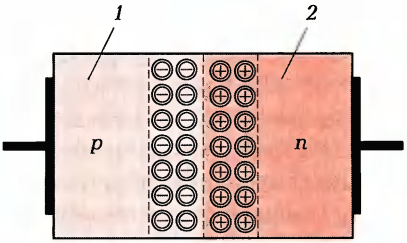
6.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

В заключение кратко ознакомимся с полупроводниковыми приборами, а именно с диодами, транзисторами и микросхемами. Основу полупроводникового прибора составляет кристалл полупроводникового материала (полупроводника — германия, кремния, арсенида галлия и др.) с одним или несколькими электронно-дырочными переходами. ***Электронно-дырочный переход*** представляет собой систему, состоящую из полупроводника с разными типами проводимости — электронной *n* и дырочной *p*, разделенного запорным слоем, обедненным носителями и образующимся вследствие диффузии вблизи границы областей перехода.

Схема электронно-дырочного перехода в монокристалле кремния показана на рис. 6.2. Представим себе, что в правую часть монокристалла полупроводника введено небольшое количество

Рис. 6.2. Схема электронно-дырочного перехода в монокристалле кремния:

1, *2* — полупроводники соответственно с дырочным (*p*) и электронным (*n*) типом проводимости



донорной примеси, создающей *n*-тип проводимости, а в левую — акцепторной, создающей *p*-тип проводимости. Атомы-доноры и атомы-акцепторы в структуре монокристалла устанавливают определенные связи с соседними атомами. ***Атомы-доноры***, имея на внешней орбите по пять электронов, легко теряют один из них, превращаясь в положительные ионы. При этом свободные электроны становятся носителями тока и эта область полупроводника приобретает проводимость *n*-типа. ***Атомы-акцепторы***, имея на внешней орбите по три электрона, легко захватывают по одному электрону соседних атомов монокристалла, превращаясь в отрицательные ионы. Освобожденные от электронов атомы монокристалла становятся положительно заряженными ионами. При отсутствии электронов в их структуре образуются «дырки», которые становятся носителями тока, и эта область полупроводника приобретает проводимость *p*-типа.

Границей между областями *p*- и *n*-типа проводимости является переход. Первоначально носители тока (электроны и дырки) свободно переходят из одной области в другую и соединяются (рекомбинируют) между собой, превращаясь в связанные или валентные электроны, т. е. происходит диффузия носителей. При этом подвижные частицы стремятся диффундировать из области с более высокой концентрацией в область с меньшей концентрацией. Процесс диффузии продолжается до тех пор, пока концентрации диффундирующего вещества не выравнятся. В электронно-дырочном переходе этого не происходит, так как каждый примесный ион (заряд) неподвижен. Носители тока (подвижные заряды), передвигаясь, оставляют неподвижные ионы противоположного знака заряда, которые постепенно накапливаются и удерживают около себя подвижные заряды. Таким образом, вблизи *p*—*n*-перехода образуется равновесная концентрация носителей тока разных знаков.

Донорами являются элементы V группы Периодической системы элементов (фосфор, мышьяк, сурьма и др.), а акцепторами — элементы III группы (бор, алюминий, галлий и др.).

Основным свойством электронно-дырочного перехода является способность очень хорошо проводить ток в одном (прямом) направлении и практически не проводить его в другом (обратном). Иначе такое поведение электронно-дырочного перехода называют работой в режиме пропускания или запирания. Рассмотрим работу электронно-дырочного перехода при пропускании прямого тока (в прямом направлении) и обратного тока (в обратном направлении).

Если положительный электрод внешнего источника питания приложить к дырочной области кристалла (рис. 6.3, *а*), а отрицательный — к электронной, то положительные дырки и отрицательные электроны, отталкиваясь от одноименно заряженных электродов, будут перемещаться навстречу одни другим через обедненный зарядами запорный слой. По электронно-дырочному переходу пойдет ток значительной величины даже при малом напряжении.

Если сменить полярность на обратную (рис. 6.3, *б*), то разноименно заряженные электроды источника питания будут оттягивать электроны и дырки от границы запорного слоя, который еще больше обеднится зарядами и станет еще шире, чем был до приложения обратного напряжения. Ток, проходящий через этот слой, будет очень мал.

На описанном примере действия электронно-дырочного перехода, т. е. диода, работает выпрямитель переменного тока, который пропускает, например, положительную часть синусоиды и не пропускает отрицательную.

Так в первом приближении можно объяснить принцип действия электронно-дырочного перехода.

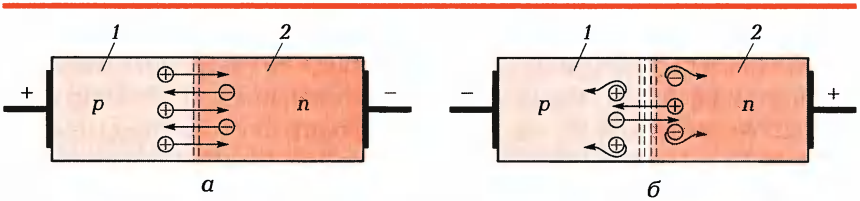


Рис. 6.3. Схема электронно-дырочного перехода в открытом (*а*) и закрытом (*б*) режимах работы:

1, *2* — полупроводники соответственно с дырочным (*p*) и электронным (*n*) типом проводимости

Диоды — полупроводниковые приборы, предназначенные для выпрямления переменного тока, преобразования электрических колебаний одной частоты в колебания другой частоты, детектирования, а также стабилизации электрического тока и напряжения. Диоды имеют один $p—n$-переход и две неоднородные области: базовую исходного полупроводникового материала (например, n-типа проводимости) и эмиттерную другого типа проводимости (p-типа), созданную в процессе легирования.

Транзисторы — полупроводниковые приборы, предназначенные для генерирования и усиления электрических колебаний, усиления мощности, преобразования напряжения, а также переключения в разных схемах электронных устройств. Транзисторы имеют два $p—n$-перехода и три области — эмиттерную, базовую и коллекторную (например, $p—n—p$ или $n—p—n$). Полупроводниковые приборы могут также иметь большее количество $p—n$-переходов и неоднородных областей.

В зависимости от вида носителей транзисторы подразделяют на биполярные (носителями являются как электроны, так и дырки) и униполярные (носителями являются дырки или электроны).

Биполярные транзисторы — это обычные полупроводниковые приборы, для изготовления $p—n$-переходов которых необходим высококачественный монокристаллический полупроводниковый материал.

Униполярные, или ***полевые***, ***транзисторы*** (изменением тока прибора они управляют электрическим полем) подразделяют на диффузионные полевые и металл-оксид-полупроводниковые (МОП-транзисторы).

В полевых транзисторах ток проходит через полупроводниковый канал между двумя электродами — истоком и стоком. Различают МОП-транзисторы с диффузионным (пропускают ток при отсутствии напряжения на затворе, т.е. нормально включенные) и индуцированным (не пропускают ток при отсутствии напряжения на затворе, т.е. нормально выключенные) каналами. Электрод, управляющий шириной канала, называют ***затвором***.

Транзисторы ***с диффузионным каналом*** работают в режиме обеднения или обогащения (соответственно уменьшается или увеличивается поступление основных носителей), а транзисторы с индуцированным каналом — только в режиме обогащения.

В МОП-транзисторах с ***индуцированным каналом*** потребляется мало электроэнергии, они обладают высоким входным сопротивлением ($10^{15}...10^{16}$ Ом); кроме того, при нулевом напряжении на затворе ток также равен нулю. Эти транзисторы могут иметь

каналы *n*- или *p*-типа, основными носителями тока в которых соответственно являются электроны или дырки. По исполнению МОП-транзисторы могут быть на одной подложке, без разделения, так как их затворы изолированы от подложки.

Разработаны пленочные полевые транзисторы с изолированными затворами на основе поликристаллических пленок полупроводниковых материалов.

Микросхемы, или **интегральные схемы**, — полупроводниковые приборы, представляющие собой одно или несколько функциональных устройств (усилитель, мультивибратор и др.) и состоящие из активных (диоды, транзисторы) и пассивных (резисторы, емкости, индуктивности, токопроводящие дорожки) компонентов, которые загерметизированы в одном блоке (корпусе) или залиты (опрессованы) пластмассой.

Микросхемы могут быть двух типов: полупроводниковые и тонкопленочные.

Полупроводниковая микросхема — это монолитная, физически неразделимая структура в виде полупроводникового кристалла, активные и пассивные компоненты которой находятся одновременно в объеме и на поверхности.

Тонкопленочная микросхема — это монолитная структура, пассивные и активные компоненты которой нанесены на поверхность диэлектрической подложки в виде пленок.

Кроме того, развитие получила гибридная технология тонкопленочных микросхем (условно тонкими считаются пленки толщиной от тысячных долей микрометра до нескольких микрометров). В гибридных микросхемах пассивные компоненты наносят в виде пленок на диэлектрические подложки, а активные монтируют в виде навесных дискретных (отдельных) элементов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое полупроводник?
2. От чего зависит электропроводность полупроводников?
3. Что такое тепловое сопротивление?
4. Как работает электронно-дырочный переход?

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

IV

ЧАСТЬ

Глава 7. Материалы для режущих инструментов

Глава 8. Материалы для штампов, пресс-форм и измерительных инструментов

Глава 7

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

7.1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Инструментальные материалы подразделяют на углеродистые, легированные и быстрорежущие стали, твердосплавные (металлокерамические, спеченные), минералокерамические, алмазные, алмазоподобные и сверхтвердые материалы.

Инструментальная сталь — это сплав с высокими показателями твердости, износостойкости, прочности, предназначенный для изготовления инструментов или их рабочих частей.

Инструментальные углеродистые стали содержат углерод в пределах 0,6...1,3 % и предназначены для работы при невысоких скоростях резания (до 10 м/мин) с нагреванием рабочих кромок инструмента до 220 °С. Их можно классифицировать на ***качественные*** — У7, У8, У9, У10, У11, У12 и У13 и ***высококачественные*** — У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А и У13А (ГОСТ 1435—74), где буква «У» в марке обозначает углеродистую сталь, а последующие цифры — среднее содержание углерода в десятых долях процента; буква «А» в конце марки — сталь высококачественная и чистая по содержанию серы, фосфора (суммарно менее 0,05 %) и остаточных примесей, неметаллических включений и с ограниченными пределами содержания марганца и кремния.

Некоторые металлорежущие инструменты показаны на рис. 7.1. Например, ружейное сверло (рис. 7.1, *а*) имеет жесткую конструкцию и предназначено для получения гладких стенок отверстия и точного расположения его оси. Зенкеров существует много, один из них (рис. 7.1, *б*) служит для изготовления конических углублений в уже готовых отверстиях. Перед сверлением отверстий, требующих точного расположения, обычно выполняют зацентровку, используя центровочное сверло (рис. 7.1, *в*). Этими же сверлами пользуются, когда требуется создать опору для поддер-

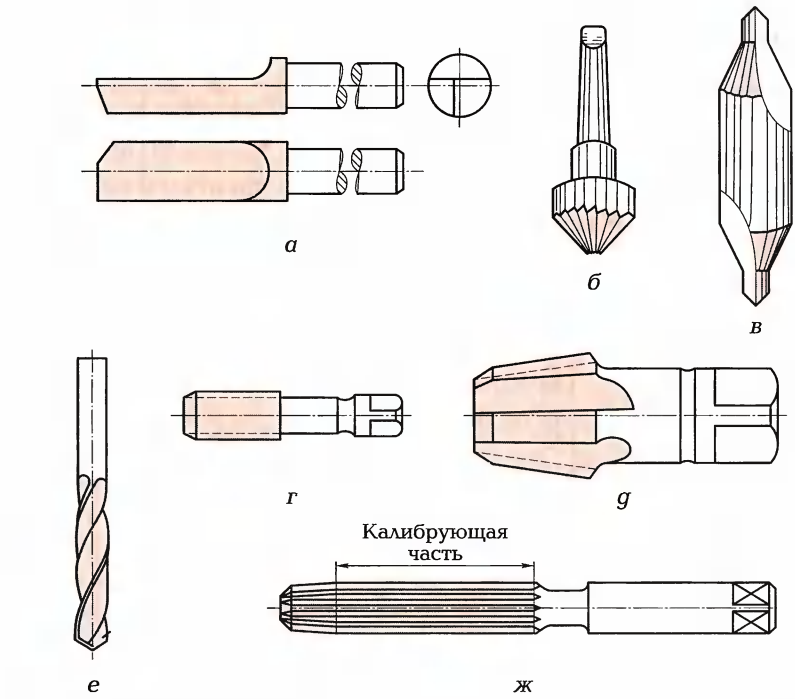


Рис. 7.1. Металлорежущий инструмент:

а — ружейное сверло; *б* — зенкер для конических углублений; *в*, *е* — центровочное и спиральное сверла; *г*, *д* — цилиндрический и конический метчики для нарезания внутренних соответствующих резьб; *ж* — цилиндрическая развертка

живающего центра при обработке заготовки, например, на токарном станке.

Машинные (используются в основном для работы на станках) метчики служат для нарезания внутренней и цилиндрической (рис. 7.1, *г*) и конической (рис. 7.1, *д*) резьб. Спиральное сверло (рис. 7.1, *е*) широко применяется в обработке различных материалов резанием. Для окончательной отделки отверстий с получением заданных размеров и шероховатости в данном случае применена цилиндрическая развертка (рис. 7.1, *ж*). Развертками пользуются прежде всего тогда, когда другими способами изготовить отверстие невозможно или нецелесообразно.

Инструменты массового производства (сверла, зенкеры, зенковки, развертки, метчики, плашки, напильники и др.) изготавливают из инструментальных углеродистых сталей У12А и реже из

Таблица 7.1. Химический состав, температура закалки и отпуска инструментальных сталей (для режущего инструмента)

Марка стали	Химический состав, мас. %						Режим термической обработки			
	Углерод	Марганец	Кремний	Хром	Вольфрам	Ванадий	Температура закалки, °С	Охлаждающая среда	Температура отпуска, °С	Твердость после отпуска HRC
У8	0,75...0,84	0,20...0,40	0,15...0,35	До 0,20	—	—	790...820	Вода или масло	160...170	60...62
У10	0,95...1,04	0,15...0,35	0,15...0,35	До 0,20	—	—	770...790	То же	160...170	61...63
У12	1,15...1,24	0,15...0,35	0,15...0,35	До 0,20	—	—	760...780	»	160...170	62...64
ШХ15	0,95...1,10	0,20...0,40	0,15...0,35	1,30...1,65	—	—	835...855	Масло	160...170	62...65
ХГ	1,30...1,50	0,45...0,70	0,15...0,35	1,30...1,60	—	—	840...860	»	160...170	63...66
ХВГ	0,90...1,05	0,80...1,10	До 0,35	0,90...1,20	1,2...1,6	—	820...840	»	160...170	62...64
ХВ5	1,25...1,50	До 0,30	До 0,35	0,40...0,70	4,5...5,5	0,15...0,30	820...860	»	130...150	64...67
9ХС	0,85...0,95	0,30...0,60	1,20...1,60	0,95...1,25	—	—	840...870	»	160...170	61...65
Р18*	0,70...0,80	До 0,40	До 0,40	3,80...4,40	17,5...19,0	1,00...1,40	1 280...1 300	»	550...570	63...65
Р9*	0,85...0,95	До 0,40	До 0,40	3,80...4,40	8,5...10,0	2,00...2,60	1 230...1 260	»	550...570	63...65

*В случае введения молибдена за счет вольфрама марки стали соответственно будут Р18М и Р9М.

У11А и У10А. Когда требуются высокие скорости обработки, указанный инструмент производят из инструментальных легированных хромом, вольфрамом, ванадием, марганцем и другими элементами сталей 9ХС, ХВГ, ХГ и др., работоспособность которых ограничивается нагревом до 400 °С.

Металлорежущий инструмент работает в тяжелых условиях, в зависимости от конкретных условий выбирают инструмент, изготовленный из соответствующей стали. Быстрорежущая сталь, пригодная для изготовления всего ассортимента металлорежущего инструмента, дорога, так как содержит дефицитный вольфрам, иногда молибден. Быстрорежущую сталь используют в случаях, когда замена на другие материалы нецелесообразна. Из этой стали делают сверла, зенкеры, фрезы, метчики, плашки, долбяки, шеверы, протяжки, резцы и др.

Из быстрорежущих сталей Р6М5, Р6М3, Р18, Р9, Р9Ф5 исполняют инструмент нормальной производительности, а из сталей Р18Ф2, Р14Ф4, Р6М5К5, Р10К5Ф5 (ГОСТ 19265—73) и др. — инструмент, способный обеспечивать повышенную производительность. Быстрорежущий инструмент может работать при температурах свыше 600 °С, сохраняя свои режущие свойства, т.е. он обладает красностойкостью.

Весь инструмент, изготовленный из инструментальных материалов, подвергают термической обработке (закалке и отпуску). В результате инструмент из углеродистых сталей имеет твердость 60...64 HRC, из легированных — 62...67 HRC, а из быстрорежущих — 63...65 HRC (для инструмента нормальной производительности) и 70...78 HRC (для инструмента повышенной производительности).

В табл. 7.1 приведен химический состав и режим термической обработки наиболее применяемых инструментальных сталей.

7.2. ТВЕРДОСПЛАВНЫЕ И МИНЕРАЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Твердый сплав — это спеченный композиционный материал, состоящий из порошков карбидов вольфрама, титана, тантала, молибдена, ванадия или ниобия и связки — металлического кобальта (никеля), получаемый методом спекания.

Спеканию предшествуют процессы смешения тонко размолотых (размером 1...4 мкм) порошков карбидов и связки в опреде-

ленном соотношении, прессования смеси порошков при давлении 0,10...0,15 МПа (1...1,5 кбар) и последующей термической обработки при температуре 1 390...1 600 °С в течение 1...2 ч в зависимости от размеров изделия.

Преимущественное применение в производстве твердых сплавов получили карбиды вольфрама, титана, тантала и цементирующая их связка — кобальт, поэтому ознакомимся с ними более подробно. При спекании кобальт частично оплавляется и растворяет карбиды вольфрама, титана и тантала, при этом образуется монолитное соединение и получается исключительно высокой твердости (85...90 HRC) износостойкий и красностойкий материал, способный работать при температуре 1 000...1 100 °С. Недостатком твердых сплавов является их хрупкость, особенно при вибрациях, и значительная стоимость исходных компонентов.

Твердые сплавы по составу подразделяют на три основные группы: ВК, ТК и ТТК (ГОСТ 17163—82, ГОСТ 25395—82, ГОСТ 25396—82 и др.).

Твердые сплавы группы ВК — однокарбидные, вольфрамокобальтовые (состоят из зерен карбида вольфрама, сцементированных кобальтом). Инструмент из этих сплавов предназначен для обработки чугуна, цветных металлов, сплавов и неметаллических материалов. В марках твердых сплавов данной группы после букв «ВК» цифрами указывают процентное содержание кобальта в сплаве. Например, в сплаве ВК8 содержится 8 % кобальта, 92 % карбида вольфрама. Буква «В» в конце обозначения марки (например, ВК6В) означает, что сплав крупнозернистый (величина зерен 3...5 мкм), а буква «М» (например, ВК3М) — сплав мелкозернистый (0,5...1,5 мкм).

Твердые сплавы группы ТК — двухкарбидные, титановольфрамокобальтовые (состоят из зерен твердого раствора карбида вольфрама в карбиде титана и избыточных зерен карбида вольфрама, сцементированных кобальтом, или только из зерен твердого раствора карбида вольфрама в карбиде титана, также скрепленных между собой кобальтом). Сплавы этой группы предназначены для всех видов обработки сталей. В обозначении марок сплавов этой группы после буквы «Т» цифрами указывается процентное содержание карбида титана, а после буквы «К» — процентное содержание кобальта. Например, в сплаве Т10К15 содержится 10 % карбида титана, 15 % кобальта и 75 % карбида вольфрама.

Твердые сплавы группы ТТК — трехкарбидные, титанотанталовольфрамокобальтовые (состоят из зерен твердого раствора

карбидов титана, тантала, вольфрама и избыточных зерен карбида вольфрама, прочно соединенных между собой кобальтом). Инструмент из этих сплавов используют для особо тяжелых случаев обработки сталей. В марках данного сплава после букв «ТТ» указывают суммарное процентное содержание карбидов титана и тантала, а после буквы «К» — процентное содержание кобальта. Например, в сплаве ТТ7К12 содержится 7 % карбидов титана и тантала, 12 % кобальта и 81 % карбида вольфрама.

Каждая марка твердого сплава имеет свое назначение. Поэтому очень важно грамотно выбрать нужный инструмент для получения наивысшей производительности. Например, твердый сплав ВК8 является наиболее вязким и прочным, предназначен для черновой и получистовой обработки чугуна, цветных металлов и сплавов при изменяющихся условиях резания, ударах и вибрации. Твердый сплав Т5К10 аналогичен твердому сплаву ВК8 по своим свойствам и условиям резания, но предназначен для черновой обработки углеродистой и легированной сталей. Инструмент с пластинами из сплава Т30К4 обладает очень высокими твердостью и износостойкостью, но хрупок и поэтому должен использоваться для обработки стали с непрерывным снятием тонкой стружки на высоких скоростях резания. Области применения инструмента с твердосплавными пластинами приведены в табл. 7.2.

В производстве твердый сплав используют в двух видах: спеченном и литом (пластифицированном).

Спеченный твердый сплав применяется в виде разных по форме и назначению пластинок преимущественно для режущего и измерительного инструмента, а также заготовок, предназначенных для доработки (это могут быть заготовки пуансонов матриц и другого инструмента, которые далее с помощью электроискровой или алмазной обработки доводятся до заданных чертежом размеров).

Литой (пластифицированный) твердый сплав используют, когда необходимую деталь невозможно получить из спеченных заготовок. Сплав в этом состоянии мягок, податлив, оставляет на бумаге след, как грифель карандаша. Из него на металлорежущем оборудовании изготовляют нужные детали (пуансоны, матрицы) с учетом усадки и припусков на обработку, затем спекают и, наконец, доводят, как правило, алмазным инструментом до нужной кондиции.

Много специального инструмента для собственных нужд изготовляют своими силами на металлообрабатывающих предприяти-

Таблица 7.2. Области применения твердых сплавов некоторых марок

Вид обработки	Марки твердых сплавов, предназначенных для обрабатываемого материала					
	Сталь легированная и стальное литье	Чугун (НВ < 200)	Ковкий чугун и отбеленный чугун (НВ > 200)	Цветные металлы	Пластмасса	Стекло, фарфор
Точение:						
обдирочное с ударной нагрузкой	Т5К10	ВК8, ВК6	ВК8, ВК6	ВК6, ВК8	ВК6	—
то же, с переменной	Т5К10, Т15К6	ВК6, ВК8	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6, ВК3
то же, при постоянной глубине резания	Т5К10, Т15К6	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6, ВК3
полуобдирочное	Т15К6	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6, ВК3
чистовое	Т15К6, Т30К4	ВК3, ВК6	ВК6	ВК6	ВК6, ВК3	ВК6, ВК3
тонкое	Т30К4	ВК3	ВК6	ВК6	ВК3	ВК3
Фрезерование:						
обдирочное	Т15К6, Т15К10	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6, ВК3
чистовое	Т15К6	ВК6	ВК6	ВК6	ВК3	—
Скоростное резьбофрезерование	Т15К6, Т30К4	—	—	—	—	—

Строгание:						
обдирочное	Т5К10	ВК8	ВК8	ВК8	—	—
чистовое	Т5К10	ВК6	ВК6	ВК8	—	—
Сверление	Т5К10, ВК8	ВК6, ВК8	ВК6	ВК6	ВК6	ВК6, ВК3
Зенкование	Т15К6, Т5К10	ВК6	ВК6	ВК6	—	—
Развертывание	Т15К6, Т5К10	ВК6	ВК6	ВК6	—	—

ях. Главное при этом — создать технологический процесс закрепления режущих пластин (твердосплавных, быстрорежущих) на державках. Ознакомимся с производством инструмента на примере напайки **твердосплавных пластин** на державки резцов (рис. 7.2).

В державках резцов фрезеруют пазы, по форме и размеру соответствующие твердосплавным пластинам *1* (см. рис. 7.2, *а*, *б*), снимают заусенцы и обезжиривают с помощью четыреххлористого углерода, бензина или горячего раствора каустической соды.

Твердосплавные пластины отбирают по внешнему виду, отбраковывая коробленые, с трещинами, со сколами и другими дефектами. Поверхность пластин, подлежащую пайке, выравнивают шлифовальным абразивным кругом из зеленого карбида кремния или подвергают химической обработке в растворе медного купороса, а непосредственно перед пайкой обезжиривают в тетрахлорметане. Обычно обезжиривание пластин совмещают с нанесением флюса. Для этого пластины ВК погружают на 5...10 мин в кипящий насыщенный водный раствор буры, а пластины ТК — в такой же раствор фторида калия. После извлечения пластин из растворов на них остается достаточный слой флюса.

Прокладки (компенсатор *3*) разгружают спай от напряжений как в процессе пайки, так и при работе резцов с изменяющимися условиями резания. Материалом прокладок может служить малоуглеродистая сталь, низколегированная сталь, сплав железа с никелем (пермаллой) в виде ленты, фольги или сетки толщиной 0,2...0,3 мм. Вырезанные с некоторым запасом компенсационные прокладки обезжиривают, а непосредственно перед пайкой наносят флюс аналогично тому, как это делают на твердосплавных пластинах. Твердосплавные пластины паяют припоями *2* — медно-никелевыми (рабочая температура инструмента до 900 °С), медными (300...400 °С), латунными (150...200 °С) и др. Припой из ленты (фольги) толщиной 0,15...0,5 мм вырезают по форме твердосплавных пластин с припуском, освобождая их от заусенцев, и обезжиривают непосредственно перед пайкой. Аналогично другим деталям на припой можно нанести флюс.

Напаивают твердосплавные пластины в печах разного типа, пламенем сварочной горелки, на электроконтактных машинах, в ваннах с расплавленными припоем или солями, в термических установках с защитной газовой атмосферой и на установках ТВЧ, которые широко применяются в производстве как наиболее дешевые, простые и обеспечивающие высокое качество напайки. Для напайки ТВЧ необходимо иметь ВЧ-генератор, водоохлажда-

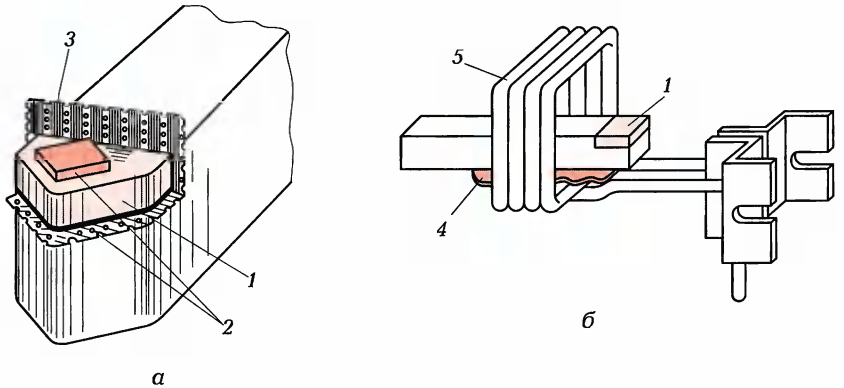


Рис. 7.2. Напайка твердосплавной пластины на державку резца:

а — резец, подготовленный к напайке; *б* — положение резца в процессе напайки; *1* — пластина; *2* — припой; *3* — компенсатор; *4* — асбестовая прокладка; *5* — ВЧ-индуктор

емый трубчатый индуктор, рычажный (или иной) пресс и термошкаф.

Резец (см. рис. 7.2, *а*), подготовленный к пайке и посыпанный дополнительно сверху флюсом (бурой), помещают в ВЧ-индуктор *5* (см. рис. 7.2, *б*), в котором резец в определенном режиме нагревают на асбестовой прокладке *4* до расплавления припоя. Затем резец извлекают из индуктора и фиксируют правильное положение твердосплавной пластины на державке с помощью пресса, после чего резец помещают в теплоизолирующую среду (шкаф) для медленного охлаждения. Применительно к конкретному виду инструмента создается свой технологический процесс, учитывающий специфику изделий.

Минералокерамические материалы, или **минералокерамика**, **керметы** — это искусственные жаростойкие материалы, хорошо работающие в агрессивных средах, получаемые прессованием и спеканием керамических (оксид алюминия) и металлических порошков. По сравнению с твердыми сплавами минералокерамика обладает более высокими стойкостью, твердостью и теплостойкостью, сохраняет режущие свойства до 1 200 °С, позволяет обрабатывать металл при больших скоростях резания. К недостаткам пластин из минералокерамики, например ЦМ-332, следует отнести меньший в 3—4 раза предел прочности, очень низкую теплопроводность, что вызывает образование трещин при быстром нагревании и охлаждении, а также трудность их присоединения

к стальным державкам с помощью пайки, так как припой не смачивает минералокерамику. Как правило, такие пластинки закрепляют механическим способом. Минералокерамику применяют для обработки твердых сплавов, чугунов, цветных металлов и неметаллических материалов при высоких скоростях резания (150...500 м/мин).

Желательно инструмент из минералокерамики использовать при обработке крупных деталей, так как выкрашиваются и скалываются режущие кромки при входе и выходе инструмента из контакта с изделием.

7.3. АЛМАЗЫ И АЛМАЗОПОДОБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Алмазы, алмазоподобные и сверхтвердые материалы нашли широкое применение в машиностроении, авиационной, электро- и радиотехнической промышленности, а также в других отраслях производства для изготовления всевозможных инструментов. Объясняется это возросшими требованиями к точности и качеству обработки деталей современных машин и приборов, изготовляемых из новых высокопрочных, износостойких и термостойких материалов.

Ознакомление с указанной группой материалов начнем с рассмотрения свойств природных алмазов.

Природный алмаз — минерал, относящийся к классу драгоценных камней, представляет собой почти чистый углерод. Алмазы в основном являются диэлектриками, но могут быть и полупроводниками, обладают наивысшей твердостью, а также высокой стойкостью к действию кислот и щелочей. Их плотность, равная 3,47...3,55 г/см^3, зависит от количества и свойств включений.

Весьма ценны механические свойства алмазов. Кроме высокой твердости алмазы имеют самый высокий модуль упругости и самый малый коэффициент сжатия из всех известных природных материалов. Расчетная прочность алмаза на разрыв равна $7{,}9 \cdot 10^4$ МПа. Алмазы обладают также низким коэффициентом трения (0,1) и высокой износостойкостью.

Алмаз нерастворим в плавиковой, соляной, серной и азотной кислотах даже при больших концентрациях и нагреве до высоких температур. Такой травитель, как царская водка (смесь азотной и соляной кислот), также не действует на алмаз. Растворя-

ется алмаз только в расплавленной натриевой или калиевой селитре и соде, а в смеси серной кислоты с дихроматом калия частично окисляется. Расплавленные карбонаты щелочей при 1 000 ... 1 200 °С превращают алмаз в оксид углерода. Сера слабо реагирует с алмазом при температуре 600 °С. Алмаз не смачивается водой, но обладает способностью прилипать к некоторым жировым составам.

В зависимости от количества и местоположения дефектов в кристаллической решетке алмазы классифицируют на ***группы***, обозначаемые римскими цифрами I, II и III, а каждую группу подразделяют на подгруппы, обозначаемые буквами «а», «б». Теплопроводность алмазов I группы при 20 °С равна 9 Вт/(см · К), II группы — 24 Вт/(см · К), а удельная теплоемкость алмазов — в среднем $6{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К).

Теплостойкость алмазов сравнительно невысока: при нагревании на воздухе до 800 °С и выше их частицы графитизируются. В защитной среде (водороде) крупные алмазы могут выдерживать нагрев до 1 300 ... 1 400 °С. Нагрев в вакууме до 2 000 ... 3 000 °С приводит к превращению алмаза в графит. Этот переход происходит медленно, но начало его заметно уже при 1 000 ... 1 500 °С. Некоторые металлы обладают способностью частично или полностью растворять алмаз в условиях нагревания. Так, при нагревании железа алмаз растворяется в нем при 800 °С и выше.

Температурный коэффициент линейного расширения алмазов при 20 °С равен $8 \cdot 10^{-7}$ $К^{-1}$, а при 100 ... 900 °С он составляет $(1{,}5 ... 4{,}8) \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$.

Диэлектрические свойства алмаза характеризуются высоким удельным электрическим сопротивлением, которое при комнатной температуре составляет $10^{12} ... 10^{14}$ Ом · см. Встречаются алмазы (например, голубого цвета), удельное электрическое сопротивление которых значительно ниже. Удельное электрическое сопротивление алмазов-полупроводников (группа IIб) при 20 °С изменяется в интервале 10 ... 1 000 Ом · см. Диэлектрическая проницаемость алмазов при 27 °С и частоте до 3 кГц равна 5,6.

Между теплопроводностью и способностью алмазов поглощать (пропускать) ИК- и УФ-лучи существует определенная зависимость, которая может быть положена в основу их классификации. Теплопроводность алмазов зависит от содержания в них азота: чем оно ниже, тем теплопроводность алмазов выше. Таким образом, по содержанию азота и способности алмазов поглощать (или пропускать) указанные лучи с помощью спектрофотометрии можно отбирать алмазы, пригодные для использования в качестве теп-

лоотводов. Алмазы группы IIа, имеющие наименьшее поглощение ИК-лучей, содержат примерно 0,02 % азота, поэтому обладают наивысшей теплопроводностью и могут быть использованы в качестве теплоотводов в полупроводниковых приборах.

Наряду с достоинствами алмазы обладают некоторыми недостатками. Технические алмазы имеют незначительные размеры (0,8 ... 1 мм), а также наружные и внутренние трещины (так как они хрупки), низкий ТКЛР; как и другие кристаллические тела, обладают анизотропией свойств. Кроме того, алмазы дефицитны и дороги.

Природные технические алмазы сортируют по размерам. Мелкие служат для производства лезвийного инструмента, волок, опор точных приборов, инструмента для правки абразивных кругов, инденторов (наконечников) для приборов определения твердости. Самые мелкие кристаллы идут на приготовление порошков для абразивных алмазных инструментов.

Алмазные резцы применяют для окончательного чистового точения конструкционных материалов, цветных металлов, пластмасс, антифрикционных сплавов. Для их изготовления используют природные технические алмазы, имеющие форму октаэдра, ромбододекаэдра и др. Алмазные кристаллы должны иметь плотную структуру, не должны иметь трещин и включений, их масса должна составлять 0,3 ... 1,35 кар[1]. Предварительно алмазы подвергают огранке с учетом анизотропии их свойств, а затем закрепляют в специальных пазах державок пайкой или механическим способом.

Бронзы, латуни, медь и алюминий обрабатывают алмазным инструментом при скорости резания 400 ... 500 м/мин и продольной подаче 0,01 ... 0,03 мм. Титан точат при скорости резания не выше 300 м/мин, а пластмассы — при скорости резания менее 150 м/мин. Алмазные резцы работают в течение 25 ... 200 ч до переточек и обычно выдерживают 6 — 10 переточек.

Наряду с природными алмазами в инструментальном производстве широко используют **искусственные алмазы**, которые главным образом применяют для изготовления абразивного (шлифовальные круги, полировальные пасты) инструмента, инструмента для резания твердых материалов — керамики, полупроводников, стекла (круги с наружной и внутренней режущими кромками).

---

[1] Карат — внесистемная единица массы драгоценных камней и жемчуга; 1 кар = = 0,2 г = 200 мг.

Промышленное синтезирование искусственных алмазов выполняют при давлении 5,65...16,5 ГПа (56,5...165 кбар) и температуре до 3 000 °С в течение нескольких минут. Сырьем служит любой из материалов, содержащих большое количество углерода, — сажа, графит, древесный уголь и др. Процесс ведут в присутствии катализатора, которым может быть какой-либо из металлов — хром, никель, железо, тантал, кобальт и др., так как для синтеза алмазов без катализатора необходимое давление должно быть примерно 21,5 ГПа (215 кбар) и температура выше 3 770 °С.

Синтетические (искусственные) алмазы изготовляют трех ***основных марок***: АСО, АСП, АСВ, что соответствует обыкновенной, повышенной и высокой прочности. Они (за исключением СВ, карбонадо и баллас), как правило, очень мелкие и поэтому непригодны для изготовления резцов и фрез. Такие алмазы используют для производства разного рода шлифовальных инструментов. Кристаллы синтетических алмазов обычно бывают массой до 1 кар, они более хрупки, поверхность имеет повышенную шероховатость, чем у природных алмазов, поэтому такие кристаллы прочнее удерживаются в теле связки инструмента, что в значительной степени определяет их повышенную стойкость. Синтетические алмазы преимущественно используются для производства инструмента из порошка в связанном или свободном состоянии.

Ознакомимся с **основными видами алмазной обработки**.

Заточка режущего инструмента, оснащенного твердосплавными и минералокерамическими пластинами, проводится алмазными абразивными кругами разных типов и форм, которые могут быть прямого профиля, профильными, в виде чашек, тарелок, головок и др.

Сверление отверстий в труднообрабатываемых материалах (стекло, керамика, гранит, ситалл и др.) выполняется сверлами разных конструкций — игольными (сверление до 2 мм), трубчатыми (3...600 мм) и сегментными, представляющими собой разновидность трубчатых, в которых алмазоносный слой закреплен на сменных сегментах.

Хонингование — вид финишной обработки блоков цилиндров, гильз, втулок и других деталей с отверстиями. Обработка выполняется хонинговальными брусками, закрепленными в хонинговальной головке (хоне). В процессе обработки бруски совершают сложное (поступательно-вращательное) движение, в результате которого получают, например, цилиндр правильной геометрической формы с минимальной шероховатостью и высокой точностью обработки.

Суперфиниширование — обработка, как правило, наружных цилиндрических и конических поверхностей, сфер, плоскостей из высокопрочных сталей с помощью брусков с алмазоносным слоем, закрепляемых на специальных оправках. При этом бруски совершают сложные движения по обрабатываемой поверхности.

Резка — операция, применяемая для разделения твердых и хрупких искусственных и природных материалов, минералов, стекла, керамики, полупроводниковых материалов. Обычно при проведении резки используют два вида инструмента — круги с наружной и внутренней режущей алмазной кромкой. Операцию проводят на больших оборотах и с обильным охлаждением.

Шлифование — наиболее часто применяемый процесс обработки твердосплавных деталей, керамики, кварца, стекла, полупроводниковых материалов и других труднообрабатываемых материалов с помощью алмазного абразивного инструмента. Для этого используют шлифовальные круги, алмазные пасты, бруски, алмазные ленты и др. Шлифование обычно осуществляют на плоско-, кругло-, внутришлифовальных и профилешлифовальных станках, а также на специальном оборудовании. Например, алмазными пастами шлифуют и полируют полупроводниковые пластины, доводя их поверхность до минимальной шероховатости, а алмазные ленты на гибкой основе очень удобны для обработки криволинейных поверхностей (лопатки турбин).

Кроме того, алмазным инструментом пользуются при ***фрезеровании***, ***доводке***, ***притирке***, ***правке*** и других процессах.

Значительный ассортимент ручного инструмента изготовляется с использованием синтетических алмазов. К ним относятся бруски разных профилей и размеров, надфили и головки, которыми обрабатывают детали, вращая их в дрели или сверлильном станке. Такой инструмент может быть на органической, металлической и гальванической связке из порошков синтетических алмазов зернистостью АС8—АС4 и АСМ40—АСМ10.

7.4. СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На основе синтетических алмазов разработаны и выпускаются сверхтвердые материалы (СТМ), наиболее известные из них баллас, карбонадо, славутич, СВ и эпитаксиальный СТМ и др.

Баллас — сверхтвердый поликристаллический материал, полученный из порошков синтетических алмазов и предназначенный

для изготовления инструмента разного назначения. Поликристаллы балласа темного цвета и значительной массы (0,15...2,5 кар), что позволяет делать из них режущие пластины для резцов и волоки (фильеры). Стойкость ***резцов*** из балласа в 50—60 раз выше, чем из твердого сплава, что позволило достичь высочайшей скорости резания алюминия — 1 500 м/мин, превысив в 3 раза скорость резания алмазным резцом. Кроме того, из этих поликристаллов производят инструмент для доводки поверхности ответственных деталей, снижая при этом на два—четыре класса шероховатость и значительно повышая твердость, в том числе закаленных изделий. Выглаживанием обрабатываемой поверхности СТМ достигается пластическая деформация микронеровностей предварительной обработки с одновременным ее упрочнением в холодном состоянии, т.е. создается так называемый наклеп.

Особо следует остановиться на использовании балласа для изготовления ***волок (фильер)***, необходимых для изготовления путем волочения проволоки диаметром от 12 мкм до 3 мм. До создания балласа волоки изготовляли из ювелирных алмазов высокого качества, а с внедрением лазера в процесс обработки волочильных отверстий в СТМ процесс изготовления тонких нитей значительно упростился и подешевел. Рабочее отверстие волоки имеет сложную конструкцию и состоит из входной части (входной распушки), смазочного и рабочего конусов, калибрующей зоны, обработочного конуса и выходной части (выходной распушки).

Изготавливают волоки разных назначений: для холодного волочения очень мягких металлов (алюминия, цинка, сплавов на их основе), мягких (меди, серебра, золота, платины), полутвердых (латуни, бронзы, никеля, константана, манганина) и твердых (стали, нихрома, вольфрама, молибдена) материалов. В зависимости от диаметра и свойств протягиваемого материала для изготовления волок используют отборный СТМ массой 0,8...2,2 кар. Стойкость волок из балласа в 250 раз выше, чем стойкость твердосплавных волок, и позволяет протянуть через них провод длиной свыше 17 тыс. км.

Тонкий провод нужен для производства электрических ламп, электродных выводов в полупроводниковых приборах и микросхемах, для изготовления миниатюрных трансформаторов, электромагнитных реле, входящих в состав многочисленных приборов и аппаратов космической техники, и для других целей. Кроме того, микропровод диаметром 20 мкм широко используют в сеткографии для изготовления сеткотрафаретов, а также сит. Но сквозь волоку протягивают не только металлы и сплавы. Шелко-

вую нить, используемую для изготовления шелковой ткани, а затем и пошива парашютов, также пропускают через алмазные волоки, достигая равномерности ее калибра по диаметру, обеспечивая получение гладкой, плотной и скользкой нити. Для этих же целей волоки ставят в машинах для прядения искусственного волокна.

Карбонадо — поликристиллический синтетический алмаз черного или темно-серого цвета имеет радиально-лучевое строение с взаимно внедрившимися один в другой кристаллами. Такой алмаз тверд и прочен и оказался хорошим материалом для изготовления резцов, предназначенных для обработки ряда твердых материалов, среди которых ситаллы, рубины, фарфор, германий, керамика и др. Керамику можно обрабатывать с помощью карбонадо со скоростью резания 200...300 м/мин, твердые сплавы — 15...30 м/мин.

Славутич — сверхтвердый синтетический материал, полученный спеканием под высоким давлением смеси порошков твердого сплава (ВК6) и крупных зерен (400...500 мкм) синтетического алмаза. Основное назначение славутича — армирование бурового инструмента, в котором он способен работать при температуре 800 °С и давлении более 20 МПа (200 бар). Однако данный материал пригоден и для изготовления измерительных инструментов. Так, измерительная скоба, изготовленная из славутича, выдержала 800 тыс. измерений, а из закаленной стали — только 1,5 тыс. измерений.

Материал СВ — поликристаллический алмазный сверхтвердый, синтезированный спеканием при сверхвысоком давлении из смеси порошков природного и синтетического алмазов и предназначенный для изготовления режущих пластинок, волок, буровых инструментов. Этот материал весьма тверд, более прочен, нежели природные алмазы, так как его структура представляет собой густо переплетенную систему кристаллов, глубоко вросших один в другой (аналогична структуре карбонадо).

Эпитаксиальный СТМ — пленочный поликристаллический материал, выращенный из газовой фазы (метана) методом эпитаксии — упорядоченного наращивания на подложке. Процесс проводят в специальной установке, где подложкой (затравкой) служит алмаз, структуру которого и повторяет наращиваемая в импульсном режиме из метана сверхтвердая пленка. За прокачкой перенасыщенного метана следуют вспышки света, которые с помощью системы зеркал фокусируются на затравке, в результате происходит образование пленки алмаза на подложке. Такое наращивание алмазной пленки не требует сверхбольших давлений,

высоких температур, катализаторов. Быстрорежущее сверло, покрытое алмазной пленкой, работает в 3 раза дольше обычного.

На основе нитрида бора, который может быть в двух модификациях — гексагональной (ГНБ) и кубической (КНБ), отличающихся высокой химической устойчивостью и термостойкостью, а также повышенной твердостью и жаропрочностью, получен ряд СТМ. Гексагональный нитрид бора — это белый порошок, из него, как и из графита, изготовляют высокоогнеупорные тигли, сухие смазки и др. Новый сверхтвердый алмазоподобный синтетический материал на основе КНБ обладает свойствами, не уступающими алмазу, а в ряде случаев даже превосходящими его. Этот материал — ***боразон*** — состоит из бора (45,6 %) и азота (54,4 %). Оно совершенно пассивно в отношении железа. Кроме того, на боразон не действуют кислоты, их смеси и едкие щелочи. Данный синтетический алмазоподобный материал превосходит алмаз по теплостойкости (2 000 °С и для сравнения 800 °С у алмаза) и уступает ему по микротвердости (89...94 ГПа у боразона и 100,6 ГПа у алмаза). Боразон получают из КНБ и азота при больших давлениях и высоких температурах в присутствии катализатора. Боразон имеет сходную с алмазом кристаллическую решетку, что предопределяет сходство их свойств. Кристаллы боразона в отличие от большинства кристаллов алмаза обладают проводимостью, а его зерна разнообразны по форме и окраске. Как и алмаз, боразон имеет уникальные абразивные свойства, превосходящие свойства всех известных шлифующих материалов. Боразон, изготавливаемый разными заводами, известен под торговыми марками «кубонит» и «эльбор».

Эльбор — сверхтвердый синтетический материал, состоящий из КНБ (85...90 %), оксидов магния и кальция (5...2 %) и тугоплавких соединений (10...1 %). Этот материал в виде порошка с размерами зерен до 250 мкм применяют при изготовлении шлифовального инструмента. Развитием работ по производству СТМ стал эльбор-Р — эльбор резцовый, представляющий собой плотно сцементированные, глубоко проросшие один в другой кристаллы КНБ размером в несколько микрометров. Эльбор-Р изготовляют в виде цилиндров диаметром 3,5...7,0 мм и высотой 4...6 мм. Достоинствами такого материала являются высокая твердость (80...90 ГПа), термическая и химическая стойкость, полная инертность к железу, а также надежная пайка металлизованных режущих пластинок к державкам резцов и фрез.

При точении эльбором-Р изделий из быстрорежущей закаленной стали и скорости резания 100 м/мин его стойкость в десятки

раз выше стойкости инструмента из твердых сплавов и минералокерамики, а износ при этом в 1,5 раза меньше. Такими резцами можно обрабатывать твердый сплав при изготовлении из него деталей штампов. Эффективными оказались резцы из эльбора-Р при использовании их на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и станках-автоматах. При нагревании примерно до 1 000 °С режущая кромка резца из эльбора-Р окисляется. Однако шероховатость обрабатываемой поверхности изделия при этом уменьшается. При исследовании оказалось, что резец работает как выглаживатель, пластично деформируя микронеровности. Стойкость сверл из эльбора-Р в десятки раз превышает стойкость из традиционных материалов.

Гексанит-Р — сверхтвердый синтетический материал, полученный из модифицированного (подвергнутого кратковременной обработке ударной взрывной волной) ГНБ, синтезированный при давлении 20 ГПа (200 кбар) и температуре 1 500 °С. Полученные таким образом поликристаллы представляют собой цилиндры диаметром 8,0, высотой 2,5...3,0 мм и массой 0,3...1,5 кар, обладающие тонкозернистой структурой, высокой вязкостью, большой твердостью, полной инертностью к железу, предназначены для изготовления вставок металлорежущего инструмента, хорошо работающего при точении закаленных сталей и чугунов, выдерживающего ударные нагрузки при обработке прерывистых поверхностей изделий.

В результате исследования установлено, что при скорости резания 140 м/мин закаленного чугуна резец из гексанита-Р работал в течение 3 ч, что в 10 раз превысило стойкость твердосплавного резца.

Белбор (белорусский нитрид бора) — СТМ, синтезированный без применения катализаторов (в результате чего получены порошки и крупные поликристаллы), обладающий высокими твердостью и теплостойкостью, хорошо зарекомендовавший себя при обработке закаленных сталей и твердых сплавов.

Исмит — сверхтвердый синтетический поликристаллический материал, полученный из КНБ в смеси с другими веществами. Используется для изготовления режущих вставок к резцам и фрезам. При точении легированной закаленной стали и скорости резания 140 м/мин резец работал 4 ч.

Дисмит — сверхтвердый поликристаллический материал, полученный спеканием мельчайших порошков синтетического алмаза (20...25 %) и КНБ (75...80 %) при высоком давлении в присутствии металлического катализатора, имеет кристаллическую

Таблица 7.3. Рабочие свойства резцов из разных материалов

Режущий материал резца	Микротвердость, ГПа	Температуростойкость, °С	Допускаемая скорость резания, м/мин
Сталь:			
углеродистая	—	200...220	3...5
легированная	—	250...350	10...15
быстрорежущая закаленная	14	610...670	30...40
Твердые сплавы	15...30	570...1 000	150...300
Минералокерамика	93	300...1 200	250...500
Алмаз	100	800...850	500...3 000
Карбонадо	90...100	1 200...1 300	500...3 000
Эльбор-Р	80...90	1 300...1 500	500...3 000

решетку типа карбонадо или балласа (в зависимости от состава шихты и условий синтеза) и свойства алмаза и КНБ. При точении трудного для обработки материала — фосфористой бронзы — резец работал без перерыва 12 ч, снял стружку общей длиной 288 км.

Кибор — разновидность боразона (кубанита, эльбора), отличается тем, что при температуре до 1 400 °С не теряет своих рабочих качеств и на 20 % прочнее синтетического алмаза.

Рабочие свойства резцов из разных материалов приведены в табл. 7.3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы относятся к инструментальным?
2. Что такое быстрорежущая сталь?
3. Какие материалы называют твердыми сплавами?
4. Какова твердость твердых сплавов?
5. Какими свойствами характеризуются алмазы?
6. Какие материалы называют сверхтвердыми?

Глава 8

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ШТАМПОВ, ПРЕСС-ФОРМ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

8.1. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ШТАМПОВ И ПРЕСС-ФОРМ

Инструмент штампов для холодной обработки должен иметь высокую поверхностную твердость при достаточной вязкости сердцевины, износостойкость, большое сопротивление изгибу, сжатию, высокую теплопроводность, ударную прочность и т. д.

Штампы для холодной обработки во многом схожи, различие относится только к рабочему инструменту и обрабатываемым деталям. Как правило, всякий штамп включает в себя штамповый блок, пуансоны и матрицы (рабочий инструмент), съемники, выталкиватели и другие детали.

Блок штампа состоит из двух параллельных плит (нижней и верхней), способных перемещаться по направляющим колонкам и втулкам за хвостовик с помощью ползуна пресса. Плиты штампа обычно изготовляют из низкоуглеродистой стали или чугуна. Они могут быть литыми или изготовлены резанием.

Для ***колонок и втулок***, работающих на истирание и воспринимающих значительные напряжения, в том числе изгибающие, обычно используют сталь 20, которую цементуют, термически обрабатывают, а затем шлифуют и попарно прирабатывают. В этом случае соприкасающиеся поверхности втулок и колонок имеют твердые поверхности, которые после смазывания хорошо работают в условиях изнашивающих нагрузок, а сердцевина этих деталей остается незакаленной, вязкой, способной работать на изгиб и внецентренное сжатие, излом.

Для изготовления прокладок, штифтов, специальных винтов и других вспомогательных деталей используют стали 45 и 40Х. Толкатели, съемники, ловители, подкладки можно изготовлять из углеродистой инструментальной стали У10А. Как правило, указанные детали подвергают термической обработке.

Пуансоны и матрицы штампов малых размеров для штамповки мелких деталей простой формы, производимых вырубкой, пробивкой, вытяжкой, гибкой, отрезкой и высадкой, обычно изготовляют из углеродистой инструментальной стали У10А. Следует помнить, что углеродистые стали после закалки и отпуска изменяют свои размеры и форму из-за коробления и перестройки структуры.

Хорошо работает на истирание, изнашивание и противостоит затуплению рабочий инструмент штампов, предназначенных для штамповки деталей значительных размеров и сложной конфигурации, из легированных сталей Х12М, Х12Ф1 (ГОСТ 5950—73).

Наличие аустенита в структуре указанных сталей после термической обработки делает их вязкими и работоспособными в тяжелых эксплуатационных условиях. Для изготовления пуансонов и матриц в ответственных штампах применяют стали 9ХС, ХВГ, ШХ15 и др., которые после ступенчатой закалки приобретают высокую вязкость, так как в этом случае в структуре сохраняется значительный процент остаточного аустенита.

Применение того или иного материала для изготовления пуансонов и матриц определяется свойствами перерабатываемого материала, количеством изготовляемых изделий, требованиями к их качеству, соотношением размеров изделия (толщины и минимальных размеров вырубаемого контура). Иногда целесообразно пуансоны и матрицы как вытяжных, так и вырубных штампов изготовлять твердосплавными из спеченного или пластифицированного материала и обрабатывать алмазным режущим инструментом. При этом стоимость изготовления штампов повышается в 3—5 раз, а стойкость возрастает в десятки раз.

В табл. 8.1 приведены химические составы и режимы термической обработки инструментальных сталей, предназначенных для холодной обработки материалов.

Инструмент штампов для горячей обработки работает в более тяжелых условиях, чем при холодной, нагревается до 450...550 °С. Материал штампов в термически обработанном состоянии должен иметь высокие механические свойства, сопротивление к истиранию и образованию трещин, теплопроводность, хорошо обрабатываться резанием.

В отличие от штампов холодной штамповки штампы горячей штамповки, в частности молотовые, выполняют сборными. В основаниях штампов (блоков) из сталей 40Х или 45 делают специальные гнезда, в которых закрепляют горячей посадкой или клиньями рабочий инструмент — пуансоны и матрицы, вставки ру-

Таблица 8.1. Химический состав и режимы термической обработки сталей для инструмента, предназначенного для штамповки и резки металлов в холодном состоянии

Марка стали	Химический состав, мас. %						Режимы термической обработки			
	Углерод	Марганец	Кремний	Хром	Молибден	Вольфрам	Температура закалки, °С	Охлаждающая среда	Температура отпуска, °С	Твердость после отпуска HRC
У10	0,95...1,04	0,15...0,35	0,15...0,35	До 0,20	—	—	780...800	Вода или масло	180...200	56...59
ШХ15	0,95...1,10	0,20...0,40	0,15...0,35	1,30...1,65	—	—	835...855	Масло	280...320	54...56
ХГ	1,30...1,50	0,45...0,70	0,15...0,35	1,30...1,65	—	—	840...860	»	280...320	54...56
9ХС	0,85...0,95	0,30...0,60	1,20...1,60	0,95...1,25	—	—	830...870	»	250...270	59...60
Х12	2,00...2,30	До 0,35	До 0,40	11,50...13,00	—	—	950...1 000	»	210 или 415	58...62
Х12М	1,45...1,70	До 0,35	До 0,40	11,00...12,50	0,40...0,60	0,65...0,80	975...1 050	»	170 или 450	56...60
Х12Ф	1,30...1,50	До 0,35	До 0,40	11,00...12,50	—	0,70...0,90	975...1 050	»	170 или 450	56...60
6ХС	0,60...0,70	0,30...0,60	0,10...0,60	0,95...1,15	—	—	840...860	»	150...180	58...62
5ХВС	0,45...0,54	0,20...0,40	1,00...1,30	—	—	—	850...900	»	200...225	56...58
5ХВГ	0,55...0,70	0,90...1,20	0,50...0,80	0,50...0,80	—	—	820...870	»	180...220	56...59

чьев. Для вставок используют стали 5ХНМ или 5ХГМ, Х12М, 40Х, 45, У7А, 7Х3 и др. (ГОСТ 5950—73, ГОСТ 1435—74).

Цельные молотовые штампы ремонтируют 2—3 раза до списания, сборные можно восстанавливать 15—20 раз.

Материалы для ***пресс-форм*** должны иметь высокие сопротивления переменным термомеханическим, физико-химическим и механическим воздействиям жидкого материала на внутренние поверхности инструмента, минимальные деформации при термообработке и шероховатость при изготовлении.

Особенности работы пресс-форм: высокая температура расплавленного металла, большая скорость его впрыска в пресс-форму (15...60 м/с) и сильное давление на металл (1...10 МПа, для медных сплавов 30...100 МПа). Кроме того, материал формы подвергается интенсивному разъеданию жидким металлом непосредственно в местах удара струй. Пресс-форма испытывает неравномерный нагрев, зависящий от места впрыска жидкого металла, ее конструкции и конфигурации отливаемого изделия.

Работоспособность пресс-форм может быть обеспечена правильным выбором материала рабочего инструмента, термической обработкой, минимальной шероховатостью, очисткой и смазыванием рабочего объема: для литья плит, стержней, вкладышей, букс литников пресс-форм из алюминиевых и медных сплавов применяют стали 3Х2В8, 5ХН21, 7Х3, 4ХВС, а для направляющих колонок, втулок, выталкивателей — стали 15 или 20 и 40Х.

Для облегчения съема отлитых изделий рабочую поверхность литейных форм обычно хромируют, тщательно полируют, изготовляют с плавными переходами, уклонами. При отсутствии хромирования рабочие поверхности изготовляют из материалов с большим содержанием хрома.

8.2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

К материалам для измерительных инструментов предъявляются дополнительные по сравнению с материалами для режущих инструментов требования, основные из которых — малый ТКЛР, хорошие закаливаемость с минимальными деформациями и обрабатываемость с низкой шероховатостью поверхностей, способность в термически обработанном виде сохранять стабильными размеры, а также быть коррозионно-стойкими.

Универсальные измерительные инструменты, широко используемые в обработке металлов резанием и давлением, можно подразделить в зависимости от назначения и точности измерения на штриховые, штангенинструменты, микрометрические инструменты, калибры, плитки и др.

Штриховые инструменты — это обычные металлические линейки и рулетки разной длины с нанесенными на них делениями — штрихами ценой в 1 мм.

Штангенинструмент (штангенциркули) — измерительные инструменты с двумя губками: одной, неподвижно соединенной с масштабной (с делениями) линейкой (штангой), и другой, скользящей вдоль линейки с нониусом. Цена деления этих инструментов 0,1; 0,05 и 0,02 мм. Штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм имеет глубиномер.

Микрометрические инструменты (микрометры) предназначены для измерения диаметров валов, отверстий, толщин и глубин с точностью до 0,01 мм.

Калибры служат для отбраковки по размерам деталей типа валов и отверстий в них как гладких, так и резьбовых. Для контроля наружных размеров используют инструмент в виде ***скоб***, внутренних — ***пробки***, резьб — ***кольца***. Калибры имеют два размера, между которым находится действительный размер изделия. Один из размеров калибра является ***проходным*** (ПР), а второй — ***непроходным*** (НЕ). Пробки с проходным размером, как правило, делают длиннее пробок с непроходным. Сначала контролируемое изделие пропускают через проходную часть калибра, а затем прикасаются им непроходной части, через которую оно не проходит, слегка застревая.

Плитки — концевые меры длины, используемые для проверки измерительных приборов, инструментов, установки заданных размеров, при особо точных разметочных работах, наладке станков и в других случаях. Они имеют две взаимно-параллельные измерительные плоскости, изготовленные с высокой точностью, минимальной шероховатостью и в виде наборов с разными номинальными размерами. Важнейшее свойство плиток — ***притираемость*** одной к другой с достаточной прочностью, что позволяет составлять из плиток блоки нужных размеров.

В зависимости от предъявляемых требований к качеству и прежде всего к точности измерительный инструмент изготовляют из сталей инструментальных легированных ХГ, Х, ХГС, ХВГ, 9ХВГ (ГОСТ 5950—2000), легированных 38ХЮ, 38МЮА и 38ХВФЮ (ГОСТ 1435—74), высококачественных углеродистых У8А, У10А,

У11А, У12А (ГОСТ 1050—88) и низкоуглеродистых сталей 15, 20 (ГОСТ 1050—88).

Так, из сталей ХГ и Х изготовляют измерительные инструменты, которые при термической обработке должны мало деформироваться. К таким инструментам относятся гладкие, резьбовые пробки и кольца, установочные калибры, мерительные стержни штихмасов, угольники, лекальные линейки, плоскопараллельные плитки.

Стали ХГС и ХВГ используют для производства резьбовых калибров, плоскопараллельных плиток, т. е. инструмента, повышенное коробление в котором после закалки недопустимо.

Из стали 9ХВН изготовляют лекала сложной формы, лекальные линейки.

Регулируемые резьбовые кольца, установочные калибры, линейки производят из сталей 38ХЮ, 38ХМЮА и 38ХВФЮ (ГОСТ 1435—74). Для микровинтов микрометров, штанг штангенциркулей, радиусных шаблонов, подвижных вставок штихмасов и подвижных ножек штангенциркулей и прочего применяют стали У8А, У10А, У11А, У12А.

Для такого инструмента, как листовые скобы одно- и двухсторонние, штампованные, пробки проходные и непроходные, шаблоны, длинные стороны угольников, используют стали 15, 20, 15Х, 20Х, которые после изготовления инструмента подвергают цементации с последующей термической обработкой.

К инструментальным сталям для измерительных инструментов предъявляют особые требования, изложенные в соответствующих стандартах. Каждая плавка таких сталей должна быть проверена на степень загрязнения неметаллическими включениями — оксидами, сульфидами, а также на однородность распределения карбидов — карбидную ликвацию. Кроме того, ограничивается допустимый ТКЛР.

Для изготовления особо точного инструмента используют высокочистый металл (по примесям и загрязнениям). Наиболее распространенный метод его получения — ***электрошлаковый переплав*** (ЭШП). Процесс осуществляется при атмосферном давлении под слоем шлака, нагретого до температуры 1 700...2 000 °С, в медном кристаллизаторе. Расплавленный металл стекает по электроду через защитный слой шлака в жидкую ванну, в которой он затвердевает по окончании плавки. Методом ЭШП получают слитки массой до 150...200 т, а отсутствие огнеупоров позволяет выбирать и строго регулировать оптимальный для данной марки химический состав. Поверхность слитка, переплавляемого мето-

дом ЭШП, получается чистой, покрытой тонким слоем шлака, который легко удаляется.

Кроме указанного, известны и другие способы переплава, например, в процессах вакуумной индукционной плавки (ВИП), вакуумного дугового переплава (ВДП), электронно-лучевого переплава (ЭЛП), плазменно-дуговой плавки (ПДП) и др.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие свойства должны иметь материалы для изготовления рабочих частей штампов и пресс-форм?
2. Какие требования предъявляются к материалам, используемым для изготовления измерительных инструментов?
3. Как выполняют электрошлаковый переплав?
4. Зачем полируют рабочие поверхности литейных форм?

ПОРОШКОВЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

V

ЧАСТЬ

Глава 9. Новые материалы
Глава 10. Керметы и композиционные материалы

Глава 9

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Материалами нового поколения являются порошковые сплавы, керметы, композиционные материалы. Их применение обеспечило существенный прогресс в области машиностроения, приборостроения, авиакосмической техники и в других областях техники. Порошки — это обособленные частицы металлов и сплавов, которые могут иметь сложную поликристаллическую структуру, разные размеры в диапазоне 1...200 мкм. С использованием порошков получают порошковые материалы — спеченные сплавы, спеченные материалы, керметы и др.

Спеченные сплавы — материалы, полученные из металлических порошков методами порошковой металлургии. Известны спеченные сплавы на основе вольфрама, молибдена, железа, никеля, меди, алюминия (например, спеченная алюминиевая пудра (САП) и спеченный алюминиевый сплав (САС), используемые для производства жаропрочных и жаростойких изделий).

Спеченные материалы — полуфабрикаты из порошков металлов и металлоподобных соединений или их смесей с неметаллическими порошками, полученные методами порошковой металлургии.

Керметы (название образовано от первых букв понятий «керамика» и «металл») — материалы, получаемые прессованием смеси из керамических и металлических порошков с последующим спеканием. В качестве керамической составляющей используют тугоплавкие карбиды, бориды, силициды и нитриды, а металлической — никель, хром, железо, вольфрам, молибден, тантал и другие, также тугоплавкие, металлы. Керметы имеют весьма ценные свойства, характерные и для керамики, и для металлов. Из керметов изготовляют металлорежущий инструмент, детали авиа-

ционных турбин и другие изделия, работающие при высоких нагрузках и температурах, а также в агрессивных средах.

9.2. ПОРОШКОВЫЕ СПЕЧЕННЫЕ СПЛАВЫ

Из металлических порошков получают материалы, называемые псевдосплавами (от греч. ***pséudos*** — мнимый, ложный).

Псевдосплавы — это порошковые смеси со связкой твердого (молибден, вольфрам) и мягкого пластичного (медь, серебро) металлов. Заданные свойства псевдосплавов получают, изменяя соотношение компонентов. Так, увеличивая содержание меди и уменьшая соответственно содержание молибдена, можно изготовить ***молибденомедный*** (МД) псевдосплав, ТКЛР которого будет изменяться в широком диапазоне. Экспериментально установлена прямая зависимость ТКЛР псевдосплава от концентрации меди, что объясняется замедлением образования в нем молибденового каркаса при увеличении ее содержания.

Изменение относительного температурного расширения молибденомедного псевдосплава в зависимости от содержания компонентов при различной температуре показано на рис. 9.1. Самое большое расширение имеет медь *1*, а самое малое — молибден *8*. Общая тенденция относительного температурного расширения молибденомедных псевдосплавов такова, что с повышением температуры его значение увеличивается, а с уменьшением содержания меди в сплаве с 83,3 до 14 об. % расширение уменьшается (см. рис. 9.1, кривые *2*—*7*).

Специфические свойства меди отражаются также на других качествах псевдосплавов. Так, в псевдосплаве МД30 характер изменения удельного электрического сопротивления напоминает изменение этого параметра у меди, хотя молибдена в данном сплаве содержится более 2/3 объема. Это подтверждает, что псевдосплав не является сплавом в полном смысле слова и имеет свои особенности.

Свойства псевдосплавов существенно зависят от технологического процесса их изготовления, который состоит в прессовании смеси порошков, их спекании с последующей дополнительной пропиткой жидкой медью. Перспективный метод получения полос (листов) псевдосплава — предварительная прокатка порошков, совмещенная со спеканием и окончательной прокаткой. Если прессованием порошков получают штабики (обычно круглые)

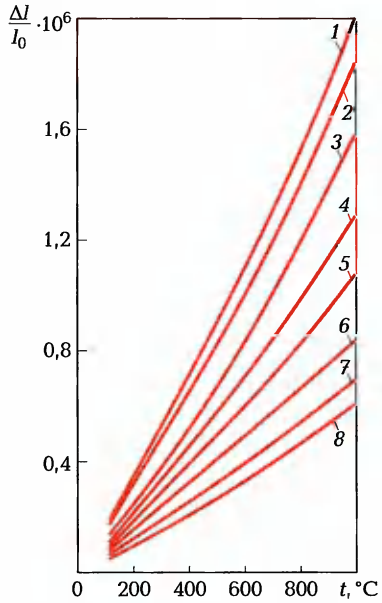


Рис. 9.1. Относительное температурное расширение молибденомедных псевдосплавов в зависимости от объемного содержания компонентов и температуры:

1, *8* — медь и молибден; *2*, *3* — псевдосплавы 83,3 об. % молибдена и 70,2 об. % меди; *4*, *5* — псевдосплавы 50,2 об. % молибдена и 42,2 об. % меди; *6*, *7* — псевдосплавы 28 об. % молибдена и 14 об. % меди

определенных размеров, прокатка которых в ленты или листы довольно трудоемка, то прокаткой порошков можно получить полосы толщиной 0,9... 13 мм.

Полосы из псевдосплавов обладают анизотропией свойств вдоль и поперек направления прокатки. Для получения полос с одинаковыми свойствами необходимо изменять направление их прокатки после каждого обжатия заготовки, что сложно и непригодно в промышленном производстве. Поэтому для стабилизации свойств псевдосплавов полосы всех толщин деформируют со степенью обжатия не менее 90... 95 %, что обеспечивает разброс значений относительного теплового расширения полос молибденомедного псевдосплава МД50 не более $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ в интервале температур 20... 400 °С и изменение ТКЛР в плоскости прокатки менее 10 %. Деформация полос изменяет также плотность, ТКЛР, электропроводность и механические свойства псевдосплава. Напри-

мер, при 50...60%-ной деформации плотность псевдосплава МД40 достигает 95...96 % теоретической, а с увеличением обжатия ТКЛР уменьшается.

Хорошей электро- и теплопроводностью и высокой механической прочностью при сжатии обладает вольфрамомедный псевдосплав ВМ20 (эльконайт), также получаемый методом порошковой металлургии и состоящий из 70...80 % вольфрама и 30...20 % меди.

Электропроводность вольфрамомедного псевдосплава при увеличении содержания вольфрама уменьшается, а при повышении содержания меди увеличивается по линейному закону. Твердость этого псевдосплава по Бринеллю имеет более сложную зависимость и при увеличении содержания вольфрама от 28 до 85 % находится в пределах 1,0...3,4 кН/мм^2.

Псевдосплавы хорошо обрабатываются давлением (ковкой, прокаткой), резанием (точением, фрезерованием, сверлением, шлифованием) и лучше подвергаются вытяжке и рубке, чем молибден, полученный методом порошковой металлургии. Способность псевдосплавов к вытяжке, которую определяют на приборе Эриксена, зависит от содержания компонентов и технологии изготовления.

При химической и термической обработке деталей из псевдосплавов следует помнить, что эти материалы представляют собой двухфазные системы с резко различными свойствами фаз, поэтому травления псевдосплавов следует избегать, так как оно происходит избирательно.

Очистка деталей из псевдосплавов обычно заключается в обезжиривании в горячем трихлорэтилене, промывке в горячей деионизованной воде с ультразвуковым воздействием и отжиге в водороде при 950...970 °С. Возможна также длительная термическая обработка на воздухе при 400...450 °С при условии защиты деталей слоем гальванического никеля толщиной 20...30 мкм. Кроме того, псевдосплавы хорошо хромируются, а по слою химически осажденного никеля — золотятся.

Детали из молибденомедных псевдосплавов можно паять любыми припоями с температурой плавления до 1 000 °С. При пайке припоем ПСр72 деталей из псевдосплавов в водороде рекомендуется проводить нагрев на 30 °С выше точки плавления припоя. Для улучшения растекания припоя детали из псевдосплавов предварительно покрывают слоем никеля 10...15 мкм. Хорошо обработанные и пригнанные между собой детали можно соединять без припоя, если нагреть их выше температуры плавления меди.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы относят к новым?
2. Дайте определение псевдосплава.
3. Каково назначение компонентов порошковых спеченных сплавов?
4. Как получают порошковые сплавы?
5. Какова химическая обработка псевдосплавов перед пайкой?
6. Как выбирается режим пайки псевдосплавов?
7. Что представляют собой порошковые материалы?
8. Что представляет собой кермет?
9. Каковы свойства псевдосплавов?
10. Как можно изменить свойства псевдосплавов?

Глава 10

КЕРМЕТЫ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

10.1. КЕРМЕТЫ И ПОКРЫТИЯ НА ИХ ОСНОВЕ

Керамические композиционные материалы классифицируют по структурным признакам на дисперсные, армированные волокнами или нитевидными кристаллами и слоистые.

В частности, дисперсные материалы — это металлокерамические искусственные композиции — керметы, в которых объединены ценные свойства керамики — огнеупорность, окалиностойкость — и металла — высокая механическая прочность, вязкость, теплопроводность, электропроводность и термостойкость. Известны, например, керметы на основе карбидов, боридов, нитридов, силицидов, связкой для которых служит хорошо их смачивающий металл. После спекания подобные керметы по своим свойствам не уступают многим материалам. Основой других керметов являются оксиды, а связкой — металл, который прочно связывает их с образованием промежуточного слоя, формирующегося при температуре ниже температуры плавления металла.

Наиболее широко применим кермет на основе оксида алюминия (корунда) и связки из металлического хрома или некоторых его сплавов. Это объясняется совпадением структур металла и керамики, что способствует образованию прочной связи между ними. Хром имеет сравнительно высокую температуру плавления (1 890 °С) и удовлетворительно противостоит окислению даже при высоких температурах. При обжиге зерен композиции корунда со специально окисленным хромом образуется их твердый раствор — промежуточная связь, цементирующая этот металл. Такой кермет не окисляется при нагреве до температуры 1 280 °С и выдерживает 1 000 циклов без разрушения по режиму нагрев до 1 050 °С и резкое охлаждение. Кроме того, при температуре 1 300 °С предел

прочности при изгибе кермета корунд—хром 250...300 МПа, а при растяжении — 50...130 МПа.

Технологический процесс изготовления кермета корунд—хром состоит из следующих основных операций: приготовления порошков, их смешивания, прессования и обжига. Металлические порошки хрома крупностью 40...60 мкм получают электролитическим способом. Они тонкодисперсны, но если требуется более тонкое измельчение, то используют шаровые мельницы, футерованные резиной, с шарами из твердых сплавов. Оксидные порошки получают измельчением корунда также в шаровых мельницах, но мокрым помолом. В аналогичных мельницах их и смешивают. Далее следует прессование, но предварительно в порошки вводят пластифицирующие органические добавки. После прессования при давлении 200...300 МПа композиции обжигают в вакууме или защитном газе при температуре 1 650 °С. Усадка после обжига составляет 15...20 %. Состав композиции можно изменять, варьируя содержанием компонентов в пределах 30...70 %.

Кроме керметов в технике нашли применение **керамические покрытия**, существенно изменяющие и улучшающие свойства основных материалов.

Нанесение керамических покрытий — это способ защиты черных, цветных и тугоплавких металлов слоями керамики для предохранения их от химической коррозии в активных средах и от воздействия теплоты. Такие покрытия могут быть тонкослойными (несколько микрометров) и толстослойными (1 мм и более) однофазными, композиционными, плотными или пористыми.

Известны несколько методов нанесения покрытий. Основные из них — газопламенное, детонационное и плазменное. Принцип создания керамических покрытий во всех методах общий, заключающийся в расплавлении материала, распылении и осаждении его на поверхности металла, способы нагрева и другие параметры осаждения разные.

При газопламенном нанесении покрытий материал в виде порошка или стержня расплавляют в ацетиленовом пламени горелки. При давлении 50...100 МПа расплавленные частицы получают скорость 100...150 м/с, с которой они ударяются о покрываемую поверхность.

При детонационном нанесении покрытий материал покрытия выбрасывается из аппарата со сверхзвуковой скоростью (750... 1 600 м/с) взрывной волной, образующейся от взрыва смеси ацетилена с кислородом в определенной пропорции. В результате этого давление резко возрастает и при ударении частицы покры-

тия пластически деформируются и прочно сцепляются с металлом (подложкой).

При плазменном нанесении покрытий разогрев порошка покрытия осуществляется плазменной струей, температура которой достигает несколько тысяч градусов по шкале Цельсия. Плазмообразующими могут быть азот, воздух, водород, кислород и другие газы. Расплавленный материал под воздействием электропроводной плазменной струи с большой скоростью ударяется о подложку, на которой он деформируется и сцепляется с ней.

Качество нанесенных покрытий определяется адгезией, зависящей от сил механического сцепления расплавленного материала с поверхностью, межатомного и химического взаимодействия. Для получения надежного сцепления необходимо подготовить поверхность подложки, обеспечив этим хорошее смачивание (минимальное значение краевого угла смачивания), исключить или уменьшить взаимодействие с газовой средой (окисление), получить оптимальную кинетическую энергию частиц в момент их удара о поверхность и использовать материалы с близкими по величине ТКЛР.

10.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Данные материалы образуются объемным сочетанием химически разнородных компонентов с четкой границей раздела между ними и характеризуются свойствами, которыми не обладает ни один из компонентов, взятый в отдельности.

Композиционные материалы обычно состоят из пластичной основы (***матрицы***), служащей связующим материалом, и ***включений*** различных ***компонентов*** в виде порошков, волокон, нитевидных кристаллов, тонкой стружки и т. д. Варьируя объемным содержанием компонентов, можно изготовить композиционные материалы с заданными свойствами.

Композиционные материалы могут быть следующих типов: ***волокнистые*** — пластик, армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали, бериллия; ***слоистые*** — двух- и трехслойные листы алюминий — медь, медь — алюминий — медь; ***дисперсно-упрочненные*** — никель, упрочненный дисперсными частицами диоксида тория. Композиционные материалы изготовляются, главным образом, методами порошковой металлургии, а так-

же пропиткой расплавленными металлами пористых каркасов тугоплавких материалов (молибдена, вольфрама) и другими способами. Примером создания таких материалов могут служить псевдосплавы.

Известно много композиционных материалов, созданных в разных отраслях производства. Создаются новые композиции, так как их применение позволит ускорить, улучшить, удешевить создание новых машин, производств, видов продукции и объектов. Они могут сочетать разные по свойствам материалы, в частности, керамику и металл, пластмассу, резину и металл, дерево и металл.

Композиционные материалы, армированные волокнами или нитевидными кристаллами, имеют общее наиболее распространенное название «волокнистые композиции». Освоению таких материалов предшествовала разработка волокон и нитевидных кристаллов из неорганических веществ (оксидов тугоплавких соединений) и тугоплавких неметаллических веществ. Волокнистые композиции могут быть армированы ***ориентированными*** и ***неориентированными*** поликристаллическими волокнами и нитевидными кристаллами. Армированным ориентированными волокнами материалам присуща анизотропия свойств. В табл. 10.1 приведены свойства волокон и нитевидных кристаллов.

Таблица 10.1. Свойства волокон и нитевидных кристаллов

Материал	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м^3	ТКЛР, 10^{-6} К$^{-1}$	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа
Волокно:					
борное	2 040	2 630	6,3	250 ... 350	3 800 ... 4 200
углеродное	3 000	1 700	1,0 ... 1,8	200 ... 300	2 000 ... 3 000
карборундовое	2 827	3 210	4,7	200	4 600
корундовое	2 050	3 960	8,0	210 ... 260	5 000
Нитевидные кристаллы:					
корундовые	2 050	3 990	—	2 800	5 000
нитридалюминиевые	2 400	3 300	—	1 500	3 800
карборундовые	2 650	3 210	5,9	3 700	5 800

Как правило, матрицей является металл, а армирующим компонентом — волокно. Однако, возможно, когда матрицей является керамика (керамическая фаза), основную силовую нагрузку в волокнистых композициях несет волокнистый армированный компонент, т. е. матрица лишь передает напряжения. Матрица защищает волокно, поэтому важно, чтобы между матрицей и волокном был плотный контакт, который создается наличием промежуточного слоя. Такой слой образуется прежде всего при химическом и, в меньшей мере, механическом взаимодействии между фазами матрицы и волокна. Именно промежуточный слой передает напряжения и перераспределяет их в случае разрыва волокна или образования трещин. Объемное содержание волокон может быть до 75 % и зависит от заданных свойств создаваемого материала.

Разрушение волокнистых композиций имеет ступенчатый характер, который начинается с растрескивания матрицы при достижении предельного напряжения. Далее последовательно разрушаются волокна с перераспределением в них напряжений.

Волокнистые композиции изготавливают пропиткой волокон матричным материалом. Пропитка может осуществляться расплавом при нормальном давлении, вакуумным всасыванием, под давлением и комбинированным методами. Если матрицей служит керамика, то смешивают керамический порошок и волокна до 10 мас. %. Затем отфильтровывают, сушат осадок и готовят его к прессованию или протяжке. Обжигают композиции в тех же печах, что и керамику, газовую среду выбирают в соответствии с составом композиционного материала.

Слоистые композиционные материалы также применяются в технике. Они представляют собой набор чередующихся тонких пластин (пленок) из металла и керамики с промежуточными слоями между ними. Важнейшим условием получения надежного слоистого материала является согласование величин ТКЛР компонентов. По своим свойствам слоистые материалы анизотропны, но их прочность на изгиб в «наилучшем» направлении довольно высока и составляет 500 МПа. Кроме слоистых известны гранулослоистые композиционные материалы с высокими ударной вязкостью, прочностью при изгибе, хорошей термостойкостью и малой окисляемостью. Многослойность композиционного материала значительно (на два-три порядка) повышает их стойкость к разрушению по сравнению с обычной керамикой, так как, например, трещина в слоистом материале многократно и последовательно распространяется по слоям.

Кроме рассмотренного известны и другие сочетания материалов, например металлопласты, металлополимеры и многослойные металлические материалы.

Металлопласты — материалы, состоящие из листов стали, титана, алюминия и их сплавов толщиной 0,3...1,2 мм с одно- или двухсторонним покрытием толщиной 0,05...1,0 мм из поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов или других полимеров. Такие композиции получают наклеиванием полимерной пленки, погружением листа в расплав полимера, нанесением пасты или напылением порошкообразного полимера. Металлопласты используют для изготовления автомобильных кузовов, корпусов телевизоров, стиральных машин, так как эти материалы перерабатываются штампованием, не требуют декоративной отделки, обладают электроизоляционными свойствами.

Металлополимеры — материалы на основе термопластов, синтетических смол или каучуков, содержащие наполнитель в виде порошков железа, меди, алюминия, серебра и других металлов или волокон стали, бериллия, молибдена, вольфрама и титана. Такие материалы имеют высокую теплопроводность, низкий ТКЛР и применяются в качестве подшипников, в производстве магнитных лент, токопроводящих элементов в диэлектрических и других устройствах.

Композиты в современной промышленности находят все большее применение как материалы, обладающие высокими характеристиками. Например, ***стеклопластики*** имеют высокую коррозионную стойкость и прочность, способны работать при знакопеременных нагрузках. Их используют в силовых конструкциях, изготавливают детали фюзеляжей и крыльев летательных аппаратов, баллоны высокого давления и др. ***Органопластики*** — самые легкие композиты с монолитной беспористой структурой, хорошо сопротивляются ударным и циклическим нагрузкам, вибростойки. Их применяют в качестве обшивочного материала и при изготовлении оболочек. ***Углепластики*** характеризуются высокой удельной прочностью и жесткостью, термо- и коррозионной стойкостью, способны работать при температуре до 300 °С, электропроводны. Такие материалы используют в авиационной, космической, автомобильной технике, а также для производства спортивного инвентаря.

Композит с углеродной матрицей и армированный углеродным волокном применяют для теплозащитных покрытий. При нагреве до 2 000 °С наблюдается даже некоторое повышение пределов прочности при растяжении и сжатии. Такие материалы на-

шли применение для тепловой защиты авиационных тормозов и химически стойкой аппаратуры.

Композиты с металлической матрицей имеют высокие значения модуля упругости, предела прочности, ударной вязкости и сохраняют свойства при более высоких температурах, чем полимерные композиты. Широкое применение нашли композиты с алюминиевой матрицей или сплавы на основе алюминия как наиболее технологичные с армированием борными и углеродными волокнами, стальной проволокой. При этом композит, армированный борными волокнами в продольном направлении, по пределу прочности превосходит конструкционный алюминий (1 000 ... 1 200 МПа) в 2 раза, при армировании углеродным волокном — примерно соответствует алюминию, а при армировании стальной проволокой — превосходит алюминий. Основное применение такие материалы находят в авиационной промышленности.

Многослойные металлические материалы находят все более широкое применение в технике. Известно несколько методов изготовления многослойных металлов, основными из которых являются нанесение гальванического или термодиффузионного покрытия, погружение в расплав, металлизация и плазменное напыление, конденсация из паровой фазы, прокатка или волочение в подогретом либо холодном состоянии. Наиболее высококачественный многослойный металл получают прокаткой или волочением в горячем состоянии в вакууме либо инертной среде. Этот метод, называемый также ***плакированием***, обеспечивает прочное сцепление металлов и позволяет изготовлять многослойные металлические листы, полосы, трубки и проволоку, подвергать их отжигу, пайке, сварке, штамповке и другим способам термомеханической обработки.

Важным достоинством многослойных материалов является сочетание в них разных свойств нескольких металлов, а их применение позволяет экономить дорогостоящие и дефицитные металлы. Так, ковар имеет ТКЛР, близкий к ТКЛР полупроводниковых материалов, но в то же время он плохо отводит теплоту и недостаточно устойчив против коррозии. Если же медь плакировать коваром, можно получить материал, который будет иметь несколько меньший, чем у меди, ТКЛР, но сохранит близкую для нее теплопроводность.

Использование триметаллической ленты ковар — медь — ковар для изготовления фланцев вместо коваровой ленты повысило в 2—3 раза мощность, отдаваемую транзисторами. Плакирование ковара молибденом и титаном, кроме того, повышает его антикор-

розионные свойства. При двухстороннем плакировании стали медью получают материал, обладающий хорошей теплопроводностью.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков технологический процесс изготовления керметов?
2. Каковы основные способы нанесения керамических покрытий?
3. Каков состав композиционных материалов?
4. Каково важнейшее условие получения надежного слоистого композиционного материала?
5. Каковы способы получения многослойных металлических материалов?
6. Каковы свойства керметов?
7. Какие материалы называют композиционными?
8. Каковы преимущества композиционных материалов по сравнению с образующими их компонентами?
9. В чем преимущества многослойных металлов по сравнению с их компонентами?

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

VI

ЧАСТЬ

Глава 11. Литейное производство
Глава 12. Механическая и электрическая обработка материалов
Глава 13. Заготовительные операции

Глава 11

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

11.1. ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ

Литье — один из главнейших методов изготовления изделий в машиностроении, им перерабатывается до 80 % всего объема производимого металла. Этот способ сравнительно дешев, позволяет изготавливать полые детали сложной конфигурации, которые ковкой, штамповкой или другими способами обработки материалов сделать невозможно.

Литье — процесс получения отливок (изделий) из разных расплавленных материалов — металлов, керамики, пластмасс и др., принимающих конфигурацию полости формы и сохраняющих ее после затвердевания. Отливки (изделия, детали) получают несколькими способами, основные из которых литье в песчаные формы, в кокиль, по выплавляемым моделям, в оболочковые формы, всасыванием, под давлением и центробежное.

Литье в песчаные формы — способ получения отливок в разовых формах, т. е. формах, изготовленных из песчано-глинистых формовочных материалов и используемых для одного изделия и один раз. Этот старый способ, называемый литьем в землю, целесообразен, когда требуется выполнить одну-две отливки значительной массы (до нескольких тонн). К формовочным материалам предъявляются требования по огнеупорности, газопроницаемости, прочности и пластичности, они должны обеспечивать высокое качество отливок. При литье в песчаные формы требуются модель, стержни, модельная плита, опоки, а также детали для создания литниковой системы, состоящей из литниковой чаши *1* (рис. 11.1), стояка *2*, шлакоуловителя *3*, выпора *5*, питателя *4* и прибыли. В собранном виде система готова для отливки изделия *6* в землю.

При заливке желательно, чтобы жидкий металл непрерывной струей поступал в форму. Литниковая чаша во время заливки

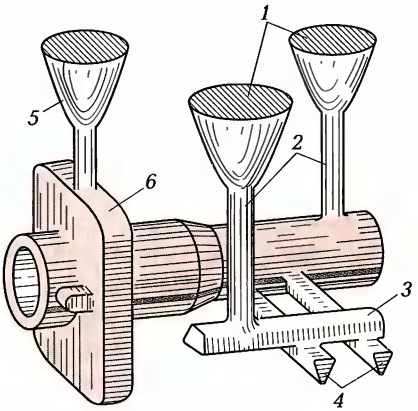


Рис. 11.1. Детали литниковой системы при отливке в землю:
1 — литниковые чаши; *2* — стояки; *3* — шлакоуловитель; *4* — питатели; *5* — выпор; *6* — изделие

должна быть заполнена металлом. Шлак и песок, плотность которых меньше плотности металла, всплывают на его поверхность и остаются в шлакоуловителе. Через выпоры из формы вытесняются газы и воздух, а также частично металл, загрязненный песком в первый момент заливки. Сталь и цветные сплавы дают большую усадку при затвердевании металла, что способствует образованию усадочных раковин. Чтобы этого избежать, иногда оставляют так называемые прибыли — металлические элементы, связанные с отливкой, через которые осуществляется подпитка жидким металлом затвердевающего изделия. Прибыли можно не делать, если в процессе остывания детали подливать жидкий металл в литниковые чаши или создать такую конструкцию отливки и технологический процесс ее изготовления, который бы исключал применение прибылей.

Литейная модель — это приспособление для получения в литейной форме рабочей полости для будущей отливки. Модели изготовляют из разных материалов в зависимости от количества и периодичности производства изделий. Во всех моделях должны быть учтены припуски на усадку затвердевающего металла и последующую механическую обработку, а также литейные уклоны и соответствующие радиусы закруглений для облегчения извлечения модели из формовочной смеси и хорошего заполнения формы жидким металлом. Кроме того, при наличии в детали внутрен-

них полостей на моделях предусматриваются специальные выступы — знаки, отверстия которых в форме служат опорами для литейных стержней. К материалу стержней предъявляются те же требования, что и к формовочным материалам. Их делают из песчано-глинистых смесей для неответственных массивных отливок, а также песчано-смоляными и жидкими самотвердеющими для получения более точных изделий.

Модельная плита (обычно металлическая) служит для крепления моделей, образующих литейную полуформу при формовке с опокой, и представляет собой жесткую раму (из стали, чугуна или алюминия) открытого ящика для удержания в нем формовочной смеси при изготовлении разовых песчаных форм, транспортирования их и заливки металлом.

Литье в кокиль — способ изготовления фасонных отливок в металлических формах (кокилях), имеющих высокую теплопроводность и позволяющих получать плотные изделия с точными размерами (малыми припусками) из чугуна, стали, алюминиевых, магниевых и других сплавов. В отличие от других способов литье в кокиль ограничивается массивностью металлических форм (например, масса отлитой башни танка составляет несколько тонн).

Литье по выплавляемым моделям — способ, обеспечивающий получение фасонных отливок с высокой точностью, не требующих дополнительной механической доработки. При этом способе используется оболочковая неразъемная газоневыделяющая форма, образованная из огнеупорного состава, рабочая полость которой получается после выплавления (удаления) модели (например, из парафина или стеарина). Жидкий металл заливают в прокаленную в засыпке, просушенную горячую форму, а после его затвердевания отливку извлекают, разрушив оболочку. Отливки получаются без швов, так как у формы нет разъемов, точность достигает ±0,05 мм на 25 мм длины отливки с шероховатостью *Ra* 3,2...1,6 мкм. Таким способом отливают детали из стали, чугуна и цветных металлов массой от нескольких граммов до 50 максимум 100 кг.

Литье в оболочковые (корковые) формы — способ получения точных отливок в «корки» (литейные формы, затвердевающие непосредственно на металлических моделях). Такое изготовление литейной формы напоминает процесс снятия маски. На нагретые до температуры 150...200 °С металлические плиты с закрепленными металлическими моделями и литниковой системой наносится песчано-бакелитовая (10 %) смесь. Бакелит, расплавляясь, смачи-

вает металлические поверхности модельной системы, которая затем с коркой смеси толщиной 7...10 мм помещается в горячую печь (300...350 °С), где в течение 1...3 мин происходит затвердевание корки на модели. Далее снятая с модели жесткая корка (полуформа) спаривается с соответствующей ей другой полуформой. Полученная форма готова к заливке металла.

Литье всасыванием (вакуумированием) — способ получения отливок в тонкостенных водоохлаждаемых металлических формах — кристаллизаторах, заполняемых расплавленным металлом при их вакуумировании за счет разности давлений (атмосферного и разрежения). От других способов литье всасыванием отличается тем, что заполнение форм тонкостенных отливок происходит спокойно, без потерь металла на литники.

Литье под давлением — способ, позволяющий изготовить отливки из цветных металлов и сталей некоторых марок с высокой точностью размеров и геометрических форм изделий, так как затвердевание расплава происходит под давлением на специальных литейных машинах.

Литье центробежное — способ изготовления, как правило, пустотелых отливок (чугунных и стальных труб, колец, втулок) под действием центробежных сил, прижимающих расплавленный металл до полного затвердевания в металлических формах без стержней. В результате полученные изделия имеют повышенную плотность в наружных слоях. В зависимости от направления оси вращения литейных форм различают горизонтальные или вертикальные литейные машины.

Литейные формы по числу отлитых изделий классифицируют на разовые, полупостоянные и постоянные.

Разовые формы разрушают после получения каждой отливки (литье в песчаные формы и литье по выплавляемым моделям).

Полупостоянные формы изготовляют из огнеупорной массы, которую обжигают при 500...600 °С. Такие формы выдерживают от нескольких десятков до нескольких сотен заливок (например, литье в оболочковые формы).

Постоянные формы — как правило, это металлические формы для литья в кокиль. При изготовлении отливок из легкоплавких металлов (цинк, алюминий, олово, магний) металлические формы выдерживают сотни тысяч заливок; при отливке изделий из чугуна — 1 000—5 000 заливок, при отливке из стали мелких деталей — 600—700 заливок (число заливок уменьшается по мере увеличения размеров изделий).

11.2. ЛИТЬЕ И ОБРАБОТКА КЕРАМИКИ

Из известных процессов формообразования керамических изделий (сухое прессование, продавливание через мундштук, пластическое формование) в производстве широко применяют шликерное литье, или горячее литье под давлением. Этим методом можно одновременно отливать в многоместных формах большое число изделий сложной конфигурации, разных размеров с однородными свойствами и высокой плотностью.

Технологический процесс горячего литья под давлением керамических изделий состоит из изготовления литейного шликера и литья деталей.

Литейный шликер изготовляют смешиванием минерального порошка ВК94-1 (массы) с органической связкой (пластификатором) и последующим вакуумированием для удаления воздуха. Органическая связка представляет собой парафин (температура плавления 52...56 °С) с некоторыми добавками других веществ (олеиновой кислоты, воска). Желательно применять парафин с минимальным содержанием примесей, легколетучих фракций и возможно меньшей усадкой при застывании. Добавки олеиновой кислоты и воска обеспечивают связь минерального порошка с парафином и устойчивость шликера против расслоения.

Обычно литейный шликер состоит из 89,4 % минерального порошка ВК94-1 (удельная поверхность 5 000 $см^2/г$), 10 % парафина, 0,3 % воска и 0,3 % олеиновой кислоты. Количество связки может изменяться в зависимости от свойств порошка, его дисперсионного состава, удельной поверхности и других условий.

Качество и стабильность литья изделий из высокоглиноземистого керамического материала зависят от качества шликера, состояния литейной оснастки, оборудования и режима (температура шликера, его давление, температура питателя, продолжительность выдержки формы под давлением). Для получения высоких стабильных результатов необходимо использовать шликер постоянного состава и контролировать его основные параметры: содержание органической связки, температуру плавления и литейную способность.

Экспериментально установлено, что наилучшие результаты литья деталей из керамики получают, используя свежеприготовленный горячий шликер, заливая его в рабочий бак литейной машины, перерабатывая полностью в течение смены и не оставляя на следующий день. Вакуумировать шликер достаточно один

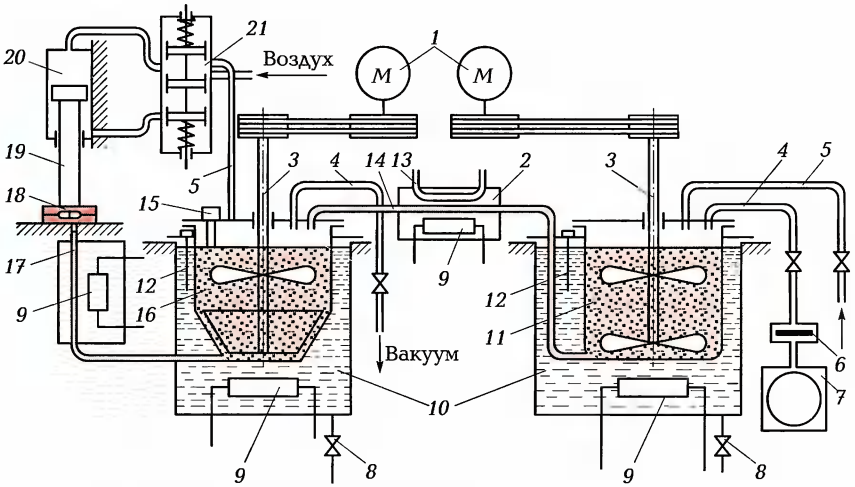


Рис. 11.2. Схема литейного полуавтомата:

1 — электродвигатели; *2* — дросселирующее устройство; *3* — мешалки; *4* — вакуум-проводы; *5* — трубопроводы сжатого воздуха; *6* — ловушка; *7* — механический вакуумный насос; *8* — сливные вентили; *9* — нагреватели; *10* — глицерин; *11*, *16* — вспомогательный и рабочий шликерные баки; *12*, *15* — датчики температуры и уровня; *13* — водяной холодильник; *14* — трубопровод пере-качки шликера; *17* — питатель; *18* — литейная форма; *19* — шток; *20* — цилиндр; *21* — распределительное устройство

раз в смену (после обеденного перерыва). Частое вакуумирование нецелесообразно, так как удаляются легкие фракции связки.

Отливают керамические детали на литейных машинах разных конструкций, принцип действия которых одинаков.

Литейные полуавтоматы (рис. 11.2) наиболее совершенны, имеют два шликерных бака: вспомогательный *11* и рабочий *16*. В этих баках шликер подогревается глицерином *10*, нагреваемым электрическими нагревателями *9*, и перемешивается мешалками *3*, приводимыми в действие электродвигателями *1*. Баки соединены между собой специальным вакуум-проводом *4* и дросселирующим устройством *2*, которое при охлаждении или нагревании может создавать шликерную пробку или устранять ее, тем самым разъединять и соединять баки для перекачки шликера из одного (вспомогательного) в другой (рабочий). Баки могут находиться под давлением сжатого воздуха или в них может создаваться разрежение (вакуум) с помощью механического вакуумного насоса *7*, оборудованного ловушкой *6*. Температура глицерина поддержива-

ется автоматически системой терморегулирования с датчиками *12*. Рабочий бак имеет датчик *15* уровня шликера.

Литейную форму *18* устанавливают на стол полуавтомата заливочным отверстием вниз и при воздействии на соответствующие органы управления прижимают штоком *19* к столу. Через некоторый промежуток времени распределительным устройством *21* сжатый воздух подается в рабочий бак *16*, и шликер под давлением воздуха по обогреваемому питателю *17* поступает в литейную форму. Реле времени автоматически отсчитывает время подачи шликера, по истечении которого воздух «стравливается» в атмосферу, давление «снимается», и шток освобождает литейную форму от прижатия. Цикл от момента подачи воздуха для прижатия формы и до момента прекращения его подачи выполняется автоматически. По окончании цикла из литейной формы извлекают литник и отлитые детали, форму собирают, процесс литья повторяется.

Рассмотрим конструкцию ***литейной формы*** для отливки четырех изоляторов. После заливки литейной формы шликером нажатием на специальный нож *9* (рис. 11.3, *а*) срезают и выталкивают литник из литниковой плиты *1*. Далее воздействием на рычаги *12*, закрепленные шарнирно на штифтах *11* в съемнике *3*, снимают отлитые детали (рис. 11.3, *б*) со знаков *4* и *6* (см. рис. 11.3, *а*), закрепленных в знакодержателе *5*, одновременно с литниковой плитой и матрицей *2*, скользящими по направляющим и фиксирующим колонкам *8*. Оставшиеся в матрице *2* отлитые детали (изоляторы *10*) извлекают другим съемником (на рисунке не показан), после чего форму собирают (на крышку *7* надевают матрицу и литниковую плиту) для продолжения работы.

Основными видами брака при литье керамических изделий являются неполное заполнение литейной формы (недолив) и наличие пор, а также большие следы отрыва литника. Причинами ***недолива*** могут быть отсутствие каналов для выхода воздуха из формы (дефект конструкции формы или изготовления), недостаточно высокая температура или низкое давление шликера, нерациональное размещение литников, малое их число и заниженные размеры, а также несовершенные форма и качество обработки рабочей поверхности литейной формы и литников.

Количество ***пор*** в отлитых изделиях зависит от качества приготовления шликера непосредственно перед литьем, а также конструкции и качества изготовления формы (не удаляется воздух, образуются встречные и вихревые потоки шликера, шликер при заполнении формы переохлаждается). Следы отрыва литника от

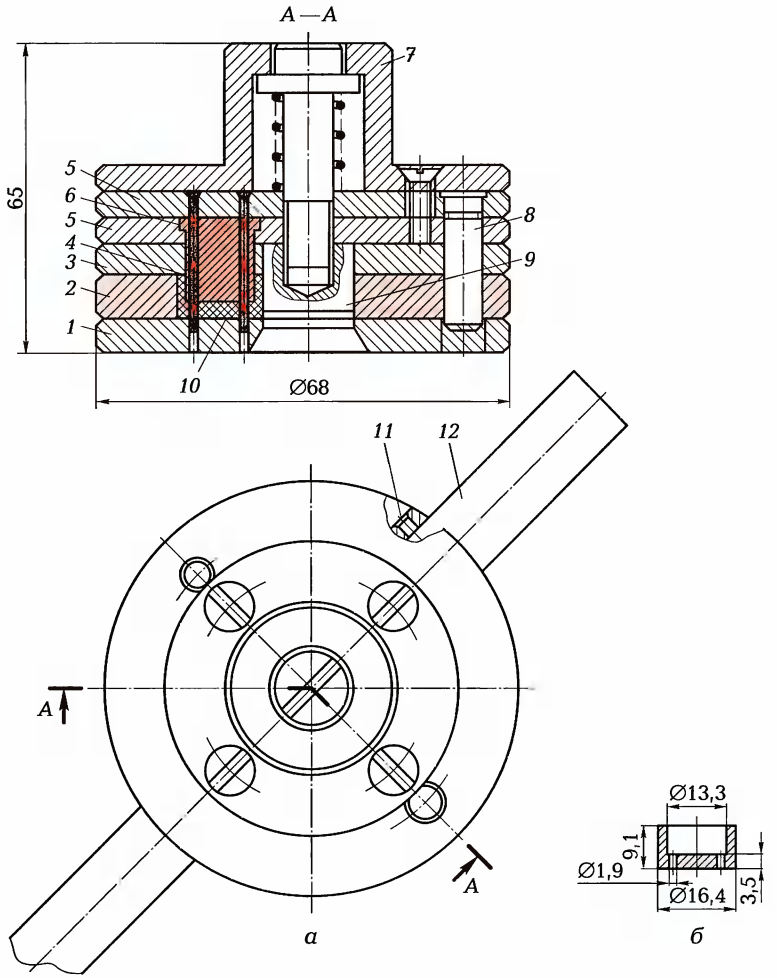


Рис. 11.3. Литейная форма для отливки четырех изоляторов:

а — общий вид; *б* — изолятор (изделие); *1* — литниковая плита; *2* — матрица; *3* — съемник; *4*, *6* — знаки; *5* — знакодержатель; *7* — крышка; *8* — колонка; *9* — нож; *10* — изолятор (изделие); *11* — штифт; *12* — рычаг

отлитых керамических деталей остаются всегда. К браковочным признакам необходимо отнести ***следы***, превышающие допустимые размеры, и невозможность их удаления. Причинами этого вида брака могут быть конструктивные дефекты литейной формы

и низкое качество ее изготовления, а также недостаточная квалификация литейщика.

Обжиг корундовой керамики, как правило, бывает предварительным и окончательным. При ***предварительном обжиге*** из керамики удаляют связку (например, парафин), нагревая детали в засыпке (например, в обожженном глиноземе, каолине, саже), служащей для адсорбции связки и, кроме того, предохраняющей сырые керамические детали от расплавления и деформации. Существенный недостаток глинозема и каолина, используемых в качестве засыпки, — некоторая сложность их удаления с обожженных керамических деталей, особенно из труднодоступных мест. Удаляют засыпку обычно механическим способом. Известен также химический способ удаления засыпки — кипячение керамических деталей в подкисленном растворе.

Канальная (газовая) сажа, используемая в качестве засыпки, не имеет этого недостатка, так как при обжиге она полностью выгорает, и изделия получаются чистыми. Между тем широкому применению сажи мешают такие ее недостатки, как взрыво- и пожароопасность, сложность соблюдения производственной гигиены (грязный процесс) и промышленных санитарных норм (образуется угарный газ CO).

Для предварительного обжига керамические детали укладывают в ***капсели*** (алундовые ящики), пересыпая засыпкой. Загружают капсели в специальных шкафах с вытяжкой или скафандрах, а затем помещают их в печь любой конструкции, но с плавным регулированием температуры с точностью ±5 °C и равномерным нагревом до максимальной температуры 1 100 ... 1 200 °C. Предварительный обжиг керамики выполняют на воздухе, поднимая температуру по определенному режиму. Особенно критична скорость подъема температуры от 20 до 250 °C, т. е. в интервале, при котором происходит плавление (54 °C), испарение, адсорбция и горение парафина. Предварительный обжиг обычно продолжается непрерывно 20 ч, т. е. в течение этого времени печи должны находиться под постоянным наблюдением дежурных.

Существует также технологический процесс ***трехступенчатого предварительного обжига*** керамики в засыпке в одну смену, суть которого состоит в следующем. В течение первой смены изделия нагревают от 20 до 120 °C, затем выключают печь. За вторую смену детали нагревают быстро до 120 °C, а затем — по заданному режиму от 120 до 240 °C, после чего печь выключают. За третью смену керамику нагревают быстро до температуры 240 °C, далее по заданному режиму до 1 100 °C. Такой прерывистый об-

жиг керамики удобен тем, что позволяет организовать работу в одну смену.

После предварительного обжига (нагрев до 1 100 °С) в керамике остается 0,1 ... 0,4 % связки. В некоторых случаях применяют предварительный обжиг в засыпке с частичным удалением связки (в мелких деталях связки остается 1 ... 3 %, а в крупных — 5 ... 6 %), для чего детали нагревают до 260 °С (скорость подъема температуры составляет 8 °С/ч) и выдерживают 3 ч.

Возможен также ***предварительный обжиг керамики без засыпки***. Его применяют для малогабаритных деталей, уложенных на полуобожженные (предварительно обожженные в засыпке) подставки из того же керамического материала, что и обжигаемые. Керамические подставки адсорбируют связку, которая частично испаряется и удаляется вытяжной системой. Обжиг с использованием керамических подставок довольно дорог, поэтому вместо них используют латунные или никелевые сетки с небольшими ячейками.

Для ***окончательного обжига*** изделия очищают от засыпки и укладывают в керамические лодочки. Окончательный обжиг высокоглиноземистой керамики выполняют в газовых (водородных) печах с температурой в рабочем канале не менее 1 700 °С. Печи могут быть как непрерывного (толкательные), так и периодического действия. В зависимости от конструкции печи окончательный обжиг может продолжаться от нескольких до 12 ч и более. Соответственно изменяется время перемещения (толкания) изделия в толкательной печи, которое обычно определяется опытным путем и составляет 15; 30 или 60 мин. Экспериментально установлено, что скорость подъема температуры при окончательном обжиге может быть любой, она определяется возможностями термического оборудования и допустимым короблением керамических изделий.

Существенно влияет на качество керамики ***окончательный обжиг в закрытом состоянии*** (***закрытый обжиг***): керамические детали перед подачей в печь укладывают на керамические подставки (обычно из того же материала, что и обжигаемые) и накрывают такими же крышками. Закрытым обжигом получают керамические детали более темного цвета, чем обожженные в открытом состоянии, с гладкой и блестящей поверхностью. Установлено, что при закрытом обжиге содержание стеклофазы в керамических изделиях на 40 ... 45 % больше, чем при открытом.

Как известно, насыщение поверхности керамики стеклом (стеклофазой) способствует повышению механической прочности, например, спаев с металлом. Повышенное содержание стекла

при закрытом обжиге объясняется тем, что не происходит его испарения (температура плавления стеклофазы 800 °С, а обжига 1 550...1 650 °С). Парциальное давление в закрытом предельно малом объеме тары, заполненной деталями, быстро повышается, а затем устанавливается постоянным, поэтому потери стекла от испарения малы.

Закрытой тарой для обжига керамики могут служить молибденовые лодочки, имеющие длительный срок эксплуатации, чистую и плотную поверхность, неадсорбирующую испаряющийся материал. В молибденовых лодочках керамику обжигают навалом. Обычно окончательный обжиг керамики выполняют в восстановительной среде печи при повышенном по сравнению с водородом в 2,5 раза содержании азота, с увлажнением до точки росы (30±5)°С. Большее содержание водорода в печи не может способствовать стабилизации температуры обжига из-за высоких теплоемкости и теплопроводности водорода по сравнению с азотом (теплоемкость водорода в 13,6, а теплопроводность в 7,15 раза больше, чем у азота).

При ***высокотемпературном обжиге*** происходит окончательное структурообразование высокоглиноземистой керамики, т. е. она приобретает определенные физико-химические свойства. При нагреве керамики плавится минерализатор — компонент, регулирующий ее спекание (для керамики ВК94-1 — это смесь оксидов $MnO—SiO_2—Cr_2O_3$), растворяются и спекаются зерна оксида алюминия, а при высокотемпературной выдержке гомогенизуется состав. После выдержки керамическое изделие представляет собой спеченный каркас оксида алюминия, заполненный расплавленным стеклом. Вследствие разных ТКЛР стекла и кристаллического оксида алюминия последний при охлаждении, сжимаясь больше, чем стекло, будет выдавливать его на поверхность керамики. Находясь в жидком состоянии при температуре выше 800 °С, стекло по мере снижения температуры будет затвердевать, движение его прекратится, вызывая рост напряжений в твердом теле. Таким образом, стекло будет сжато, а кристаллический каркас — растянут.

Основными процессами механической обработки керамики являются ***шлифовка*** и ***резка***. Для получения керамических изделий заданных размеров и геометрических форм их шлифуют, удаляя поверхностный слой, наиболее сильно насыщенный стеклом и необходимый для получения высококачественного спая керамики с металлом. При этом создаются добавочные напряжения и появляются микротрещины. Поэтому, если бы технологический

процесс мог обеспечить получение керамических деталей заданного размера и требуемой геометрической формы, необходимость в шлифовке отпала бы. К сожалению, в настоящее время полностью исключить шлифовку из технологического процесса изготовления керамических изделий невозможно.

Керамику шлифуют на плоскошлифовальном станке, применяемом в металлообработке. Многочисленными экспериментами установлено, что наибольшая удельная производительность достигается при использовании алмазного круга АПП250×15×5×75-АСВ12-М1-100 %, который может снять 40 объемов керамики при изнашивании одного объема алмазоносного слоя. Маркировка круга расшифровывается так: АПП — алмазный плоский прямого профиля; 250 — наружный диаметр, мм; 15 — ширина, мм; 5 — толщина алмазоносного слоя, мм; 75 — диаметр посадочного отверстия, мм; АСВ — алмаз синтетический высокой прочности; 12 — обозначение зернистости (размер основной фракции зерен 160...125 мкм); М1 — металлическая связка; 100 % — концентрация алмаза, соответствующая содержанию 0,878 мг алмазного порошка в 1 $мм^3$ алмазоносного слоя.

Круги из синтетических алмазов АСВ на связке М1 рекомендуется применять для шлифования керамики при скорости до 300 м/с, так как их удельная производительность в 1,6 раза выше, чем кругов из натуральных алмазов.

Для шлифования керамики ВК94-1 рекомендуется следующий режим: скорость шлифования — 28...30 м/с; продольная скорость стола — 10...15 м/мин; поперечная подача стола за один ход — 0,5...0,6 мм; глубина шлифования — 0,005...0,100 мм.

Оптимальный режим обработки керамики кругами из синтетических алмазов обеспечивает получение поверхности шероховатостью *Ra* 0,80 мкм.

На **качество шлифования** существенно влияют поперечная подача стола и глубина обработки, которые особенно в конце процесса должны быть минимальны, а также размеры зерен кристаллической фазы керамики (шероховатость поверхности возрастает пропорционально росту зерен) и охлаждение керамики и круга. Обычно в качестве охлаждающей жидкости применяют 2...3%-ный водный раствор технической соды, который подают с расходом 20 л/мин. В зоне резания даже при охлаждении возникает высокая температура (примерно 200 °С), поэтому при недостаточном охлаждении есть опасность образования микротрещин в керамике.

Правку алмазного круга выполняют на плоскошлифовальных станках контактным методом брусками из карбида кремния зеле-

ного (КЗ) зернистостью 25—16 (размер зерен основной фракции 315...160 мкм), для чего бруски закрепляют в тисках на столе станка. Алмазный круг должен вращаться со скоростью правки 25...30 м/с и обязательно обильно охлаждаться.

Для снятия больших припусков с керамики рекомендуется применять несколько алмазных кругов с уменьшающейся зернистостью. Например, черновое шлифование выполнять алмазными кругами АСВ25—АСВ16, а чистовое — АСВ16—АСВ8 и с более мелким зерном.

Шлифование цилиндрических керамических изделий по образующей обычно выполняют на бесцентровом шлифовальном станке алмазными кругами плоского прямого профиля толщиной 75...100 мм, изготовляемыми по специальному заказу. В производстве обычно используют набор из нескольких кругов разной толщины, которые собирают на специальной оправке и выравнивают по диаметру абразивным кругом на круглошлифовальном станке, а затем устанавливают на бесцентровый шлифовальный станок. Правят алмазные круги на круглошлифовальных станках кругами из карбида кремния зеленого зернистостью 25—16 и твердостью СМ1—СМ2. Алмазный и абразивный круги устанавливают на оправке в центрах станка и соответственно обеспечивают скорость 40...60 и 25...30 м/мин, обильно охлаждая.

Для получения деталей заданных размеров керамику режут на специальных станках, режущим инструментом в которых служит алмазный отрезной круг с наружной режущей кромкой. В паспортах на алмазные круги с наружной режущей кромкой указаны их размер, марка связки, концентрация алмаза, его количество в каратах, а также зернистость. Например, маркировка круга АОК100×0,3×5×20 расшифровывается так: алмазный отрезной круг с наружным диаметром 100 мм, толщиной 0,3 мм, шириной алмазного слоя 5 мм и посадочным диаметром 20 мм. Обычно эти круги работают со скоростью резания 25...50 м/с при хорошем охлаждении содовым раствором.

Шлифуемые керамические детали предварительно приклеивают к металлическим оправкам, а при резке между оправкой и керамикой прокладывают стеклянную пластину.

11.3. ПЕРЕРАБОТКА ПЛАСТМАСС

Рассмотрим некоторые способы изготовления изделий из пластмасс, которые с каждым годом все шире используются в

промышленности благодаря комплексу ценных качеств, заменяя в отдельных случаях металлы.

Термореактивные пластмассы (реактопласты) перерабатываются в основном прессованием (компрессионное горячее прессование, пресс-литье), а пресс-материалами служат пресс-порошки, гранулы, пресс-крошка, волокниты, пресс-массы и пресс-материалы со слоистым наполнителем. Реактопласты перерабатываются только один раз. Отходы, брак из реактопластов можно использовать в производстве пластмасс, но только как наполнитель в тонкоизмельченном виде.

Технологический процесс изготовления изделий из реактопластов состоит из таблетирования, предварительного подогрева пресс-материала и собственно прессования.

Таблетирование пресс-порошков производят на эксцентриковых, ротационных и гидравлических прессах (машинах). Выбор оборудования для прессования таблеток определяется размером таблеток, требованием к точности навесок и их качеству, а также необходимой производительностью. В наибольшей степени указанным требованиям отвечают ротационные машины. Эксцентриковые прессы менее производительны, но позволяют получать точные по массе и разные по размерам таблетки. На гидравлических прессах изготовляют крупные таблетки (диаметром до 230 мм и высотой до 100 мм). Достоинства таблетирования пресс-порошков заключаются в улучшении условий труда (меньше запыленность), повышении производительности (ускоряется процесс подогрева и сокращается цикл прессования, упрощается дозирование пресс-материала и др.), повышении качества и снижении брака (удаляется воздух из материала, не образуются поры).

Предварительный подогрев пресс-материала позволяет сократить длительность цикла прессования в 1,5—2 раза, повышает съем продукции с пресса, улучшает растекание пресс-материала в пресс-форме (снижается удельное давление прессования), внешний вид, физико-механические и диэлектрические свойства изделий, а также уменьшает износ пресс-форм.

В зависимости от природы пресс-материалов предварительный подогрев может быть ***низким*** (80...120 °С) и ***глубоким*** (160...200 °С). При этом пресс-материал должен быть равномерно прогрет за возможно короткое время, так как прогрев неравномерный и длительный ухудшает условия прессования и в первую очередь жидкотекучесть прессуемого материала.

Для подогрева используют генераторы ТВЧ, термошкафы, источники инфракрасных лучей и горячего воздуха. В полной мере

условиям подогрева пресс-материала отвечают генераторы ТВЧ. При помещении пресс-материала (диэлектрика) в переменное электрическое поле, в нем происходит ориентация поляризованных молекул, при которой они совершают колебания с заданной частотой, равной частоте генератора. Колебания молекул пресс-материала создают трение одних его частиц относительно других, нагревая их.

Процесс нагрева материала зависит от мощности генератора ТВЧ и частоты создаваемых им электрических колебаний.

Компрессионное прессование отличается от пресс-литья тем, что пресс-материал разогревается в пресс-форме и под давлением переходит в пластическое состояние, заполняет рабочую полость пресс-формы и там же отверждается.

Подлежащий прессованию пресс-материал *4* (рис. 11.4, *а*) помещают (загружают) в матрицу *6*, подогреваемую нагревателем *2*. При опускании ползуна *1* пресса и смыкании верхней части пресс-формы с пуансоном *3*, подогреваемым нагревателем *5*, с нижней частью начинается процесс прессования (рис. 11.4, *б*).

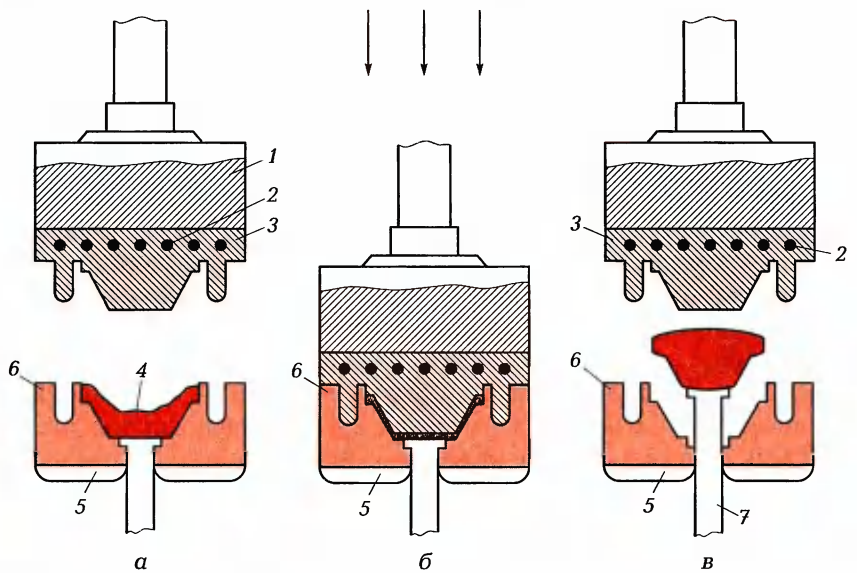


Рис. 11.4. Компрессионное прессование:

а — загрузка материала; *б* — прессование; *в* — выталкивание готового изделия; *1* — ползун пресса; *2*, *5* — нагреватели пуансона и матрицы; *3* — пуансон; *4* — пресс-материал; *6* — матрица; *7* — выталкиватель; ⟶ — направление силы прессования

После выдержки в течение заданного времени при определенных температуре и давлении процесс прессования заканчивается. Ползуном пресса верхняя часть пресс-формы с пуансоном *3* поднимается (рис. 11.4, *в*), и готовое изделие выталкивателем *7* удаляется из пресс-формы. Процесс изготовления изделия закончен.

Технологический процесс прессования состоит из нескольких операций. Рассмотрим основные из них.

Дозировка пресс-материала может быть весовой (для волокнита, текстолитовой крошки), объемной (для пресс-порошков) и штучной (для таблеток). Далее следуют предварительный подогрев в термошкафу или ТВЧ и загрузка пресс-материала в пресс-форму. Если изделие армируется, то закладные детали устанавливают предварительно. Затем пресс-форму смыкают с помощью пресса, доводят давление до заданного и несколько раз в течение цикла подпрессовывают — размыкают и смыкают пресс-форму, выпуская образовавшиеся в процессе прессования газы из пресс-формы. Подпрессовка способствует прогреву материала, сокращает выдержку и улучшает качество изделий (не образуются пузыри, трещины, повышается монолитность). ***Продолжительностью прессования*** **(*выдержкой*)** считают время от смыкания пресс-формы до окончательной распрессовки, включая и подпрессовки. После выдержки давление пресса снимают, пресс-форму размыкают и выталкиватели автоматически смещают готовое изделие с рабочих, оформляющих, поверхностей пресс-формы.

Пресс-литье (литьевое или трансферное прессование) отличается от компрессионного схемой заполнения пресс-формы и ее конструкцией. Загрузочная камера *6* (рис. 11.5) в методе пресс-литья отделена от рабочей оформляющей части *3* пресс-формы, но соединяется с ней литниковыми каналами *4*. Прессование происходит следующим образом: в начале давление передается на пуансон *1* загрузочной камеры, в которой находится пресс-материал *5*, предварительно разогретый и доведенный до вязкотекучего состояния. Пресс-материал под давлением поступает по литниковым каналам в оформляющую часть *3* пресс-формы, при ее заполнении пресс-материал одновременно полимеризуется. После определенной выдержки пресс-форму разнимают, отделяют съемную верхнюю часть *2* и извлекают готовое изделие. Этим методом перерабатывают пресс-материалы с порошковым или волокнистым наполнителем. Кроме того, он пригоден для заливки пластмассовых изделий, содержащих арматуру и закладные детали (резьбовые знаки, шпильки, сухари и др.).

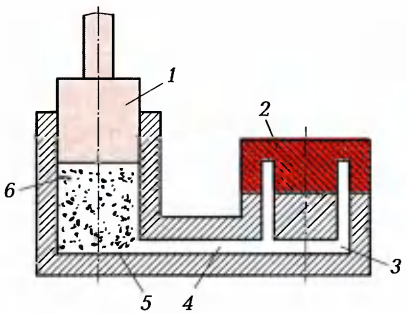


Рис. 11.5. Пресс-литье:

1 — пуансон; *2* — верхняя часть пресс-формы; *3* — оформляющая часть пресс-формы; *4* — литниковый канал; *5* — пресс-материал; *6* — загрузочная камера

На многоэтажных прессах изготовляют ***листовые пластмассовые изделия***, к которым относятся текстолит, стеклотекстолит, гетинакс, асботекстолит, декоративный слоистый пластик, древесно-слоистый пластик и винипласт. Для этого сначала пропитывают смолой ткани, бумагу или древесный шпон и сушат в электропечи. Затем из отдельных пропитанных смолой листов бумаги набирают пакеты нужной толщины и помещают в многоэтажный пресс, чередуя их с полированными прокладками и подогревными плитами сверху и снизу каждого пакета. Далее все пакеты, помещенные один на другой, сжимают с определенным усилием и выдерживают в течение заданного времени и при заданной температуре. Отдельные листы склеиваются между собой в монолит и одновременно смола полимеризуется. В результате получают листы гетинакса. Аналогично производят другие пластики, основой которых служит ткань, древесный шпон и другие материалы.

Винипласт изготовляют так же, но пакет набирают из отдельных пленочных листов. На рис. 11.6 показана схема загрузки пакетов *3* прессуемого материала в многоэтажный пресс *5*. Процесс ведется на противне *2* с плитами *4* подогрева пресса и устройством *1* подачи пакетов.

Термопластичные пластмассы (термопласты) перерабатываются разными способами — это литье под давлением, экструзия, вакуумное формование и др. Термопластичные материалы изготовляют на основе синтетических и природных высокомолекулярных соединений в виде порошков, гранул, бисера и крошки. Все они обладают способностью неоднократно плавиться.

Технологический процесс переработки термопластов состоит из подготовительных операций — наполнения, окрашивания, гранулирования, подсушки и основной — литья разными способами.

Центробежное литье применяют для изготовления изделий, имеющих форму тел вращения — труб, шкивов, втулок, цилиндров и др. Такой способ используют преимущественно для производства толстостенных и крупногабаритных изделий в небольших количествах, когда применить литейные машины затруднительно из-за большой усадки, утяжки пресс-материала и образования пузырей.

Экструзия — процесс непрерывного выдавливания (шприцевания) материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, через отверстие заданного профиля на литейной машине, называемой экструдером (червячная, шнековая, шнек-машина). Таким способом перерабатывают большинство термопластов, получая профильные изделия, пленки, листы, электроизоляционные покрытия кабельной продукции и др. В зависимости от вида изделий экструдеры комплектуют сменным оборудованием — экструзионными головками, выдувными, охлаждающими, тянущими, наматыва-

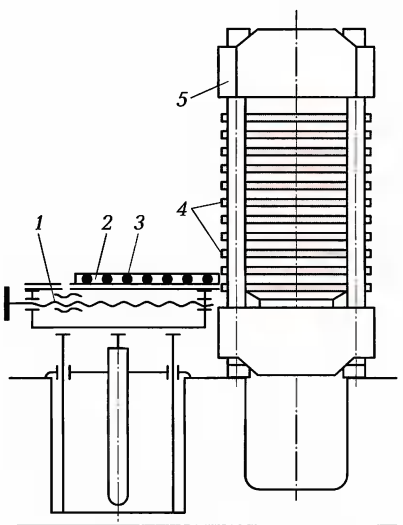


Рис. 11.6. Многоэтажный пресс:

1 — устройство подачи пакета; *2* — противень; *3* — пакет прессуемого материала; *4* — плиты подогрева пресса; *5* — многоэтажный пресс

ющими и другими устройствами. Ознакомимся с устройством и работой червячного экструдера.

Перерабатываемый материал загружают в бункер *5* (рис. 11.7), откуда он захватывается червяком *6* и продвигается вдоль обогреваемого нагревателями *9* цилиндра *2*. По мере продвижения нагреваемого полимера *4* он плавится (расплавленный полимер *3*), переходит в вязкотекучее стояние, гомогенизируется, далее проходит через экструзионную головку (или мундштук) в литейную форму *10* и после ее заполнения превращается в изделие *1*. Привод поступательного и вращательного движения червяка осуществляется устройствами *7* и *8*.

При перемещении полимера по червячному каналу происходит изменение его плотности и объема, связанное с переходом его из сыпучего твердого состояния в расплавленное. Это учитывают при конструировании литейных машин.

Термопласты перерабатывают с помощью экструдеров. Процесс литья под давлением на такой машине сводится к следующему. Пресс-материал в виде гранул засыпают в бункер, откуда он равномерно и непрерывно захватывается червячным дозатором-пластификатором, нагревается, пластифицируется и подается в переднюю зону нагревательного цилиндра, где от теплоты нагревателей окончательно плавится и переходит в вязкотекучее состояние. Далее расплавленный материал периодически проталкивается через мундштук и канал в рабочую полость предварительно

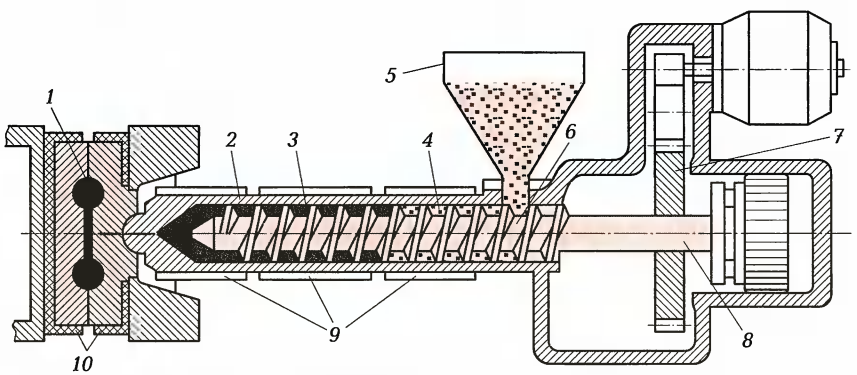


Рис. 11.7. Червячный экструдер:

1 — изделие; *2* — обогреваемый цилиндр; *3*, *4* — расплавленный и нагреваемый полимер соответственно; *5* — бункер; *6* — червяк (шнек); *7*, *8* — приводы вращательного и поступательного движения червяка; *9* — нагреватели; *10* — литейная форма

сомкнутой и закрепленной на машине пресс-формы, которая заполняется под давлением впрыснутым вязкотекучим материалом и некоторое время выдерживается в таком состоянии. За этот период форма охлаждается проточной водой, а изделие остывает и отвердевает.

Затем червяк отводится в первоначальное положение, форма размыкается, изделие выталкивается из формы, и процесс литья повторяется.

Длинномерные профильные изделия и листы производят на специальных агрегатах, состоящих из экструдера, головки, охлаждающего, тянущего, режущего и наматывающего устройств. Для получения геометрически правильных профилей необходимо учитывать усадку полимера, разное поверхностное трение, трение в середине и ближе к острым углам сечения, вызывающие неравномерное истечение массы. Внутренние напряжения возникают от неодинакового охлаждения поверхности изделия и его середины. Чтобы получить правильный профиль изделия, следует принимать по внимание сумму сопротивлений перед мундштуком и в мундштуке, которая должна быть одинаковой для каждой элементарной струйки потока массы. Это условие учитывают при конструировании отверстия в мундштуках сужением поперечного потока в средней части и расширением его на краях.

Трубы, шланги и облицовку проводов изготовляют экструзией из любых термопластов. В производстве труб применение получил полиэтилен ВД и НД, винипласт, фаолит, обладающие высокой стойкостью к агрессивным средам. Они не корродируют, легко свариваются и склеиваются, эластичны. Полиэтиленовые трубы выдерживают температуру замерзания воды и гидравлические удары. Трубы производят на специальных агрегатах, в которых экструдер выдает трубную заготовку, последовательно проходящую калибрующее приспособление, охлаждающее устройство, измерительный прибор толщины стенок, маркировочное приспособление, тянутый захват, автоматическую пилу и укладчик. В результате получают готовую трубу заданных размеров, сечения и геометрической формы.

Определяющим является ***калибрующее приспособление***, которое может быть воздушным, вакуумным — для наружного калибрования и с жестким дорном для внутреннего.

Формование шлангов осуществляется несколько проще. Шланги из поливинилхлорида и других аморфных материалов, хорошо сохраняющие свою форму в горячем состоянии, калибрующего

устройства (мундштука) и охлаждающего устройства не требуют. Для производства шлангов достаточно иметь кольцевой мундштук в экструзионной головке и калибрующий мундштук в охлаждающей ванне.

Облицовка электропроводов отличается от производства шлангов конструкцией экструзионной головки, наличием устройств подачи необлицованного провода в головку.

Качество продукции определяется соблюдением технологического процесса. Например, для производства труб с одинаковой прочностью в продольном и поперечном направлениях растягивание трубной заготовки в продольном направлении должно быть 10...15 %. Охлаждение должно быть постепенным, так как в этом случае образуется больше кристаллической фазы в полимере, уменьшается внутреннее напряжение и повышается прочность труб.

Вследствие высокой температуры в головке экструдера поверхность труб становится гладкой и глянцевой.

Вальцевание и ***каландрирование*** используются для изготовления листов и пленок из термопластов. В вальцах масса интенсивно нагревается в результате внутреннего трения частиц материала, создаваемого разностью их окружных скоростей. Материал, подлежащий вальцеванию, подают на одну сторону вальцов, и он силами трения затягивается в зазор.

Проходя между вальцами, материал перемешивается и совершает винтовые движения к противоположному от загрузки концу вальцов, где непрерывно снимается в виде листа неправильной формы, свернутого в рулон. Далее этот рулон каландрируется — раскатывается на многовальцовом каландре (диаметр вальцов от 500 мм и более, длина более 1 000 мм). В результате каландрирования получают пленки или листы с заданными толщиной и шириной с глянцевой поверхностью повышенной прочности вследствие удаления воздуха и ориентации молекул материала в направлении каландрирования. Каландрирование может быть непрерывным, если материал для доработки будет подаваться не рулонами, а из червячной машины со щелевой головкой.

Кроме вальцевания и каландрирования пленки можно производить экструзией, например выдавливанием рукавной заготовки через кольцевую головку с последующим пневматическим растяжением (раздувом). Пленка *3* (рис. 11.8) образуется по следующей технологической схеме: из экструдера *5* полимер продавливается через кольцевую щель головки *4* в виде рукавной заготовки, свободный конец которой закреплен в приемном устройстве *2*, состо-

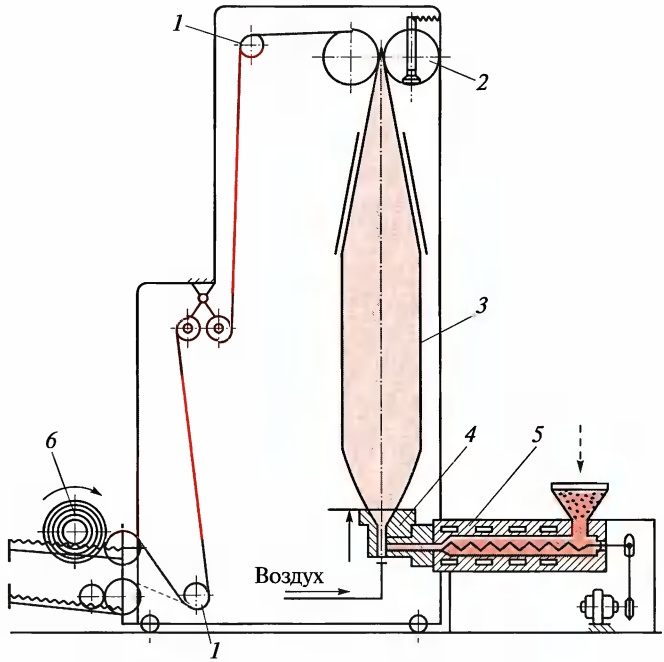


Рис. 11.8. Схема изготовления пленки:

1 — направляющий валок; *2* — приемное устройство; *3* — пленка; *4* — головка; *5* — экструдер; *6* — барабан; ⟶ — вращение барабана; - - - → — загрузка материала

ящем из системы валков. Одновременно с появлением рукавной заготовки в нее через отверстие головки нагнетается воздух под небольшим избыточным давлением для раздувания рукава в пузырь. Диаметр заготовки увеличивается, толщина ее уменьшается, она охлаждается и не слипается в зажимных валках. Для более равномерного охлаждения рукав дополнительно охлаждают сжатым воздухом под большим давлением снаружи из кольцевой насадки. Установлено, что для полиэтиленовой пленки толщиной 0,06 мм продолжительность охлаждения на участке вытяжки составляет не менее 30 с при скорости выхода пленки не более 10 м/мин. Толщина пленки зависит от сечения кольцевой щели головки и усилия продольной и поперечной вытяжки при раздуве. В результате получают двойную пленку, которую по направляющим валкам *1* в виде рулона наматывают на барабан *6*.

Канистры, бочки, бутылки изготавливают ***пневматическим раздувом*** трубной заготовки из пресс-материала в форме на спе-

циальных агрегатах. Процесс изготовления полых изделий состоит из получения вязкотекучей массы, выдавливания трубной заготовки на червячной машине, формования изделия раздувом и извлечения его из формы.

Некоторые пластмассы (органическое стекло, капролактам и др.) полимеризуют в формах. Для получения листов, плит и блоков из органического стекла применяют промышленные установки. Для этого приготавливают специальную смесь — композицию, состоящую из метилметакрилата с инициатором полимеризации (пероксидом бензоина), продуктов перегонки отходов и разных добавок. Эту композицию разливают в формы из силикатного стекла или металла, находящихся на тележках, которые последовательно проходят несколько термокамер с температурой 50... 100 °С в конце процесса. После выхода тележек из термокамер, их охлаждают и извлекают готовые изделия из форм.

Блоки и заготовки из капролактама получают по иной технологической схеме. Сначала капролактам расплавляют в плавителе при температуре 100... 120 °С, затем давлением инертного газа жидкий капролактам перемещают через фильтр в аппарат для удаления влаги до содержания 0,02 %. Инициатором реакции служит капролактам с калиевой (натриевой) щелочью или металлическим натрием. Взаимодействием капролактама с уксусным ангидридом получают ацетилкапролактам — активатор реакции.

Дозируя инициатор и активатор реакции и соединяя их вместе с расплавленным капролактамом, его разливают по формам, изготовленным из листовой коррозионно-стойкой стали на тележках. Полимеризуют капролактам в термических печах при температуре 160... 180 °С в течение 1 ч.

Полученные поделочные заготовки из органического стекла и капролактама далее обрабатывают механическим способом (резанием), превращая в изделия заданных форм и размеров.

Вакуумное формование применяют, как правило, для производства одноразовой упаковки из листовых термопластичных материалов (полиэтилена, винипласта, винипроза и др.).

Технологический процесс вакуумного формования состоит из трех основных операций:

- подготовки материала — обычно резания роликовыми ножницами рулонного полиэтилена на заготовки определенных размеров;
- вакуумного формования — плотного облегания листовым термопластичным материалом, разогретым до опре-

деленной температуры, вакуумной формы (вакуум-формы) под действием атмосферного давления;

- обрезки кромок отформованных изделий прямоугольной формы роликовыми ножницами, а изделий фигурного контура — простейшими штампами (просечками).

Вакуум-формовочная машина показана на рис. 11.9. На станине *7* находится плита *6* с прямоугольным окном и уплотнительной прокладкой *10* по периметру. На этой же плите расположена подвижная рамка *4*, которая может подниматься и опускаться, вращаясь относительно неподвижной оси, расположенной сзади машины. В нижнем положении подвижная рамка плотно прилегает к уплотняющей прокладке плиты *6* и может быть закреплена в таком положении специальным запором.

С нижней стороны подвижная рамка также имеет по периметру широкую уплотняющую прокладку *10*, которая может прилегать одновременно к прокладке плиты и к уплотняющей прокладке подвижного стола *8*. Стол может подниматься и опускаться по направляющим колонкам специальным устройством. Верхняя

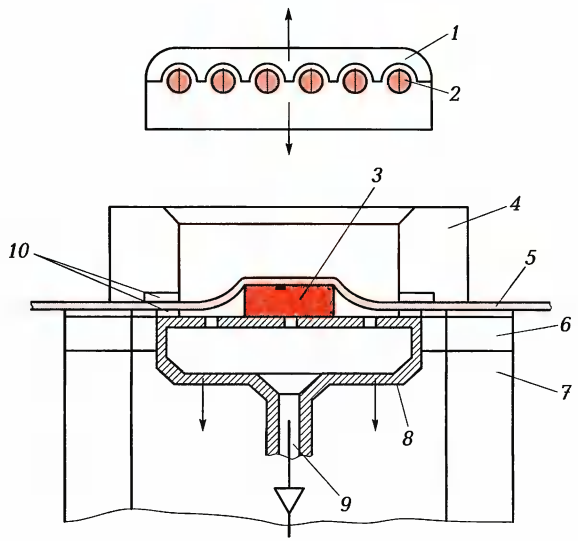


Рис. 11.9. Вакуум-формовочная машина:

1 — подвижный нагреватель; *2* — нагревательный элемент; *3* — вакуум-форма; *4* — подвижная рамка; *5* — полиэтиленовая пленка; *6* — плита; *7* — станина; *8* — подвижной стол; *9* — вакуумный трубопровод; *10* — прокладки; ⟶ — движение стола и подвижного нагревателя

плоскость подвижного стола перфорирована и служит для размещения вакуум-формы *3* и откачки воздуха. При формовании полиэтиленовую пленку *5* уплотняют между подвижной рамкой *4*, плитой *6* и подвижным столом *8*. Образовавшийся замкнутый объем с помощью вакуумного крана и шлангов можно соединять с вакуумным насосом, управляя работой с помощью вакуумной системы.

Подвижный нагреватель *1* со специальным нагревательным элементом *2* может опускаться над подвижным столом и полиэтиленовой пленкой *5* в период ее разогрева и подниматься в исходное положение, когда разогрев окончен. Процесс нагрева контролируется реле времени.

При работе вакуум-формовочной машины на перфорированную поверхность подвижного стола укладывают вакуум-форму *3*, плотно зажимают ее между плитой *6* и подвижной рамкой *4*, затем опускают нагреватель *1* и разогревают пластмассу до температуры формования. Окончив разогрев, нагреватель поднимают в верхнее положение, а подвижный стол — до плотного соприкосновения с листом пластмассы и открывают вакуумный кран, соединяющий его вакуумным трубопроводом *9* с насосом. После плотного обтягивания вакуум-формы разогретой пластмассой под действием атмосферного давления вакуумный кран закрывают, подвижный стол с вакуум-формой опускают, рамку освобождают от запора и вынимают отформованное изделие, которое затем обрезают до заданных размеров.

Термопластичный пенопласт — пенополистирол ПС-Б (пенополистирол беспрессовый), который состоит из суспензионного полистирола, содержащего газообразователь изопентан, и поставляется в виде гранул (бисера) белого цвета размером 0,3...2,5 мм. Из этого материала делают упаковочную тару, термоизоляционные панели и другие изделия.

Технологический процесс производства изделий из пенопласта довольно прост, начинается с его подвспенивания (неполного вспенивания), которое выполняют в ванне с кипящей водой для увеличения размеров бисера, что уменьшает его объемную массу. На дно ванны опускают сетку, в которую засыпают бисер (из расчета 200 г на 1 $м^2$ поверхности воды) и подвспенивают его в течение 3...7 мин. Время подвспенивания можно подбирать опытным путем для каждой партии бисера так, чтобы подвспененный и высушенный бисер имел насыпную массу, равную объемной массе изделия. Закончив подвспенивание, вынимают сетку с бисером из ванны и отправляют в сушильный шкаф на сушку при

35...40 °С в течение 30...90 мин. Одним из наиболее простых способов изготовления изделия является его окончательное вспенивание в разборной форме, обогреваемой водой. Прежде чем заполнить форму из дюралюминия бисером, ее внутренние стенки смазывают глицерином, чтобы готовое изделие не прилипало. Затем в форму засыпают подвспененный и высушенный бисер, по мере заполнения встряхивая ее для уплотнения. Далее форму закрывают и погружают в кипящую воду на время, определяемое опытным путем.

Окончательное вспенивание бисера можно проводить также в разборных формах, обогреваемых острым водяным паром при температуре 102...110 °С, давлении 0,12...0,15 МПа, предварительно поместив их в автоклав. После вспенивания пенополистирола форму охлаждают сначала на воздухе до 50...60 °С, а затем холодной водой до комнатной температуры, раскрывают и извлекают из нее готовое изделие, которое подсушивают на воздухе, чтобы удалить поверхностную влагу. Изделия из пенопласта очень легкие и имеют хороший внешний вид.

Стеклопластики — материалы на основе термореактивных композиций, в состав которых входят жидкие смолы и растворы твердых смол — эпоксидные, полиэфирные и др., а также отвердители, красители, стекловолокнистые наполнители (ровница, стеклоткани, стекломаты).

Стеклопластики используют для производства крупногабаритных изделий (корпусов лодок, катеров, кузовов автомобилей и др.). Для этого изготавливают шаблон (модель), по которому последовательно, слой за слоем после отверждения предыдущего, перемежая клей со стеклотканью, выклеивают изделие. При этом каждый слой стеклоткани пробивают так, чтобы клей оказался на ее поверхности. Для облегчения снятия готового изделия с шаблона предварительно создают нейтральную прослойку, которая не склеивается с первым слоем клея и стеклоткани.

Кроме довольно простой переработки пластмассы можно сваривать и склеивать, а также наносить на разные материалы. С некоторыми способами этих процессов ознакомимся более подробно.

Сваркой соединяют детали из однородных пластмасс, прежде всего из термопластов, к которым относятся трубы, листы, пленки и отдельные изделия. Соединение происходит вследствие взаимной диффузии частиц поверхностных слоев в расплавленном состоянии. Основными параметрами режима сварки являются температура нагрева и давление, которые взаимосвязаны, должны быть оптимальны и подобраны опытным путем. Про-

мышленное применение получили сварка горячим газом, контактным нагревом, термоимпульсная, высокочастотная и ультразвуковая.

Суть сварки ***горячим газом*** состоит в разогреве свариваемых деталей и присадочного прутка до состояния, при котором происходит слипание соединяемых элементов. Таким образом сваривают, например, листы винипласта при облицовке гальванических ванн. Источником горячего газа служит электрическая сварочная горелка, напоминающая электрический паяльник, в котором газ нагревается и выходит наружу через сменный наконечник. Расход газа регулируют специальным краником. Прочность сварки зависит от квалификации сварщика и колеблется в пределах 30...80 % прочности свариваемого материала.

При ***контактной сварке*** соединяемые материалы нагревают горячими роликами или лентой из материала с высоким электрическим сопротивлением, по которой пропускают электрический ток. Сварка возможна как внахлестку, так и встык и может быть одно- и двухсторонней.

Термоимпульсной сваркой обычно соединяют трубы. Для этого на трубу меньшего диаметра наматывают нихромовую проволоку, на спираль и трубу надевают трубу с большим диаметром. При подаче электрического импульса на спираль свариваемые концы труб разогреваются и прочно соединяются. Нихромовую проволоку оставляют внутри соединения.

Высокочастотная сварка применима только для полярных термопластов (поливинилхлорида, полиамидов, полиметилметакрилата) и основана на разогреве этих материалов за счет внутреннего трения колеблющихся полярных частиц термопласта (элементарных магнетиков) под воздействием ВЧ-поля. Количество теплоты, образующейся в свариваемом материале, зависит от его природы, а точнее — от величины тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости, частоты электрического поля и его напряженности. Электроды обычно делают по форме шва, на них подают питание от ВЧ-генератора частотой 30...70 МГц и создают давление 0,2...2,0 МПа.

При ***ультразвуковой сварке*** свариваемые поверхности термопластов разогреваются под воздействием механических колебаний, создаваемых УЗ-генератором. В результате соединяемые поверхности нагреваются до пластического состояния и под воздействием приложенного давления свариваются.

Склеиванием можно соединять термопласты и реактопласты (однородные и неоднородные) между собой и с другими матери-

алами (металлами, деревом, тканью и т.п.). В качестве адгезивов служат, как правило, синтетические клеи, представляющие собой композиции, в состав которых входят несколько клеящих полимеров, растворители, отвердители (для термореактивных клеев), наполнители (для толстых швов), пластификаторы (для эластичных швов) и другие добавки.

Технологический процесс склеивания обычно состоит из подготовки склеиваемых поверхностей, приготовления клея, нанесения его на соединяемые поверхности, соединения их с закреплением и созданием определенного давления, термообработки (отверждения) клеевого соединения и контроля качества (по контрольным образцам).

Пластмассы широко применяют в качестве антикоррозионных, декоративных, влагозащитных, износостойких и ударопрочных **покрытий** на металлах, дереве, стекле, тканях, бумаге и других материалах. На металлах покрытия из полиэтилена, полипропилена, поликапролактама, поливинилбутираля наносят в виде порошков и гранул. Полимеры при этом должны обладать хорошей растекаемостью при оплавлении на горячей поверхности металла, иметь высокую адгезию и удовлетворительную термостабильность. Известно несколько способов нанесения полимеров на металлы. Все они основаны на одном принципе — закреплении пластмассы на нагретом до определенной температуры металле за счет образования адгезии. Ознакомимся с двумя способами: вихревым и электростатическим.

При ***вихревом способе*** металлическое изделие, нагретое до температуры выше температуры плавления полимера, погружают в ванну с пластмассовым порошком, находящимся во взвешенном (псевдоожиженном) состоянии. Порошок на горячей поверхности металла оплавляется, а при дополнительном нагреве растекается, образуя сплошной равномерный слой покрытия толщиной 0,2...0,8 мм в зависимости от продолжительности погружения (5...10 с).

Электростатический способ отличается от вихревого тем, что при нанесении покрытия порошок полимера подключается к отрицательному полюсу источника постоянного тока, а изделие — к положительному с напряжением 100...150 кВ. Порошку придают аэродинамическую подвижность струей воздуха, в результате порошок налипает на холодное изделие равномерным слоем и прочно удерживается на нем. Далее следуют нагрев и оплавление полимера с образованием пленки с хорошей адгезией. Достоинством данного способа является возможность нанесения покры-

тия на изделия сложной конфигурации — как на наружные, так и на внутренние поверхности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют основные способы литья металлов?
2. В чем преимущества литья по сравнению с обработкой металлов резанием?
3. Каковы преимущества литья в кокиль по сравнению с литьем в землю?
4. Какие существуют основные способы переработки керамики?
5. Как называются составные части керамики?
6. Для чего обжигают керамику?
7. Какие существуют основные способы переработки пластмасс?
8. Из каких основных компонентов состоит пластмасса?
9. Что такое литьевое прессование?
10. В чем основные преимущества пластмасс по сравнению с металлами?

Глава 12

МЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

12.1. РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Резание — это процесс снятия лишнего материала (припуска) с заготовки режущим инструментом для получения детали с заданными размерами и шероховатостью (качеством поверхности). Отходом при резании является ***стружка***, которая может быть разной (скалывания, надлома, сливной и др.) в зависимости от свойств материала, скорости резания, сечения снимаемого слоя и состояния инструмента: угла резания, заточки, материала режущей кромки и др. При резании заготовка и режущий инструмент испытывают большие деформации и нагрузки, превращающиеся в теплоту, которая распределяется между стружкой (до 80 %), деталью и режущим инструментом. Температура режущей кромки инструмента всегда выше температуры стружки. В зависимости от режима резания температура нагрева перераспределяется. Так, с повышением скорости резания количество теплоты, отводимое в обрабатываемую деталь, уменьшается, а в инструмент и стружку — увеличивается.

В процессе резания инструмент подвергается упругой деформации, а обрабатываемый материал — срезаемый слой металла, поверхность резания и поверхностный слой (1 ... 2 мм) за линией среза — пластической деформации. Обрабатываемый материал, деформируясь, упрочняется (наклепывается), в результате его твердость повышается, а это, в свою очередь, уменьшает изнашивание трущихся деталей и увеличивает усталостную прочность. Упрочнение мягких и пластичных металлов значительно сильнее, чем твердых. Твердость наклепанного слоя стали в зависимости от режима резания повышается в 2—4 раза по сравнению с твердостью до обработки. При необходимости нагартованный металл разупрочняют термообработкой (например, отжимом).

Резание осуществляется ***специальным инструментом***. Режущий инструмент представляет собой клин, который с силой *P* (рис. 12.1) внедряется в материал для выполнения работы резания. Такое возможно, если твердость материала клина *2* будет значительно превышать твердость обрабатываемого материала. На этапе внедрения клина в материал создается расклинивающее усилие, которое действует в противоположные стороны и может оказаться в пять и более раз больше приложенного усилия. Причем, чем острее клин, тем больше расклинивающее усилие при той же силе *P*. Но уменьшать угол клина можно только до некоторой величины, так как при этом его прочность может значительно уменьшиться. Вначале резания срезаемый слой материала испытывает сжатие до тех пор, пока усилие сжатия не окажется больше сил сцепления микрочастиц материала. В этот момент от обрабатываемого материала (заготовка *3*) начинают скалываться (срезаться) отдельные кусочки *а*—*g*, из которых собирается стружка *1*. Угол плоскости скалывания для стали может составлять 145...155°.

Как было отмечено ранее, резание является наиболее распространенным способом обработки. Одним из основных инструментов при этом служит резец, представляющий собой усовершенствованный клин. Все режущие инструменты — это разновидности резца. Конструкций резцов очень много, их подразделяют по материалу, назначению, станочному оборудованию, на левые и правые, а также по другим признакам. ***Основными типами резцов*** являются проходные, расточные, подрезные, отрезные, резьбовые и др. Поскольку резцы устроены примерно одинаково, до-

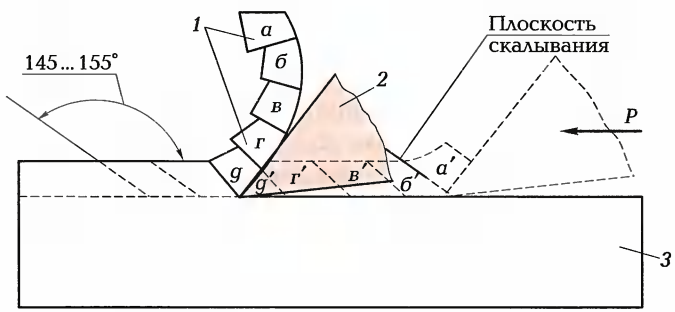


Рис. 12.1. Схема резания:

1 — стружка; *2* — клин; *3* — заготовка; *а*—*д* — кусочки стружки; *а'*—*д'* — те же участки до срезания; *P* — сила внедрения клина

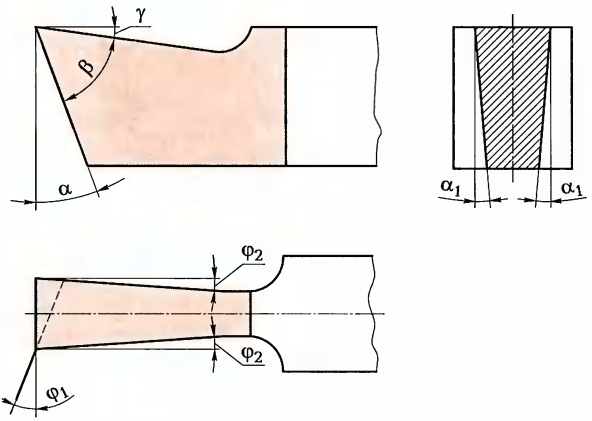


Рис. 12.2. Отрезной резец:

γ, α — главные передний и задний углы; β — угол заострения; φ_1, φ_2 — углы наклона лезвия и поднутрения; α_1 — задний угол боковых поверхностей

статочно подробно рассмотреть любой из них, например отрезной резец (рис. 12.2).

Отрезными резцами материал разделяют на токарных, строгальных, револьверных станках и токарных автоматах. Режущую часть резцов выполняют обычно из быстрорежущей стали или твердого сплава. На токарных автоматах кроме обычных используют круглые резцы. Если токарные станки имеют два суппорта, то можно выполнять встречную резку одновременно двумя резцами. Для получения высокой производительности и продолжительной стойкости режущего инструмента применительно к свойствам разрезаемых материалов резцы должны иметь оптимальные размеры режущей части, определяемые главными передним γ и задним α углами. Например, для стали главный передний угол равен 25°, а главный задний — 8°, а для хрупких и твердых бронз — 0...5 и 6...8° соответственно. Кроме того, боковые поверхности отрезных резцов должны иметь угол поднутрения $\varphi_2 = 1...2°$ и задние углы α_1 на боковых поверхностях резца ($\alpha_1 = 2...3°$). Для получения чистой поверхности отрезаемого материала рекомендуется режущее лезвие резца делать наклонным ($\varphi_1 = 8...15°$ для стали и 20...25° для мягких материалов). Ширина реза зависит от диаметра заготовки. Так, для заготовки диаметром до 25 мм ширина резца составляет 3...4 мм, а для заготовки диаметром 60...100 мм она равна 5...6 мм. Угол β называется углом заострения или углом заточки.

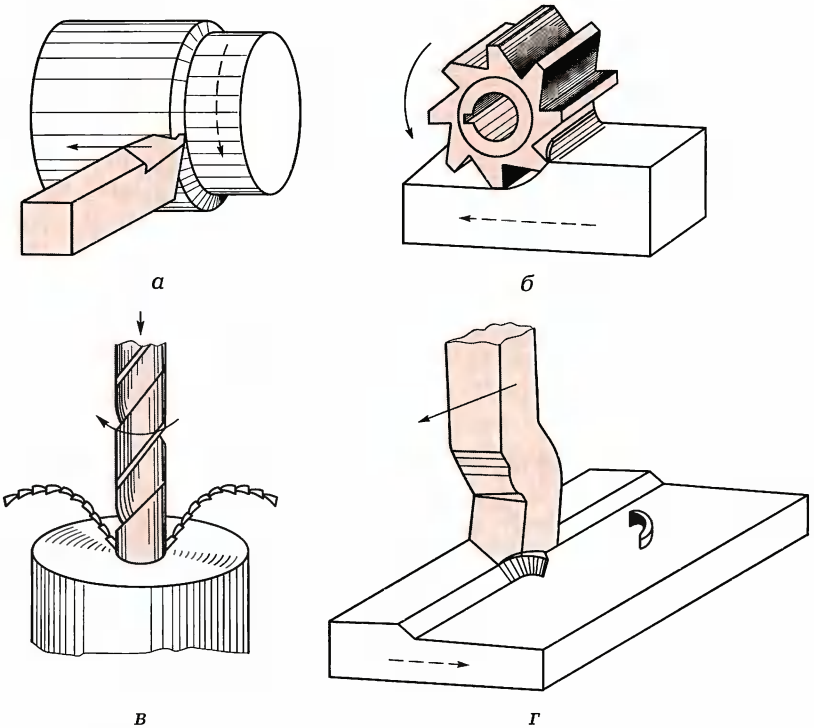


Рис. 12.3. Виды механической обработки резанием:
а — точение; *б* — фрезерование; *в* — сверление; *г* — строгание; ⟶ — движение инструмента; - - - → — движение обрабатываемой заготовки

При разделении металлов отрезными резцами необходимо обильно охлаждать место реза (материал и инструмент), резец устанавливать строго по центру отрезаемого материала (для твердосплавных резцов рекомендуется устанавливать на 0,5...1,0 мм ниже центра) и при отрезке с большой глубиной прорезания процесс проводить перевернутым резцом и при обратном вращении обрабатываемого материала.

Возможными **видами механической обработки** материалов резанием являются точение, фрезерование, сверление и строгание.

При ***точении*** (рис. 12.3, *а*) заготовка вращается на проходной резец, который с заданными подачей и глубиной резания перемещается влево, снимая стружку. Резец, как правило, устанавливают по центру обрабатываемой заготовки.

Фрезерование (рис. 12.3, *б*) выполняется цилиндрической фрезой, которая вращается навстречу подаваемой заготовке.

Сверление (рис. 12.3, *в*) осуществляется спиральным сверлом, которое вращается и одновременно опускается в заготовку. Оценивая характер выходящей стружки, можно заключить, что сверло правильно заточено и одновременно работают обе его режущие кромки (для большинства металлов стружка сливная).

Строгание (рис. 12.3, *г*) выполняется строгальным резцом, который при движении вперед совершает рабочий ход, а при движении назад — холостой. В этот момент он откидывается, а заготовка перемещается вправо на заданную подачу.

Из разных видов обработки металлов резанием ознакомимся только с некоторыми — нарезанием зубьев, протягиванием, шлифованием и др.

Нарезание ***зубьев*** шестерен и зубчатых колес осуществляют разными способами. Например, нарезание зубьев цилиндрических колес методом копирования осуществляют с помощью дисковых модульных фрез (рис. 12.4, *а*) на горизонтально-фрезерных станках и пальцевых модульных фрез (рис. 12.4, *б*) на вертикально-фрезерных станках с использованием делительных головок. При этом методе нарезания впадины зубьев соответствуют форме и размерам (модулю) инструмента.

Более производительным является способ нарезания зубьев обкаткой (рис. 12.4, *в*), при котором червячная заданного модуля фреза обкатывает вращающуюся заготовку, при этом последняя поднимается навстречу инструменту до полного нарезания зубьев. Нарезание зубьев выполняют на горизонтально-фрезерных станках или на специальных зуборезных. Червячными фрезами кроме зубьев нарезают резьбы, шлицы и др.

Гребенкой зубья шестерен изготовляют способом долбления (рис. 12.4, *г*), при котором заготовка шестерни медленно вращается, а гребенка совершает движения вниз-вверх перпендикулярно плоскости заготовки, чередуя рабочие ходы с холостыми.

Протягивание — это способ обработки материалов резанием и поверхностным пластическим деформированием внутренних и наружных поверхностей заготовок на протяжных станках. Этот способ обработки получил широкое применение в крупносерийном и массовом производстве благодаря большой производительности и высокой точности обработки, превосходя в несколько раз строгание, долбление или фрезерование.

С помощью протягивания обрабатывают сквозные отверстия разной конфигурации (рис. 12.5, *а*) с внутренним размером до

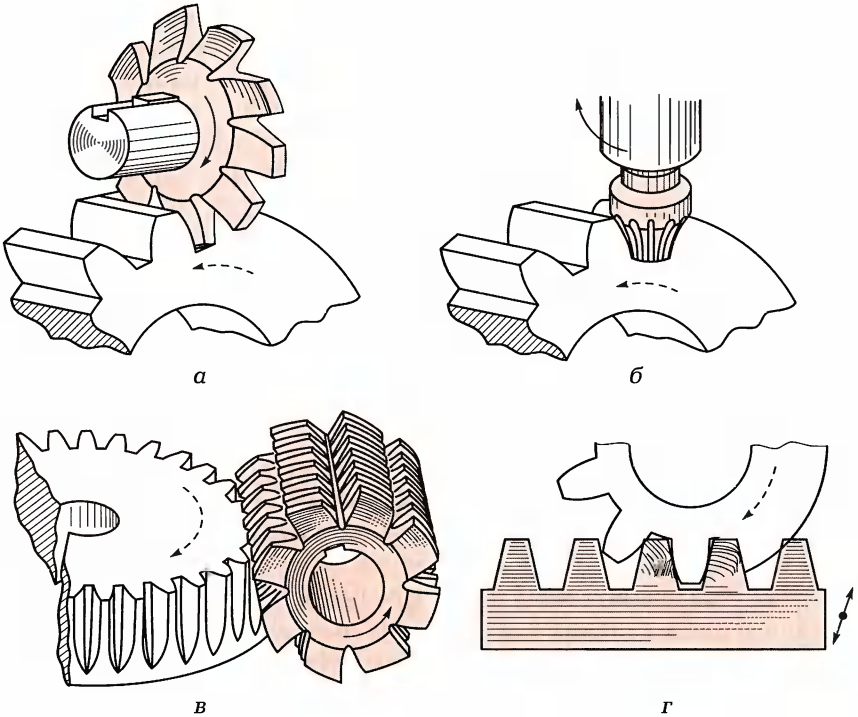


Рис. 12.4. Основные способы нарезания зубьев:

а, *б* — копированием с помощью модульных дисковой и пальцевой фрез; *в* — обкаткой червячной фрезой; *г* — долблением гребенкой; ←●→ — движение инструмента; ----→ — движение заготовки

300 мм. Предварительно в заготовках, предназначенных для протягивания, сверлами или резцами делают отверстия, длина которых обычно не превышает трехкратной величины их диаметров.

Инструментом для протягивания служит протяжка (рис. 12.5, *б*) — многолезвийный режущий инструмент, предназначенный для обработки внутренних и наружных поверхностей разного профиля. По форме обрабатываемых поверхностей протяжки подразделяют на плоские, круглые и фасонные. Протяжка — стержень с зубьями, размеры которых последовательно увеличиваются, а форма изменяется от исходной до заданной (например, от круглой до шестигранной).

Наружным протягиванием получают прямые и спиральные зубья на шестернях и секторах, прямые и винтовые канавки, шлицы и др. Протяжные станки бывают вертикальными (преимуще-

ственно для наружного протягивания) и горизонтальными (для внутреннего протягивания) с гидравлическим приводом ползуна, обеспечивающим плавность хода.

Развертывание — это способ чистовой обработки цилиндрических и конических отверстий диаметром до 100 мм резанием с помощью металлорежущего инструмента — развертки, обеспечивающей степень точности обработки 7—9-го квалитетов и шероховатость *Ra* 0,100 мкм. При этом происходит незначительный съем (несколько десятков микрометров) обрабатываемого материала и упрочнение тонкого поверхностного слоя. Предварительно под развертывание отверстие детали обрабатывают сверлом или зенкером, оставляя соответствующий припуск под окончательную обработку.

Развертка (см. рис. 7.1, *ж*) представляет собой многолезвийный режущий инструмент из инструментальных материалов, предназначенный для точной и окончательной обработки. Развертка обычно имеет четное (6—12) число зубьев, что придает ей высокую устойчивость в отверстии, повышенную по сравнению со сверлом жесткость и возможность получения отверстия большей точности. Развертка обычно состоит из направляющего конуса, режущей, калибрующей частей, образующих рабочую часть, а также шейки и хвостовика с квадратом. Развертки подразделяются по способу применения на ручные и машинные, по характеру

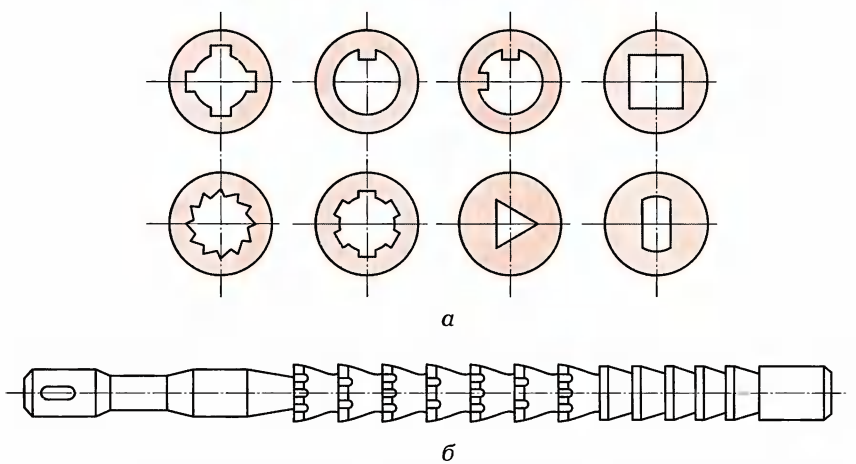


Рис. 12.5. Отверстия разной конфигурации, полученные протягиванием (*а*), и протяжка (*б*)

крепления — на хвостовые и насадные, по конструкции — на цельные, сборные, регулируемые со вставными ножами и т. д.

Твердые и хрупкие материалы (стекло, керамику, полупроводниковые материалы) можно резать алмазным инструментом — алмазными отрезными дисками (кругами) и скрайбированием.

Алмазные диски бывают двух типов — с наружной и внутренней режущими кромками. Алмазные диски ***с наружной режущей кромкой***, шаржированной алмазом, применяют для резки, когда требования к точности невысоки, а стоимость материала, переходящего в отходы, незначительна. Такие диски в зависимости от величины диаметра позволяют резать заготовки толщиной (диаметром) до 30 мм при толщине самого инструмента (металлической основы) 0,5...0,6 мм. Алмазным диском разрезают заготовки при его частоте вращения 2 000...3 000 $мин^{-1}$ и обильном охлаждении водой или специальными охлаждающими жидкостями.

Диски *1* (рис. 12.6) ***с внутренней режущей кромкой*** *2*, которая шаржирована алмазом, используют в специальных станках, на которых разрезают твердые хрупкие материалы *3*, например слитки полупроводниковых материалов на пластины диаметром до 150 мм. Толщина отрезаемых пластин 200...300 мкм при примерно такой же ширине реза.

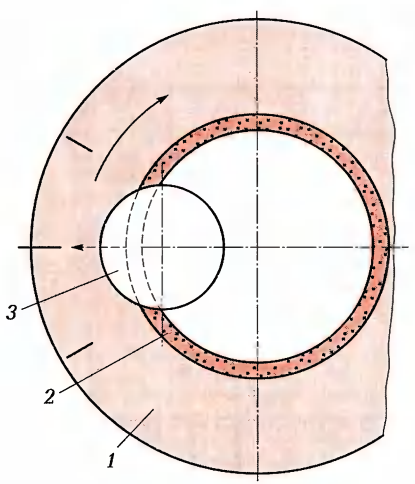


Рис. 12.6. Резание материала диском с внутренней режущей кромкой:
1 — диск; *2* — внутренняя режущая кромка; *3* — твердый хрупкий материал; ⟶ — движение диска; - - - → — движение разрезаемого материала

Скрайбирование — это способ разделения тонких и хрупких пластин (например, керамики, ситалла, полупроводников) на отдельные части, состоящий из двух этапов — нанесения на пластине надрезов (рисок, царапин) глубиной 10...15 мкм алмазным резцом (скрайбером) и последующего разламывания по ним на мягкой опоре при растягивании или прокатке пластины валиком.

Шлифование — это, как правило, финишная операция при изготовлении изделий металлообработкой (резанием). Обычно шлифуют детали, прошедшие термическую обработку, получая при этом заданные размеры и шероховатость. Обработка ведется шлифовальными кругами, в которых резцами служат зерна алмаза, корунда, карборунда, закрепленные связкой. В процессе работы круги самозатачиваются: сработавшиеся режущие частицы осыпаются, а на смену им обнажаются и вступают в работу новые.

Шлифование выполняется разными способами. При ***наружном круглом*** шлифовании деталь *1* (рис. 12.7, *а*), как правило, вращается в центрах и продольно перемещается, а абразивный шлифовальный круг *2* вращается навстречу детали и может подаваться к ней, выполняя начальное врезание на заданную глубину.

При ***наружном плоском*** шлифовании плоские поверхности детали *1* (рис. 12.7, *б*) обрабатывают периферийной частью шлифовального круга или его торцом — чашкой *3*. Шлифуемая деталь удерживается магнитом стола шлифовального станка, а вращающийся шлифовальный круг может опускаться и подниматься, подача заготовки (детали) осуществляется перемещением стола станка в двух направлениях.

Способом ***внутреннего*** шлифования обрабатывают сквозные, глухие, ступенчатые цилиндрические и конические отверстия. Шлифуемую деталь *1* (рис. 12.7, *в*) закрепляют в патроне *4*, вместе с которым она вращается в направлении стрелки. Шлифовальный круг имеет свой привод, с помощью которого он вращается вокруг собственной оси, передвигается вперед-назад и может перемещаться перпендикулярно своей оси вращения для врезания в обрабатываемую деталь. Обычно инструмент для внутреннего шлифования, состоящий из абразивного круга и оправки, называют шлифовальной головкой *5*.

Бесцентровое шлифование широко применяют в серийном и массовом производстве для обработки цилиндрических, преимущественно гладких деталей с продольной автоматической подачей. Достоинством бесцентрового шлифования является большая производительность и высокая стабильность размеров шлифуемых деталей. При шлифовании на бесцентрово-шлифовальном

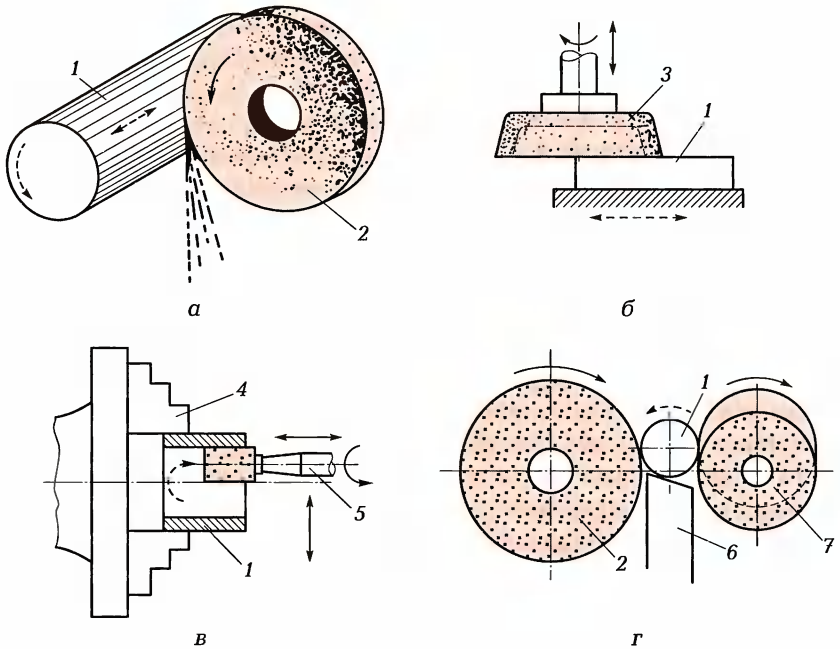


Рис. 12.7. Разные способы шлифования:

а — наружное круглое; *б* — наружное плоское; *в* — внутреннее; *г* — бесцентровое; *1* — деталь; *2* — шлифовальный круг; *3* — чашка; *4* — патрон; *5* — шлифовальная головка; *6* — нож; *7* — ведущий круг; ⟶ — движение шлифовального круга; - - - -→ — движение заготовки

станке деталь *1* (рис. 12.7, *г*), проходя между двумя абразивными кругами — шлифовальным *2* и ведущим *7*, опирается на нож *6*, причем центр шлифуемой детали находится несколько выше центров кругов. Ведущий круг *7* вращается со скоростью скольжения по обрабатываемой поверхности 10...50 м/мин, а шлифование осуществляется кругом *2*, который вращается со скоростью шлифования 30...35 м/с.

В процессе шлифования с продольной подачей ведущий круг устанавливается так, что его ось наклонена к оси шлифовального круга. За счет вращения ведущего круга шлифуемая деталь наряду с круговым совершает и продольное перемещение. Величина продольного перемещения тем больше, чем больше угол наклона ведущего круга. При шлифовании коротких деталей этот угол составляет 1...2,5°, а при шлифовании прутков — 3...4,5°.

Шлифование может выполняться за несколько проходов. При черновом шлифовании за один проход снимается 0,05...0,03 мм.

При всех видах шлифования обрабатываемые детали и шлифовальные круги обязательно охлаждают специальными жидкостями, которыми одновременно удаляются отходы резания и абразивная пыль.

12.2. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением — это технологические процессы формоизменения заготовок без нарушения их сплошности в результате пластической деформации под действием внешних сил. Примером могут быть прокатка, горячая и холодная штамповка, ковка, экструзия, волочение и др.

Обработка давлением может выполняться в холодном или горячем состоянии. В обоих случаях металл подвергается пластической деформации. При холодной обработке с увеличением степени деформации у металла повышается твердость и прочность, но при этом он хуже деформируется, требуется большее усилие для изменения формы, размеров, меняются свойства обрабатываемого материала. Упрочнение металла при пластической деформации называют ***наклепом***. В процессе прокатки, ковки и волочения зерна металла деформируются — расплющиваются, сдавливаются, вытягиваются и из беспорядочно расположенных ориентируются в направлении деформации, а при большой степени обжатия зернистая структура превращается в волокнистую. Чтобы металлу вернуть пластичность, необходимую для дальнейшей обработки, его отжигают. Отжигом снимают наклеп, повышают пластичность, снижают твердость и частично восстанавливают структуру.

Прокатка — процесс обработки металлов давлением, при котором нагретый слиток (заготовка) пропускается между валками прокатного стана. После прокатки изменяются форма, структура и механические свойства металла. Химический состав стали существенно влияет на обработку ее давлением в горячем и холодном состояниях. Основными примесями, присутствующими в стали, являются сера, фосфор, кислород, водород, азот, хром, никель, ванадий, молибден, вольфрам, марганец и кремний.

Углерод, постоянно входящий в состав сталей, сильнее других элементов влияет на пластичность и другие механические свой-

ства металла. Кроме того, в стали всегда имеется кремний и марганец, которые специально вводят при ее раскислении для устранения вредного влияния монооксида железа. Весьма вредные примеси серы и фосфора, которые охрупчивают сталь, повышают ее твердость и придают ей красноломкость (сера) и хладноломкость (фосфор). Кислород находится в структуре стали в виде разных оксидов, способствует росту зерен и образованию трещин, вызывает перегрев стали, что приводит к ее разрушению при горячей механической обработке. Водород и азот также охрупчивают металл, повышают его твердость, вызывают образование трещин и затрудняют ковку.

Специально введенные легирующие элементы для придания стали разных необходимых свойств существенно влияют на ее обработку давлением в горячем состоянии. Так, хром повышает твердость, а никель — вязкость. Значительное содержание в стали хрома (более 12 %) и никеля (более 8 %) делают ее коррозионно-стойкой, окалиностойкой и кислотостойкой. Ванадий, молибден и вольфрам повышают вязкость, придают твердость и стойкость при высоких температурах. Марганец и кремний понижают пластичность и повышают сопротивление деформации обрабатываемой легированной (марганец) и углеродистой (кремний) сталей.

Указанное следует учитывать при обработке металлов давлением в режиме прокатки, когда слиток (заготовку) несколько раз пропускают между валками, вращающимися в противоположном направлении навстречу движущейся заготовке. При прокатке толщина заготовки уменьшается, а длина ее увеличивается. В гладких валках *1* (рис. 12.8, *а*) прокатывают листы. Фасонный профиль проката получают при прокатке в валках со специальными последовательно уменьшающимися вырезами — ручьях *2* (рис. 12.8, *б*). Число ручьев для получения готового изделия должно быть минимальным, а металл для ведения такой прокатки — горячим и пластичным. Получение разнопрофильного проката имеет свои особенности и выполняется по соответствующей технологии. Методом прокатки изготовляются листы, полосы, фасонный профиль (уголки, швеллеры, балки, рельсы, шпунт и др.), прутки, проволока, трубы и др. На рис. 12.9 показаны некоторые ***профили проката***. Например, квадратный, круглый и полосовой (рис. 12.9, *а*—*в*); угловой, двутавровый и швеллерный (рис. 12.9, *г*—*е*); железнодорожный и трамвайный рельсы, тавровый и шпунтовой (рис. 12.9, *ж*—*к*); полосы для башмаков тракторных гусениц, для ободьев колес грузовых автомобилей и турбинных лопаток (рис. 12.9, *л*—*н*).

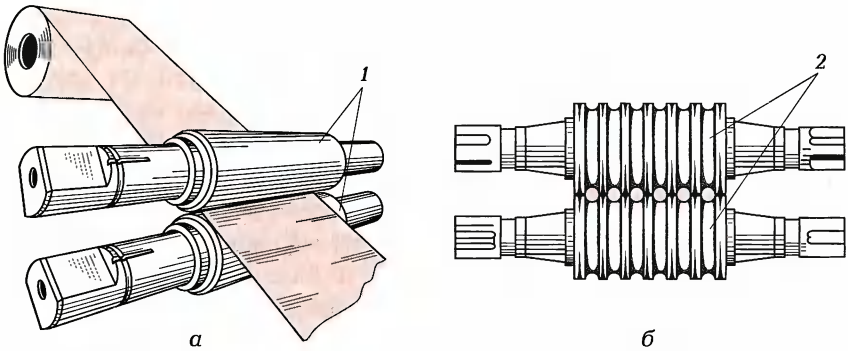


Рис. 12.8. Прокатка в валках:

а — гладких (получение листа); *б* — профильных (ручьях) (получение сортового металла); *1* — гладкие валки; *2* — ручьи

Прокаткой получают и другие изделия, используя соответствующие специфические технологии.

Например, ***прокатку бесшовных труб*** ведут за две операции — получение трубной заготовки и раскатка ее до готового

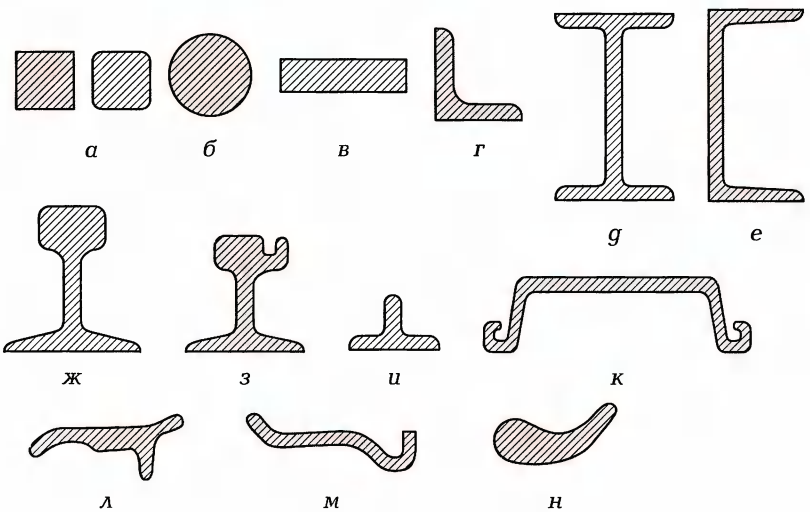


Рис. 12.9. Профили проката:

а, *б*, *в* — квадратный, круглый, полосовой; *г*, *д*, *е* — угловой, двутавровый, швеллерный; *ж*, *з*, *и*, *к* — железнодорожный и трамвайный рельсы, тавровый, шпунтовой; *л*, *м*, *н* — полосы для башмаков тракторных гусениц, для ободьев колес грузовых автомобилей и турбинных лопаток

изделия. Трубную заготовку получают на стане косой прокатки, валки которого расположены под некоторым углом один к другому. Каждый валок представляет собой два усеченных конуса, сложенных основаниями, и цилиндр в выходном отделочном конце. Валки вращаются не в противоположных, а в одном направлении. Особенность данной прокатки состоит в том, что цилиндрическая трубная заготовка, вращаясь в валках, движется линейно, проходя три участка: подготовительной *1* (рис. 12.10), поперечной *2* и отделочной *3* прокатки. Валки обжимают металл, т. е. деформируют заготовку, периодически превращая ее круглое сечение в овальное при каждом повороте на 90°. В процессе переменных растяжения и сжатия наружных слоев металла в нем накапливаются напряжения, под воздействием которых металл осевой зоны заготовки растягивается в противоположные стороны. В результате вдоль заготовки происходит разрыв металла с образованием осевого отверстия (полости), т. е. получается трубная заготовка.

Для выравнивания внутренней поверхности трубы в образовавшееся отверстие вводят оправку — дорн *4*, на котором и продолжают прокатку (операция раскатки). При этом толщина стенки трубной заготовки выравнивается, проходя в зазор между дорном и выходным отделочным калибром валков. Когда кончается рабочая часть калибра и открывается отверстие входа неполного калибра, специальный механизм подает дорн с заготовкой вперед, одновременно поворачивая ее на 90° для заглаживания неровностей прокатки в предшествующем положении, и процесс снова

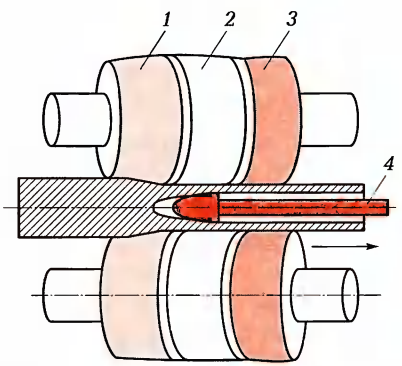


Рис. 12.10. Прокатка бесшовной трубы:

1, *2* — участки подготовительной и поперечной прокатки; *3* — участок отделочной прокатки; *4* — дорн; ⟶ — направление движения трубной заготовки

повторяется. Цилиндрическая заготовка трубы между коническими валками сверху удерживается дополнительно установленным верхним валком, трущимся о прокатываемый металл, а снизу — упором.

Как и при изготовлении трубной заготовки, раскатка выполняется на стане косой прокатки валками, имеющими три участка: прошивки, поперечной прокатки и отделки на дорне.

Горячая штамповка — это процесс заполнения формы — штампа нагретым металлом под воздействием кузнечной машины. В зависимости от сложности изготавливаемой детали и принятой технологии горячая штамповка может быть одно- или многоручьевой и соответственно использовать заготовительные и отделочные штампы. При ***одноручьевой штамповке*** требуется один штамп, на котором получают готовое изделие. Заготовкой в этом случае служит полуфабрикат, сделанный свободной ковкой или отрезанный механическим способом от слитка. При ***многоручьевой штамповке*** отдельно изготавливают полуфабрикат на заготовительном штампе, который затем доводят в штампе с несколькими ручьями до заданных размеров и формы. Такой способ штамповки используют во всех видах производства (серийном, крупносерийном и массовом).

Нагревание заготовки необходимо для повышения пластичности металла, уменьшения усилия штамповки и предотвращения расслоения некоторых материалов при их обработке давлением. Например, горячую штамповку углеродистой стали выполняют при температуре выше линии *GSK* (см. рис. 2.1 и 2.4), показанной на диаграмме состояния системы железо — углерод.

При горячей обработке металла давлением и нагреве его выше температуры рекристаллизации наклепа не образуется. Температура нагрева должна быть оптимальной, специально подобранной для каждого сплава; вреден как перегрев (сильно растет зерно, понижаются прочность и вязкость), так и недогрев (свойства почти не изменяются).

Оборудование для нагрева может зависеть от массы и размеров заготовок, вида металла, необходимой температуры, требуемой среды нагрева. В качестве топлива обычно используют уголь, мазут, газ и электроэнергию.

Ковка — способ обработки металлов давлением в нагретом состоянии, при котором инструмент многократно прерывисто ударяет по заготовке, в результате чего она, деформируясь постепенно, приобретает заданные форму и размеры. Ковка в штампах используется в массовом производстве, свободная ковка — в еди-

ничном и мелкосерийном. Ковкой изготавливают изделия в окончательном виде, не требующие доделки, или требующие незначительной доработки, а также заготовки. ***Основные операции ковки*** — это осадка, высадка, прошивка, обкатка, гибка, раскатка, протяжка.

Свободная ковка — это процесс последовательного деформирования нагретой заготовки плоскими бойками кузнечной машины с перемещением ее вручную или с помощью механизмов. В результате свободной ковки получают полуфабрикат — поковку с припусками для окончательной обработки, как правило, резанием. Этот способ нерационален и применяется в индивидуальном и мелкосерийном производстве, так как низкопроизводителен, требует доработки поковки, сопровождается значительными потерями металла при механической обработке и на угар (2...3 % массы металла при первом нагреве и 10...15 % при повторных нагревах).

Достоинствами свободной ковки является возможность последовательного выполнения разных операций — осадки, вытяжки, высадки, гибки, пробивки, прошивки и рубки.

Прессование (экструдирование) — способ обработки металлов давлением, заключающийся в выдавливании металла из замкнутой полости контейнера через канал матрицы, форма и размеры которого определяют сечение (профиль) получаемого изделия. Конфигурация поперечного сечения профиля может быть сплошной и пустотелой (полой). Наиболее широко в промышленности применяют прессование для получения алюминиевых профилей, их сортамент насчитывает несколько тысяч. Прессуют профили также из стали, магниевых, титановых, медных, никелевых и других сплавов. Выдавливают (прессуют) профили жестким инструментом (пуансоном) или жидкостью высокого давления в процессе гидроэкструзии. В качестве жидкого рабочего тела может быть вода, масло, расплавленное стекло, соли, легкоплавкие металлы под давлением 0,5...3,0 ГПа.

Гидроэкструзию выполняют на установках двух типов: с вынесенным источником давления жидкости и прямого действия, в которых давление жидкого рабочего тела в контейнере создается при перемещении уплотненного пресс-штемпеля. Экструдированием получают проволоку, прутки, профили из труднодеформируемых и тугоплавких металлов или заготовки металлорежущих инструментов — сверл, метчиков, разверток и др.

Основной вид штамповочного оборудования — паровоздушные молоты двойного действия с массой падающих частей 0,6...16 т и

более, а также фрикционные молоты с массой падающих частей 0,5...2 т. Кроме того, используются кривошипные ковочно-штамповочные, кривошипные и другие штамповочные прессы.

Волочение — способ обработки металлов давлением, как правило, в холодном состоянии, при котором протягивают длинномерные изделия круглого или фасонного профиля (проволоку, прутки, трубы) через калиброванное отверстие — волоку (фильеру), площадь выходного сечения отверстия которой меньше площади сечения заготовки.

В результате волочения поперечные размеры заготовок уменьшаются, а длина изделия увеличивается. Для такого способа обработки металлов применяют волочильные станы, в которых, например, проволока может одновременно и последовательно протягиваться через несколько фильер до получения заданного размера. Волочение может быть и однократным.

Волочением изготовляют (кроме проволоки) прутки из ряда материалов разных размеров и профилей с высокой точностью, трубы, а также сложные профили, которые не удается получить другими способами обработки.

Например, волочение прутков *1* (рис. 12.11, *а*—*в*) и труб *1′* осуществляют на цепных станах. При производстве прутков в волоку *2* (см. рис. 12.11, *а*), закрепленную на одном конце стана, вставляют заостренный конец прутка, который зажимается губками каретки, сцепляемой крюком с цепью привода. При движении цепей с усилием *P* каретка перемещается и протягивает пруток через отверстие в волоке.

По окончании протяжки каретку отцепляют и возвращают к волоке для захвата очередного прутка того же профиля. Проведя волочение всей партии прутков, меняют матрицу на меньший размер, и процесс волочения повторяют. При волочении используется обильное смазывание поверхности заготовки и матрицы. Следует отметить, что многократные протягивания металла через волоки сопровождаются сильным упрочнением поверхности заготовки за счет явления наклепа. Для повышения пластичности протягиваемого металла его подвергают межоперационному отжигу. Длина протягиваемых прутков обычно бывает до 6 м при диаметре (или толщине) 8...100 мм.

Трубы *1′* (см. рис. 12.11, *б*, *в*) протягивают для уменьшения диаметра или диаметра и толщины стенок. В первом случае (см. рис. 12.11, *б*) трубу протягивают как пруток. Во втором (см. рис. 12.11, *в*) при протяжке внутрь трубы вводят стальной стержень, на конце которого находится отполированная закаленная из хро-

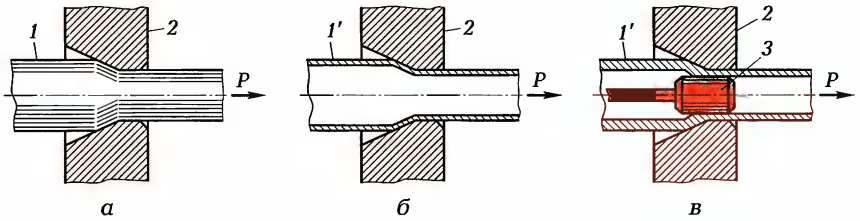


Рис. 12.11. Волочение на цепных станах:

а — прутка; *б* — трубы без утончения стенок; *в* — трубы с утончением стенок; *1*, *1′* — пруток и труба; *2* — волока; *3* — оправка; *P* — усилие волочения

мистой стали калибрующая оправка *3*, определяющая внутренний диаметр трубы при волочении, а следовательно, и толщину стенок. Другой конец стержня зажат специальным устройством, т. е. находится в напряженном состоянии, удерживая оправку в центре волочильного отверстия матрицы.

Холодная штамповка — один из наиболее используемых видов обработки давлением, при котором течение металла принудительно ограничивается рабочими поверхностями инструмента (штампа). Этот метод обработки обеспечивает высокую производительность, точность изготовления изделий и применяется в серийном и массовом производстве.

Основные операции изготовления разных изделий холодной штамповкой — это вырубка, обрубка, пробивка отверстий, вытяжка, объемная штамповка и др.

Вырубка — процесс полного отделения материала по замкнутому контуру от общей массы. Обрубка и пробивка — операции,

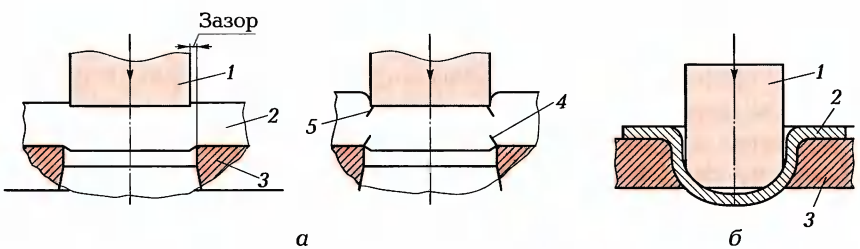


Рис. 12.12. Вырубка (*а*) и вытяжка (*б*) деталей:

1 — пуансон; *2* — материал; *3* — матрица; *4*, *5* — трещины в материале в области режущих кромок матрицы и пуансона; ⟶ — направление действия сил при штамповке

аналогичные вырубке. При вырубке пуансон *1* (рис. 12.12, *а*) внедряется в материал *2* на определенную глубину (первая стадия). Деформация материала с противоположной стороны (со стороны матрицы *3*) приводит к образованию его выпуклой формы. При дальнейшем внедрении пуансона в материал начинается образование трещин, в первую очередь от режущих кромок матрицы (трещины *4*), затем появляются трещины *5* от режущих кромок пуансона (вторая стадия). При дальнейшем рабочем движении пуансона в матрице трещины от матрицы и пуансона сходятся, и вырубленная деталь отделяется от основной массы материала (третья стадия).

В зависимости от механических характеристик материала при внедрении пуансона на 50...70 % его толщины уже происходит скалывание. Чистота вырубаемой поверхности зависит от зазора между пуансоном и матрицей. Чем меньше зазор, тем чище вырубаемая поверхность, но при этом повышаются усилие и работа вырубки. При больших зазорах поверхность среза получается нечистой. Иногда очень важно получить небольшую шероховатость поверхности среза. С учетом этого требования выбирают зазор между пуансоном и матрицей, обеспечивающий требуемые гладкий срез и минимальные заусенцы.

Определяющее значение при холодной штамповке имеет стойкость инструмента (пуансонов, матриц). Удлинению срока службы инструмента способствует рационально подобранная и правильно нанесенная на штампуемый материал смазка. Причинами низкой стойкости инструмента могут быть дефекты механической и термической обработки материала, неудачный его выбор, слишком резкие переходы сечений деталей штампа и т. д. Перегрузка, внецентренное нагружение могут привести к выходу инструмента из строя.

Ознакомимся с устройством штампа и его работой при вырубке заготовок деталей простейшей формы в виде дисков.

Детали изготовляют на механических прессах разных типов с помощью ***штампов***. При использовании трехрядного штампа для вырубки заготовок в виде диска «на провал» рабочим инструментом штампа являются пуансон *8* (рис. 12.13) и матрица *9*. Вырубленная деталь через отверстие в матрице проталкивается и падает в тару. Такой способ вырубки позволяет получить деталь выпукло-вогнутой формы и поэтому применяется для вырубки деталей, требования к плоскостности которых сравнительно низки.

При вырубке лента штампуемого материала пробивается пуансоном. Для снятия остатков ленты с пуансона в приведенном

штампе применен жесткий съемник *6*. Чтобы вырубленная деталь не осталась на пуансоне (такие случаи бывают, когда детали вырубают, используя обильное смазывание, например, при автоматической работе пресса), что может быть причиной поломки инструмента штампа, в пуансонах предусматриваются отлипатели *10*. Материал в виде полосы для вырубки заготовок подается по направляющему лотку *7*.

Элементами штампа являются блок, состоящий из нижней *1* и верхней *2* плит, направляющие колонки *5*, втулки *4* и хвостовик *3*. Верхняя плита при работе штампа перемещается вертикально, скользя по направляющим втулкам и колонкам. Втулки запрессованы в верхнюю плиту, а колонки — в нижнюю. Перемещение верхней плиты относительно нижней при работе штампа осуществляется от ползуна пресса с помощью хвостовика *3* штампа.

В трехрядном штампе применен плавающий хвостовик, который служит для крепления штампа к прессу и передачи усилия от пресса рабочему инструменту штампа. Плавающий хвостовик

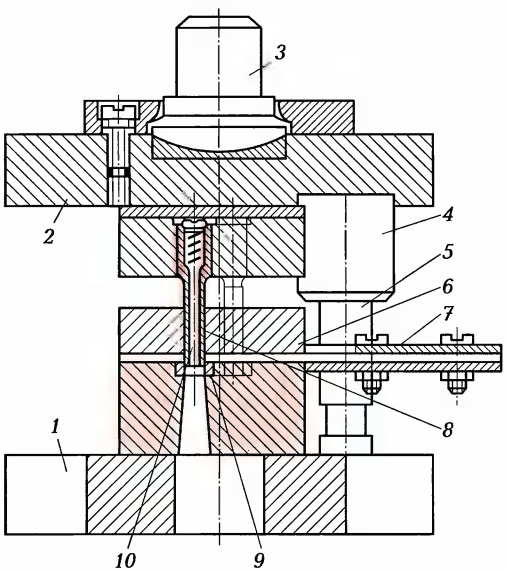


Рис. 12.13. Трехрядный штамп для вырубки заготовок в виде диска «на провал»:

1, *2* — нижняя и верхняя плиты; *3* — хвостовик; *4* — втулка; *5* — направляющая колонка; *6* — жесткий съемник; *7* — направляющий лоток; *8* — пуансон; *9* — матрица; *10* — отлипатель

имеет некоторую свободу движения относительно блока штампа, что компенсирует погрешности в изготовлении штампа и пресса, исключая перекос верхней плиты по отношению к нижней, так как нижняя плита прочно крепится к столу пресса. В других штампах применяют жесткие хвостовики, которые служат для крепления штампа к ползуну пресса, при этом усилие от пресса передается непосредственно верхней плите штампа.

Рабочий инструмент штампа крепят к верхней и нижней плитам винтами, штифтами и другими крепежными деталями, предварительно сцентрировав пуансоны относительно матриц. Блоки штампов обычно изготовляют с двумя или четырьмя направляющими колонками. Лучшим считается расположение колонок (когда их две) по диагонали плит, проходящей через центр давления вырубаемых контуров деталей. Блоки с четырьмя колонками применяют для последовательных штампов.

Более совершенный технологический процесс изготовления штамповых блоков, отличающийся бóльшим сроком службы штампов, заключается в том, что колонки и втулки на последней стадии изготовления обрабатывают попарно, притирая одну к другой алмазной пастой. Для улучшения смазки в колонках делают сверления с кольцевыми проточками, затем колонки и втулки закрепляют в штамповых плитах, заливая эпоксидным компаундом. В результате получают ***штамповые блоки со строго параллельными плитами***, из которых верхняя перемещается относительно нижней по строго перпендикулярно расположенным колонкам и втулкам без люфтов. Качество таких блоков проверяют следующим образом: поднятая (руками) верхняя плита штампового блока должна плавно опуститься на нижнюю. При этом рабочий инструмент на высококачественных штамповых блоках имеет бóльшую работоспособность, чем на блоках, в которых штамповые плиты раздвигаются с большим усилием с помощью рычагов.

Наряду с описанным штамповым блоком, предназначенным для постоянного закрепления рабочего инструмента, существуют ***универсальные штамповые блоки*** для быстрой смены рабочего инструмента, называемого пакет-штампами. Универсальные штамповые блоки могут быть с механическим или электромагнитным креплением пакет-штампов, с грейферной подачей заготовок, а также для поэлементной штамповки.

Вытяжка — операция изготовления из плоской заготовки полых деталей замкнутого контура, открытых с одной стороны. В производстве вытяжкой изготовляют детали из низкоуглеродистой стали, меди, никеля, ковара. Вытяжка может быть выполне-

на без утонения и с утонением по отношению к толщине заготовки. В зависимости от размера и формы деталь может быть изготовлена за одну или несколько вытяжных операций. Как правило, во время первой операции плоскую заготовку вытягивают в полое тело определенного размера, а при проведении последующих операций происходит уменьшение поперечного размера этого тела и увеличение его высоты.

При вытяжке плоская заготовка из материала *2* (см. рис. 12.12, *б*) втягивается пуансоном *1* в матрицу *3*, в результате чего фланец заготовки растягивается в радиальном и сжимается в перпендикулярном радиальному направлении. Сжимающие силы могут вызвать образование складок на фланце, поэтому заготовку прижимают к поверхности матрицы складкодержателем. Толщина материала заготовки при вытяжке сохраняется только в середине дна. В местах перехода от дна к стенкам материал утоняется, а со стороны открытого конца деталь несколько утолщается; естественно, что разрыв вытягиваемых деталей наиболее вероятен в ослабленном сечении.

Степень допустимой деформации при вытяжке для каждого материала характеризуется коэффициентом вытяжки *m*. ***Коэффициент вытяжки*** цилиндрической детали — это отношение диаметра изготовляемой детали к диаметру детали, являющейся заготовкой для данной операции. При первой операции коэффициент вытяжки m_1 будет равен отношению диаметра d_1 детали после первой вытяжной операции к диаметру $D_{заг}$ плоской заготовки, т. е.

$$m_1 = d_1 / D_{заг},$$

для n-й операции вытяжки

$$m_n = d_n / D_{n-1}.$$

Коэффициенты вытяжки для разных материалов и операций приведены в табл. 12.1. Чем меньше коэффициент вытяжки, тем большей деформации может подвергаться материал и, значит, тем лучше он вытягивается. Чем коэффициент вытяжки больше, тем меньше отличается деталь по своим размерам (диаметру) от заготовки. Для сокращения числа вытяжных операций следует выбирать наиболее выгодные коэффициенты вытяжки.

Вытяжку деталей можно выполнять пооперационно из заготовок или последовательно в ленте. При ***пооперационной вытяжке*** на каждом штампе выполняют один переход, а при последова-

Таблица 12.1. Коэффициенты вытяжки некоторых металлов

Материал	Коэффициент вытяжки m для операций	
	первой	второй и последующих
Никель	0,48...0,53	0,70...0,75
Медь	0,57...0,60	0,75...0,80
Сталь 10	0,58...0,60	0,79...0,87
Ковар	0,65...0,67	0,85...0,90

тельной в одном штампе последовательно размещены все вытяжные переходы. ***Последовательная вытяжка*** в ленте обеспечивает высокую производительность. Изготовление дорогих штампов для последовательной вытяжки требует высокой квалификации слесарей-инструментальщиков. Ремонт таких штампов значительно сложнее ремонта пооперационных.

Технологические процессы изготовления металлических деталей штамповкой определяются требованием к качеству изделий, наличием оборудования и оснастки.

12.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

К электрическим относятся электромеханический, электротермический, электрохимический, электрогидравлический и другие методы обработки материалов (в основном металлов).

Электромеханический способ заключается в одновременном электрическом и механическом (электроконтактная обработка) воздействии на обрабатываемый материал или механическом воздействии, возникающем при преобразовании электроэнергии некоторыми физическими методами (ультразвуковая обработка) и др.

Кроме указанного к этому виду обработки относится также анодно-механическая.

Электромеханический способ обработки основан на расплавлении металлической заготовки электрическим током за счет теплоты, образующейся в месте ее соприкосновения с быстровращающимся инструментом. Инструментом служит металлический диск *1* (рис. 12.14), который одновременно является катодом, а роль

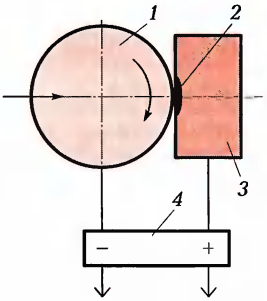


Рис. 12.14. Электромеханический способ обработки:

1 — диск; *2* — зона нагрева; *3* — заготовка; *4* — источник питания; ⟶ — направление движения диска

анода выполняет заготовка *3*. В результате прохождения электрического тока от источника питания *4* через контакт с большим переходным сопротивлением диск — заготовка образуется зона нагрева *2*. Инструмент при своем вращении удаляет расплавленные частицы металла заготовки. Чтобы сам диск при этом не расплавлялся, он должен вращаться с большой скоростью или специально охлаждаться. Источником теплоты при данной обработке являются импульсные дуговые разряды и контактный нагрев как постоянным, так и переменным током.

Этот способ применяют для разрезания металла, очистки от окалины, заточки инструмента, шлифования, фрезерования, точения, сверления и других целей. Так при разрезании металлических листов на воздухе скорость перемещения электродов составляет 40...50 м/с, их давление 30...50 кПа, интенсивность съема металла 1...2 $см^3$/мин, а износ инструмента (электрода) 10...15 % его массы. При точении рабочее напряжение 1...2 В, сила тока до 2 000 А, скорость перемещения электродов 1...5 м/с, а интенсивность съема металла 10...40 $см^3$/мин. Стойкость инструмента твердосплавного резца Т15К6 составляет 70...80 мин.

Ультразвуковая обработка — воздействие ультразвуком на обрабатываемое изделие. Ультразвуком называют упругие волны с частотой колебаний от 20 кГц до 1 ГГц, которые можно направленно фокусировать в пучки со значительной механической энергией. Использование ультразвука в промышленности значительно интенсифицирует многие процессы обработки различных материалов. Например, с помощью УЗ-воздействия можно получить композиционные сплавы из компонентов, взаимно не растворимых один в другом. Это так называемые литые псевдосплавы.

Ультразвук способствует изготовлению порошков из расплавов, волочению проволоки, труб, прессованию, ковке, штамповке, прокатке, старению и отжигу металлов. В ультразвуковых ваннах

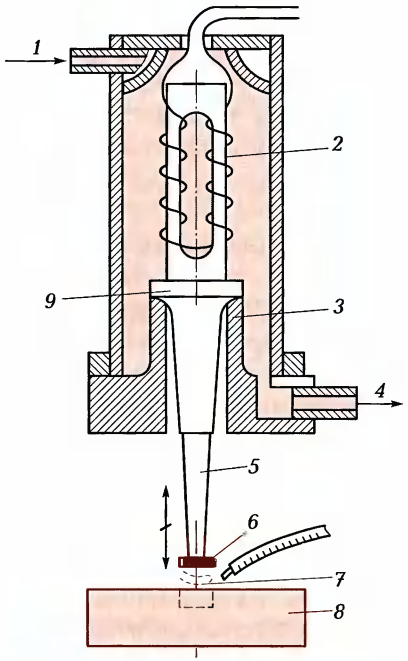


Рис. 12.15. Устройство для ультразвукового изготовления отверстий:
1, *4* — подвод и отвод воды; *2* — вибратор; *3* — система крепления; *5* — сменный переходник; *6* — сменный инструмент; *7* — суспензия; *8* — заготовка; *9* — магнитостриктор; ←→ — возвратно-поступательное движение

очищают и обезжиривают различные изделия электронной и оптической техники. Кроме того, с УЗ-воздействием интенсифицируют практически все процессы металлообработки. С помощью ультразвука можно паять, лудить и сваривать разные материалы. О магнитострикции и получении УЗ-колебаний см. подразд. 5.1.

Для знакомства с данным типом обработки материалов рассмотрим устройство для ультразвукового изготовления отверстий (рис. 12.15). Применение ультразвука наиболее целесообразно при обработке хрупких материалов. Электрические колебания УЗ-частоты от генератора подаются на магнитострикционный[1] вибратор *2*, с которого они, преобразовавшись в механические, через магнитостриктор *9*, сменный переходник *5* передаются сменному

[1] Магнитострикция — изменение размеров и формы тела при его намагничивании.

инструменту *6*. Соприкоснувшись с обрабатываемой заготовкой *8*, инструмент свои колебания передает абразивным частицам суспензии *7*, которые в виде многочисленных маленьких резцов перемещаются с заданной частотой и своими гранями разрушают заготовку (и частично инструмент) и постепенно вместе с инструментом опускаются в нее, углубляя отверстие. Магнитострикторподвешен на специальной системе *3* крепления. Для охлаждения магнитострикционного вибратора используется проточная вода через систему ее подвода *1* и отвода *4*.

Анодно-механическая обработка осуществляется при одновременном использовании анодного растворения металла изделия и механического удаления продуктов распада в электролите. Этот способ обработки применяют для резки, обдирки, профильного точения, шлифования, долбления.

Принцип анодно-механической обработки заключается в следующем. При прохождении постоянного тока через электролит *3* (рис. 12.16, *а*), погруженные в него заготовку (анод) *1*, а также через движущийся в электролите катод *4* происходит растворение

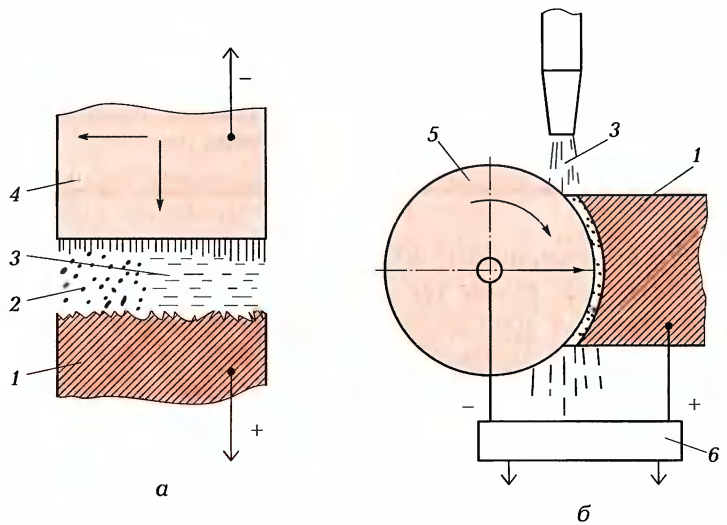


Рис. 12.16. Анодно-механическая обработка металлических заготовок:

а — принцип обработки; *б* — схема установки; *1* — заготовка (анод); *2* — пленка; *3* — электролит; *4* — катод; *5* — инструмент (диск-катод); *6* — источник постоянного тока; ⟶ — направление движения элементов установки

анода с образованием пленок *2*, которые механическим способом (движущимся металлическим катодом) снимаются и удаляются.

Заготовка (анод) *1* (рис. 12.16, *б*) разрезается специальным инструментом *5* в виде вращающегося и перемещаемого на заготовку диска, служащего катодом. Процесс резки происходит от источника постоянного тока *6* с непрерывной подачей электролита *3*.

Например, анодно-механическое разрезание стальных заготовок диаметром 10...50 мм обычно ведется на постоянном токе при напряжении на электродах 20...22 В и плотности тока 200...500 А/см^2, давлении инструмента на заготовку в пределах 0,05...0,2 МПа и скорости перемещения электродов 20...40 м/с. Средой при проведении данной резки являются водные растворы жидкого стекла.

Электротермический способ обработки осуществляется полным, частичным или поверхностным нагревом изделий электрическим током индукционным, контактным и другими методами. К этому способу относятся электроэрозионная обработка и нагрев металлов в электролите.

Электроэрозионная обработка металла основана на тепловом воздействии на него импульсами электрического тока между электродами, одним из которых является инструмент — анод, а вторым — обрабатываемая деталь — катод. В результате эрозии (разъедания) металл обрабатываемой детали разрушается. Электроэрозионную обработку подразделяют на электроискровую и электроимпульсную.

При ***электроискровой обработке*** на поверхность детали *3* (рис. 12.17), погруженной, например, в керосин *2*, подаются очень короткие искровые разряды от источника питания *4*, во время действия которых за счет выделения большого количества теплоты происходят плавление, частичное испарение и взрывоподобный выброс отделенных частиц металла детали. При этом разрушение металла детали происходит по форме, повторяющей форму инструмента *1*. Если инструмент, например, шестигранник, то и отверстие в детали будет иметь шестигранную форму. Если же в качестве инструмента использовать проволоку, перематываемую с катушки на катушку при работе, то с ее помощью можно перерезать деталь или вырезать заданный программой станка профиль даже если деталь выполнена из твердого сплава.

Электроискровую обработку используют при обработке отверстий и пазов рабочих деталей штампов, пресс-форм, изготовлении твердосплавных фильер и металлорежущего инструмента. Электроискровую обработку целесообразно применять в тех случаях,

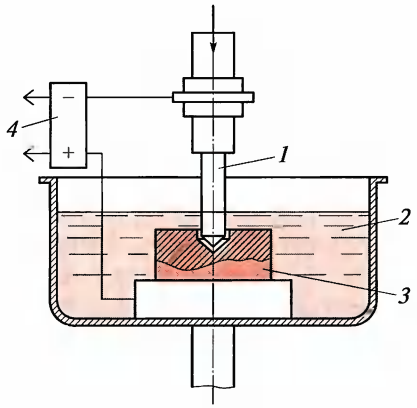


Рис. 12.17. Электроискровая обработка металлических деталей:
1 — инструмент; *2* — керосин; *3* — деталь; *4* — источник питания; ⟶ — направление действия рабочей силы

когда известными способами резания изготовить изделия невозможно или затруднительно.

Ориентировочный режим электроискрового прошивания полостей и отверстий в матрице штампов из инструментальной стали 5ХНТ следующий. Процесс выполняют постоянным током при напряжении на электродах 110...150 В, при рабочем токе 11...28 А и частоте импульсов 600...1 500 Гц латунным инструментом в минеральном масле. В результате такой обработки получают шероховатость отверстия *Ra* 3,2...1,6 мкм со степенью точности 8—9-го квалитетов. При этом интенсивность съема металла 80...300 мм^3/мин и относительный износ инструмента составляет 50...70 мас. %.

Электроимпульсная обработка основана на использовании униполярных (одного направления) импульсов электрической дуги. При этом формообразующий инструмент является анодом, а обрабатываемая заготовка — катодом (обратная полярность). От электроискровой этот способ отличается тем, что обработка проводится относительно длинными импульсами тока, получаемыми от машинного импульсного генератора. В результате такой модернизации повысилась производительность и снизился износ инструмента.

При способе ***нагрева в электролите*** для обработки металла можно использовать теплоту, выделяемую в электролите при пульсирующем разряде между катодом и электролитом и изотермической реакции, протекающей в образовавшейся газовой обо-

лочке у катода. За счет постоянного электрического тока, вырабатываемого источником питания *1* (рис. 12.18) и проходящего при соответствующих напряжении и плотности тока через электролит *3* между электродами ванны *2* (анодом) и деталью *4* (катодом), очень быстро происходит нагрев детали до высокой температуры. Одновременно с этим в образовавшейся газовой оболочке *5* у катода развивается экзотермическая реакция, усиливающая нагрев. Нагрев в электролите используют для отжига и закалки деталей, под горячую высадку, пайку.

Электрохимическая обработка — метод одновременного воздействия на обрабатываемую деталь электрического тока и химической реакции. При этом происходит анодное растворение металла детали и переход с поверхности анода — электрода, соединенного с положительным полюсом источника питания, в раствор (электролит). Такую обработку используют для электрополирования, шлифования, удаления заусенцев, очистки, заточки режущего инструмента, прошивания отверстий, полостей, получения фольги и других целей. Например, электрополирование высокоуглеродистой и низколегированной стали выполняют в горячем (при 70...80 °С) электролите, состоящем из ортофосфорной кислоты, хромового ангидрида и воды, при напряжении на электродах 12...14 В, плотности тока на поверхности детали 40...60 А/дм^2. Скорость съема при этом составляет 7...10 мкм/мин, точность обработки возрастает, а шероховатость снижается относительно исходной и находится в интервале *Ra* 0,8...0,1 мкм.

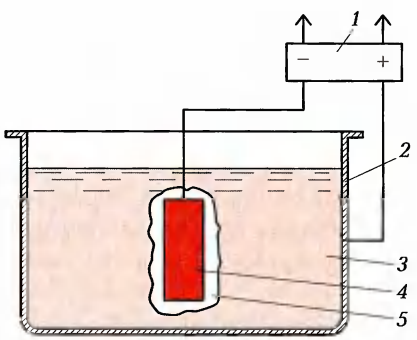


Рис. 12.18. Нагрев материала в электролите:
1 — источник питания; *2* — ванна; *3* — электролит; *4* — деталь; *5* — газовая оболочка

Электрогидравлический способ основан на управляемом разрушении или деформации твердых материалов повторяющимися и управляемыми импульсами высоких давлений жидкости, возникающими в ней при импульсном высоковольтном электрическом разряде. Причем мощность и длительность импульсов давления можно регулировать, изменяя параметры источника питания.

Такую обработку применяют для штампования, прессования, вытягивания металлических материалов, а также для создания поверхностного упрочнения (наклепа) металлов, их прошивки (сверления, долбления) и других целей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается принцип резания?
2. Какие металлорежущие инструменты вы знаете?
3. Зачем нужны центровочные сверла?
4. Из какого материала изготовляют режущий инструмент?
5. Каково назначение протяжек?
6. Для каких целей применяют развертки?
7. Какие виды обработки относят к электрическим?
8. Что такое электроэрозионная обработка?
9. Каков принцип ультразвуковой обработки?
10. В чем заключается анодно-механическая обработка?

Глава 13

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

13.1. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛОВ

Поступающие на склад предприятия материалы, предназначенные для изготовления изделий ответственного назначения, и некоторые вспомогательные материалы подлежат входному контролю для установления их соответствия техническим условиям (ТУ) или государственным стандартам (ГОСТ).

Сначала проверяют соответствие сопроводительной документации (сертификата) маркировке и биркам, прикрепляемым к материалам, а затем соответствие материалов техническим условиям и стандартам: по методикам, указанным в правилах приемки, контролируют геометрические размеры материалов, качество их поверхности, химический состав, механические свойства и др. В случае соответствия службой входного контроля выписывается ***сертификат***, на основании которого он может быть передан в работу. В сертификате указывают фактические (измеренные) характеристики материала. При несоответствии данных проверки техническим условиям или стандартам материал может быть забракован в установленном порядке.

Рассмотрим важнейшие характеристики основных материалов, которые, как правило, проверяет служба входного контроля.

Геометрические размеры материалов — толщину, диаметр, ширину, длину — контролируют универсальными измерительными инструментами — штангенциркулем, микрометром, индикатором и др.

Качество поверхности определяют методом сравнения образца контролируемого материала с эталонным образцом, качество поверхности которого выполнено на границе допустимого состояния шероховатости, и по карте контроля, в которой указаны допустимые виды поверхностных дефектов (забоин, царапин,

цветов побежалости и др.). Состояние поверхности материала контролируют, как правило, внешним осмотром. В особо важных случаях можно применять специальные приборы для определения высоты микронеровностей на проверяемой поверхности контролируемого образца материала. Такие приборы называются профилометрами или профилографами.

Для конструкционных материалов, используемых в машиностроении, особенно важно качество состояния поверхности. Так, на поверхности не допускаются поперечные трещины, неметаллические включения, усадочные раковины, рыхлость, пористость, окалина, обезуглероживание на глубину, превышающую припуск на механическую обработку.

Содержание компонентов и примесей в материале, а также их распределение определяют химическим, спектральным и металлографическим анализами.

Другие характеристики материалов, являющиеся определяющими для данного производства, устанавливает технологическая служба, которая вносит их в перечень материалов, подлежащих входному контролю, или проводит соответствующие технологические испытания (пробы).

13.2. РАЗДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА ЗАГОТОВКИ

Заготовка — это предназначенный для дальнейшей обработки полуфабрикат, из которого получают готовое изделие. Она должна иметь минимальный припуск, заданные геометрическую форму и шероховатость. Главное, чтобы при минимальных затратах из нее можно было изготовить изделие высокого качества, для чего должен быть разработан наиболее рациональный технологический процесс его производства.

Необходимое для переработки сырье можно приобретать в двух вариантах — в виде заготовок, непосредственно пригодных для переработки в изделия, или в виде материала заданных размеров, заготовки из которого будут сделаны на предприятии-заказчике.

Первым вариантом удобно воспользоваться, например, при переработке металла давлением (холодной или горячей штамповкой). В этом случае заказывают ленты или полосы мерной ширины и длины из стали соответствующей марки в термически обработанном или необработанном состоянии.

При ***втором варианте*** заказанный материал предварительно поступает на склад, в котором его размещают по сортаменту (лента, полоса, пруток, квадрат, проволока, лист и др.), разложив по стеллажам соответствующей конструкции (стоечные, клеточные, елочные и др.). При размещении материалов принимают во внимание способ их изготовления и состояние — холодно- и горячекатаный, отожженный, нагартованный и др. На каждом стеллаже (если он заполнен однородным материалом) или на отдельных штангах (металлические стержни, пруток и т. д.) на конце каждой ставится клеймо, обозначающее марку материала, номер плавки, номер контролера ОТК завода-поставщика и др. Кроме того, заводы-поставщики применяют окраску торцов штанг в условные цвета.

При заказе материала для предварительного хранения на складе с целью создания нужного запаса и бесперебойной работы также руководствуются экономической целесообразностью. Это могут быть материалы безразмерные (складские размеры), кратной, мерной длины, мерной длины с остатками и т. д.

Желательно, чтобы отходы при раскрое были минимальны или отсутствовали.

Для массового и крупносерийного производства очень выгодно на заводах-поставщиках металлов размещать заказ на поставку заготовок нестандартного профиля — полуфабрикатов.

Известно много **способов резки (рубки) материалов на заготовки**. Рассмотрим наиболее применяемые, к которым относятся резка круглыми и сегментными пилами, отрезными дисками, разного рода ножницами, ленточными и ножовочными пилами и другими способами, например, автогенной, электродуговой, электроэрозионной, анодно-механической резкой.

Пилы круглые — иначе ***фрезы*** — подразделяют на прорезные (шлицевые) и отрезные. Фрезы ***прорезные*** изготовляют диаметром 40...75 мм, толщиной 0,2...5,0 мм с мелким и укрупненным зубом из быстрорежущей стали твердостью 61...64 HRC, быть с центрирующим утолщением и без него. Эти фрезы используют для разрезания металла и неметалла, а также для прорезания неглубоких шлицов в головках винтов и глубоких и узких пазов.

Отрезные фрезы *2* (рис. 13.1, *а*) служат для распиливания материала *1* разных профилей и сечений, а также прорезания глубоких и узких пазов, когда они установлены на фрезерных станках.

Диаметр отрезных фрез 60...200 мм, толщина 1...5 мм с центрирующим утолщением и без него. У фрез шириной (толщиной) свыше 2 мм зубья делают с угловыми фасками с одной стороны

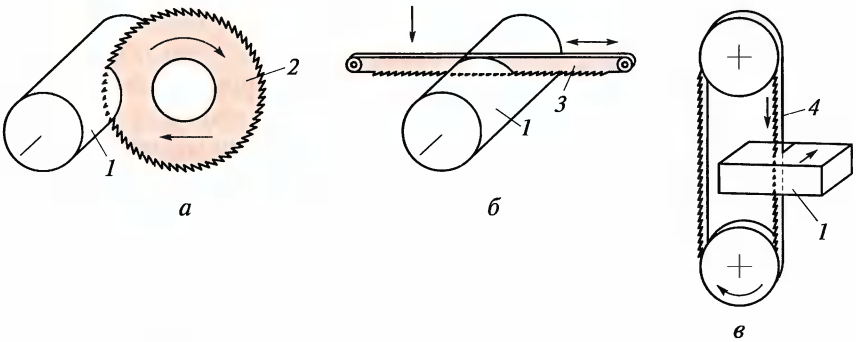


Рис. 13.1. Способы резки пилами:

а — отрезной фрезой; *б* — ножовочной пилой; *в* — ленточной вертикальной пилой; *1* — материал; *2* — фреза; *3* — ножовочное полотно; *4* — ленточная пила; ⟶ — направление движения режущего инструмента

зуба в шахматном порядке через зуб. Такая заточка снижает трение срезаемой стружки о стенки прорезаемого паза и лучше направляет пилу по нему. Изготовляют отрезные фрезы из тех же сталей, что и прорезные.

Станочные пилы бывают ножовочные (рис. 13.1, *б*) и ленточные, в том числе вертикальные (рис. 13.1, *в*) и горизонтальные.

Сегментные круглые пилы применяют для разрезания различных материалов как по свойствам, так и по размерам и профилю. Диаметр этих пил 300...2 000 мм, толщина 5...15 мм. Достоинством их является возможность после износа до предельного размера замены сегментов с зубьями, крепящихся заклепками на пильном диске. Число зубьев на каждом сегменте определяется их размерами (крупные, средние и мелкие), а число сегментов зависит от диаметра пилы. Профиль зубьев определяется свойствами разрезаемых материалов и режимом резания.

Дисковые (роликовые) ножницы бывают двух видов: с параллельными вертикально или горизонтально расположенными и наклонными осями. Ножницы ***с параллельными осями*** предназначены для разрезания листового материала *3* (рис. 13.2, *а*) на полосы и вырезки круглых заготовок с выходом инструмента на край листа. Толщина материала может быть до 30 мм. Все параметры дисковых ножниц в основном зависят от толщины разрезаемого металла. Так, при толщине листа 5 мм диаметр дисков *1*, *2* ножниц должен быть 125...130 мм, их толщина 25...30 мм, а зазор между ножами 0,5...0,6 мм. Также листы можно резать на-

бором дисковых ножниц, получая одновременно несколько мерных полос в соответствии с числом пар роликов.

Дисковыми ножницами ***с наклонными осями*** вырезают круглые (дисковые), кольцевые и криволинейные заготовки из листов толщиной до 20 мм.

Параметры таких ножниц несколько отличаются от параметров ножниц с параллельными осями. Так, при толщине материала 5 мм диаметр ножниц должен быть 100 мм, их толщина — 20 мм, а зазор между ними — 1,0...1,5 мм.

Кроме того, круглые заготовки можно резать ***ножевыми штампами*** (рис. 13.2, *б*) с помощью верхнего и нижнего ножей.

Отрезные и шлифовальные металлоасбестовые круги используют для разрезания и зачистки разных материалов. Централизованно изготовленные, обозначенные соответствующим цветом и надписями круги предназначаются для обработки разных сталей, в том числе и закаленных, жести (сталь толщиной до 2 мм), цветных металлов и их сплавов, высококачественных сталей, литья и камня. Такими кругами режут металл в стационарных условиях на специальных станках, как правило, без охлаждения. Кроме того, на производстве применяют ручной электроинструмент — шлифовальные угловые машины, в которых металлоасбестовые круги имеют посадочный размер (диаметр) 22 мм, наружный диаметр 114 мм и более и толщину 2...6 мм. Они высокооборотны, частота их вращения более 10 000 мин$^{-1}$.

Абразивные круги применяют для разрезания сталей разных марок как в закаленном, так и в незакаленном (сыром) состоянии с охлаждением и без. Обычно используют абразивные круги ди-

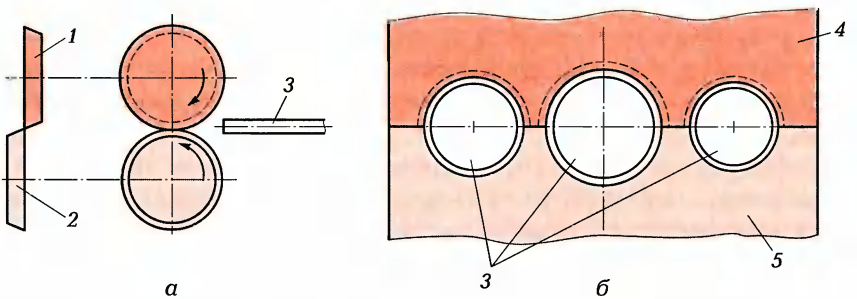


Рис. 13.2. Резка дисковыми ножницами (*а*) и в ножевом штампе (*б*):
1, *2* — диски; *3* — материал; *4*, *5* — верхний и нижний ножи; ⟶ — направление вращения дисков

аметром 80...400 мм и толщиной 0,5...5,0 мм на вулканитовой или бакелитовой связке.

Режущим инструментом служит, как правило, круг из электрокорунда (условное обозначение 25А) зернистостью 36...46 с твердостью СТ2—СТ1 и скоростью резания 45 м/с. При резке абразивный круг совершает три движения: вращательное, подачи (сверху вниз на деталь) и колебательное (вперед-назад поперек заготовки).

Пилами трения (беззубыми пилами) режут металл разных размеров и профилей (уголок, пруток, двутавр, квадрат и др.), а также листы и трубы. Принцип работы пил трения основан на расплавлении и удалении жидкого металла из зоны реза. Разогревается металл до жидкого состояния за счет теплоты, выделяющейся при трении быстровращающейся пилы о разрезаемую заготовку. Пила трения представляет собой диск диаметром 1 м и более определенной толщины в зависимости от размеров разрезаемых материалов. Диски делают из низкоуглеродистой стали, содержащей 0,8...1,2 % марганца. Пилы могут быть с гладкими поверхностями резания (образующими) или иметь зубья в виде накатки или насечки. Собственно процесс резки может осуществляться с охлаждением диска при скорости резания 70...100 м/с или без охлаждения при скорости резания 40...50 м/с. Поскольку скорость довольно высока, диски необходимо предварительно балансировать. При разрезании прутков и особенно труб их следует вращать. Кроме механизированных устройств промышленностью выпускаются устройства с ручным приводом для резки труб небольшого диаметра.

Ленточные пилы *4* (см. рис. 13.1, *в*) используют для резки металлов и неметаллов разного сортамента и профиля под прямым и меньшими (15; 30; 45°), как правило, фиксированными углами к оси разрезаемого материала *1*.

Станки, на которых применяют ленточные пилы *4*, могут иметь как вертикальное, так и горизонтальное расположение пилы. Ширина пил обычно 6...25 мм, толщина 0,6...1,4 мм. Узкими пилами можно вырезать заготовки по криволинейным траекториям и чем меньше радиус, тем у́же должно быть полотно пилы. Такие работы можно выполнять только на станках с вертикально расположенными пилами. Материал пил, профиль их зубьев, толщину, скорость движения, подачу и режим охлаждения выбирают в зависимости от конкретных условий — свойств разрезаемого материала, его сортамента, профиля и др. Указанными пилами можно разрезать материал диаметром до 500 мм.

Основой ленточных пил служит биметаллическая ленточная пружинная сталь, на зубья которой наплавлена быстрорежущая сталь, содержащая углерод, вольфрам, молибден, ванадий, кобальт и имеющая твердость 68...69 HRC. Такие пилы хорошо режут, износостойки и долговечны. Их используют для разрезания разных профилей и сплошных материалов. Есть пилы для разделения цветных металлов, титана и титановых сплавов, инструментальных, конструкционных, кислотоустойчивых, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и других материалов. Особенность таких пил состоит в том, что они имеют определеные шаг и профиль зубьев, причем для улучшения условий резания у некоторых пил шаг переменный и периодически повторяющийся. Существует определенная зависимость между шириной и толщиной ленты, профилем и шагом зубьев, свойствами разрезаемых материалов и их размерами.

В настоящее время создана серия схожих по конструкции ленточно-пильных станков для резки материалов ленточной пилой. В качестве примера ознакомимся с таким станком (рис. 13.3), у которого четыре скорости резания (23; 33; 45 и 65 м/мин) бесконечной пилой — полотном размерами $2\,300 \times 20 \times 0{,}6$ мм; максимальный размер разрезаемого материала прямоугольного сечения — 180×300 мм; максимальный диаметр разрезаемого материала круглого сечения 180 мм.

Станок смонтирован на чугунной станине *15* коробчатой формы, служащей резервуаром для смазочно-охлаждающей жидкости. Для перемещения станка предусмотрены колеса *16*. Сверху на станине расположены тиски с неподвижной в продольном направлении *3* и подвижной *1* губками, которые при зажиме заготовки передвигаются с помощью винта при вращении маховика *2*. Пильная рама *5* поднимается вручную, описывая небольшую дугу относительно оси на правом конце станка, и поддерживается гидроцилиндром *13* при соответствующем положении специальной рукоятки *14* управления гидроцилиндра.

Рама с ленточной пилой по отношению к основанию губок тисков расположена под углом 45°. Участок ленточной пилы *8* с двух сторон закреплен в специальном устройстве — держателе *4*, которым поворачивают ленточную пилу перпендикулярно оси заготовки, используя упругую деформацию полотна пилы.

Над открытым участком пилы распложен шланг *9* с наконечником для подачи смазочно-охлаждающей жидкости, которая накачивается помпой, находящейся в резервуаре станка. Для разрезания под углом губки тисков имеют кольцевые пазы, позволяющие

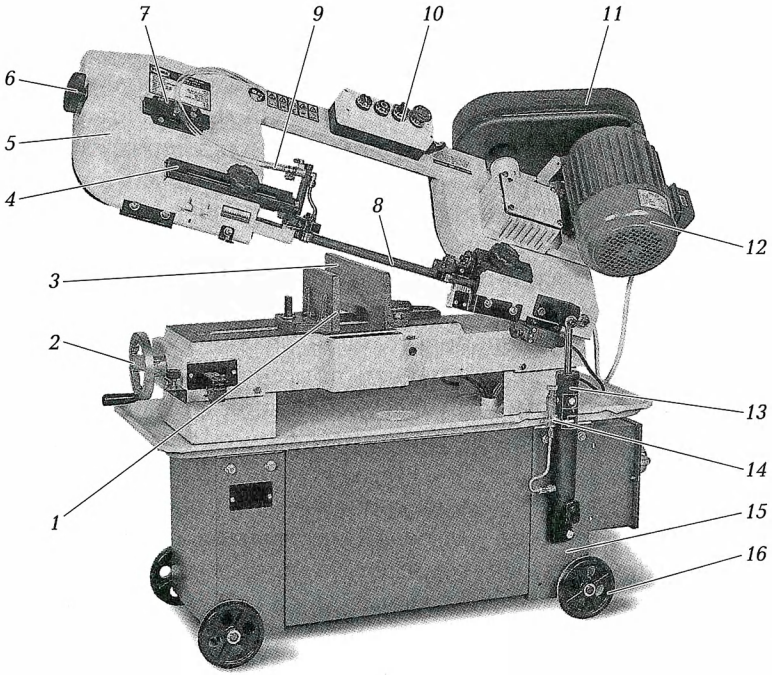


Рис. 13.3. Ленточно-пильный станок:

1, *3* — соответственно подвижные и неподвижные губки тисков; *2* — маховик; *4* — держатели ленточной пилы; *5* — пильная рама; *6* — головка натяжного устройства; *7* — натяжное устройство; *8* — ленточная пила; *9* — шланг; *10* — кнопка включения; *11* — клиноременная передача; *12* — электродвигатель; *13* — гидроцилиндр; *14* — рукоятка управления гидроцилиндром; *15* — станина; *16* — колесо

фиксировано устанавливать требуемый угол путем поворота губок. При завершении разрезания, когда пильная рама с ленточной пилой *8* опускается ниже плоскости тисков, станок автоматически выключается, так как регулируемый упор нажимает на конечный выключатель. Скорость опускания пильной рамы *5* при резке регулируется специальным устройством, изменяющим сечение отверстия перетекания масла в гидроцилиндре *13*.

Скорость движения ленточной пилы задается перестановкой клинового ремня на шкивах в редукторе клиноременной передачи *11*. Для разрезания длинномерных материалов к ленточно-пильному станку может прилагаться роликовый конвейер.

Ленточная пила приводится в действие электродвигателем через клиноременную передачу с четырехступенчатыми шкивами,

далее движение передается червячному редуктору, ведущему шкиву, полотну и ведомому шкиву, который имеет натяжное устройство. Скорость резания изменяют перестановкой ремней в клиноременной передаче, а скорость опускания рамы регулируют изменением проходного сечения жиклера в гидроцилиндре.

Ножовочные пилы бывают станочными (см. рис. 13.1, *б*, поз. *3*) и для ручных ножовок. Станочные полотна используют в ножовочных станках (механических ножовках) для разрезания прутков, труб или других профилей и особенно если требуются заготовки большой длины. Материалом ножовочных полотен служит инструментальная сталь Р9, Р18, Х6ВФ или У10, термообработанная до твердости 62...64 HRC. Толщина и длина станочных полотен определяется характеристиками разрезаемого материала и его размерами и находится в пределах 1,25...2,5 мм и 350...600 мм соответственно. Зубья, как правило, треугольные по форме. Для уменьшения бокового трения зубья ножовочных полотен имеют развод.

Полотна ручных ножовок предназначены для разрезания деталей (заготовок) небольшого размера при выполнении слесарных операций. Эти полотна сделаны из тех же сталей, что и станочные. Их толщина 0,8...1,6 мм, длина 250...300 мм. Зубья ножовочных полотен направленного действия — режут «от себя» («на себя» — холостой ход). Механическая ножовка имеет рабочий ход в одну сторону, затем следует холостой ход с подъемом полотна в обратную сторону, далее полотно опускается на заданный шаг и цикл резки повторятся. Режут металл с обильным охлаждением.

Приводные ножницы обычно используют для разрезания (рубки) листового материала. Существует несколько конструкций ножниц для разрезания листов разных длины и толщины: параллельные (рис. 13.4, *а*) и гильотинные (наклонные) (рис. 13.4, *б*). Верхний *2* (подвижной) нож имеет угол резания (угол заточки) 75...85°, задний угол заточки 2...3° (но допускается 0°). Гильотинные ножницы кроме того имеют угол створа (угол между верхним *2* и нижним *5* ножами), изменяющийся в зависимости от толщины разрезаемого листа. Так, при толщине материала до 4 мм угол створа 2,0...2,5°, при толщине 4...15 мм — 2,5...4,0°, а для листа толщиной свыше 15 мм — 4...6°. Качество реза зависит от зазора между ножами: он должен быть минимальным и подобран для каждого материала (стали, меди, алюминия и др.) в зависимости от толщины листов. Для листов толщиной до 1 мм независимо от вида материала зазор должен быть 0,05 мм, для толщины материала 1,5...5,0 мм — 0,08 мм, для меди и алюминия — 0,05 мм. Сле-

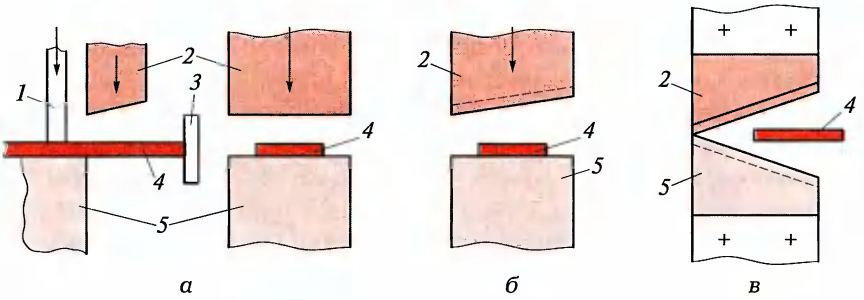


Рис. 13.4. Ножницы:

а — параллельные; *б* — гильотинные; *в* — вибрационные; *1* — прижим; *2* — верхний нож; *3* — упор; *4* — материал; *5* — нижний нож; ⟶ — направление движения верхнего ножа

дует помнить, что большой зазор между ножами приводит к получению нечистого среза металла, а при малом зазоре срез также может получиться нечистым и привести к порче ножей, так как в этом случае будет отсутствовать фаза скалывания в разрушаемом металле. При рубке прижим *1* удерживает материал, досылаемый до упора *3*.

Вибрационными ножницами обычно режут листовой металл. Их нож *2* (рис. 13.4, *в*) делает 1 200...2 500 ходов в минуту, величина хода ножа 2...3 мм, передний угол ножей 6...7° и угол створа 24...30°. Зазор между верхним *2* и нижним *5* ножами зависит от толщины разрезаемого материала *4*.

Рубка металла ***с помощью штампов*** обычно проводится на приводных прессах. Конструкция штампов для этих целей может быть разной, но широко применяются матричные и ножевые штампы. Матричные (глазковые, втулочные) штампы предназначены для рубки калиброванного профиля — круглого, квадратного, прямоугольного и др. Когда подвижный верхний нож *4* (см. рис. 13.2, *б*) ножевого штампа находится в верхнем положении, материал *3*, подлежащий рубке, пропускают через отверстия матрицы (неподвижного нижнего ножа *5*) до упора. При опускании верхнего ножа *4* часть материала отделяется, после чего верхний нож возвращают в верхнее (исходное) положение, и процесс рубки можно повторить.

Ножевые штампы имеют в каждом ноже *1* (рис. 13.5) и *3* полуотверстия, аналогичные разрубаемому профилю. При опускании верхнего подвижного ножа *1* часть материала *2* отделяется. Для предотвращения образования трещин и получения ровного

среза рубку выполняют с использованием прижима *5* (на буфере *4*). Верхний подвижный нож *1* и упор имеют передний угол, равный 1°.

Чтобы получить чистый срез, необходимо иметь оптимальный зазор между ножами *1* и *3*, зависящий от свойств разрубаемого материала и его размера. Обычно зазор принимают равным в пределах 1,5...5,5 % диаметра (толщины) материала. Ножи штампов изготовляют из инструментальных сталей (5ХНМ, Х12ФН, У8А), твердость которых после термической обработки должна быть 59...64 HRC.

Приводные пресс-ножницы предназначены для рубки профильного материала — уголков, швеллеров, двутавров и др. Они имеют профильные отверстия в ножах, один из которых подвижен, и при его движении материал разрубается. Поскольку зазоры между профильными отверстиями ножей и разрубаемым материалом могут быть значительными (несколько миллиметров), срез металла получается неровный. Этот вид оборудования удобно использовать в штучном производстве, когда потребность в заготовках эпизодическая, а требования к их точности и качеству низкие.

Разрезать материал на заготовки можно также ***отрезным резцом на токарном станке*** (см. гл. 12).

Ко всем видам резки материалов предъявляют определенные **требования** (точность заготовок, качество реза, отклонения формы и др.); например, допуск на длину заготовки, отрезаемой в штампе, диаметром (или стороной квадрата) до 10 мм и длиной до

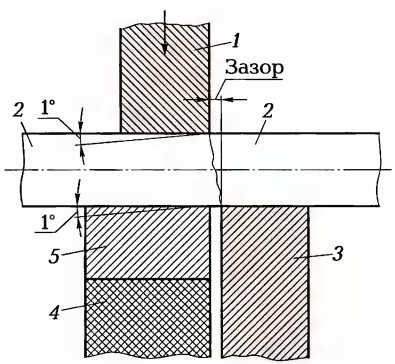


Рис. 13.5. Рубка в ножевом штампе с прижимом на буфере:

1, *3* — подвижный и неподвижный ножи; *2* — материал; *4* — буфер; *5* — прижим; ⟶ — направление движения подвижного ножа

300 мм составляет ±0,6 мм, а для заготовки диаметром 30...40 мм и максимальной длиной 600...1 000 мм — ±1 мм. В зависимости от масштабов производства, освоенного технологического процесса и других факторов работа заготовительного участка может быть механизирована и автоматизирована, на его территории может быть налажена переработка отходов материала для вторичного использования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение входного контроля материалов?
2. Что контролируют при получении материалов на склад предприятия?
3. Каковы основные способы разделения материалов на заготовки?
4. Укажите безотходные способы разделения материалов на заготовки.
5. Как устроен станок резки материала ленточной пилой?
6. От чего зависит зазор между подвижным и неподвижным ножами для получения чистого среза?

Список литературы

1. *Абрамов О. В.* Ультразвуковая обработка материалов / О. В. Абрамов, И. Г. Хорбенко, Ш. Швегла ; под ред. О. В. Абрамова. — М. : Машиностроение, 1984. — 280 с.
2. *Адаскин А. М.* Материаловедение (металлообработка) : учеб. пособие для нач. проф. образования / А. М. Адаскин, В. М. Зуев. — 6-е изд. стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2009. — 288 с.
3. *Балкевич В. Л.* Техническая керамика : учеб. пособие / В. Л. Балкевич. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1984. — 256 с.
4. *Беляков В. А.* Жидкие кристаллы / В. А. Беляков. — М. : Знание, 1985. — 160 с. — (Народный ун-т. Естественно-научный ф-т).
5. *Блюмберт В. А.* Справочник фрезеровщика / В. А. Блюмберт, Е. И. Зазерский. — Л. : Машиностроение, 1984. — 288 с.
6. *Васильев Л. А.* Алмазы, их свойства и применение / Л. А. Васильев, З. П. Белых. — М. : Недра, 1983. — 101 с.
7. *Волькенштейн Ф. Ф.* Электроны и кристаллы / Ф. Ф. Волькенштейн. — М. : Наука, 1983. — 128 с.
8. *Григорьев М. А.* Материаловедение для столяров и плотников : учебник для сред. проф.-техн. училищ / М. А. Григорьев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1981. — 176 с. — (Профтехобразование. Деревообрабатывающая промышленность).
9. *Калинчев Э. П.* Свойства и переработка термопластов : справ. пособие / Э. П. Калинчев, М. Б. Саковцева. — Л. : Химия, 1983. — 288 с.
10. *Капустинская К. А.* Металл из «камня надежды» / К. А. Капустинская, А. А. Макареня. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоиздат, 1982. — 96 с.
11. *Клочков В. И.* Прессовщик-вулканизаторщик широкого профиля : учеб. пособие для ПТУ / В. И. Клочков, В. Н. Красовский. — Л. : Химия, 1990. — 240 с.
12. *Корчаго И. Г.* Применение древесно-плитных материалов в строительстве / И. Г. Корчаго. — М. : Стройиздат, 1984. — 96 с.
13. *Кузьмин Б. А.* Технология металлов и конструкционные материалы / Б. А. Кузьмин. — М. : Высш. шк., 1989. — 489 с.

14. *Лахтин Ю. М.* Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — М. : Машиностроение, 1990. — 528 с.
15. *Лахтин Ю. М.* Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. — 4-е изд. — М. : Металлургия, 1994. — 360 с.
16. *Мишкевич Г. И.* Рабочая грань алмаза / Г. И. Мишкевич. — Л. : Лениздат, 1982. — 175 с.
17. *Моряков О. С.* Производство корпусов полупроводниковых приборов : учебник для техн. училищ / О. С. Моряков. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1985. — 159 с.
18. Новый политехнический словарь / гл. ред. А. Ю. Ишлинский. — М. : Большая Российская энциклопедия, 2003. — 671 с.
19. Основы материаловедения (металлообработка) : учеб. пособие для нач. проф. образования / [В. Н. Заплатин, Ю. И. Сапожников, А. В. Дубов и др.] ; под ред. В. Н. Заплатина. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2009. — 256 с.
20. *Соболев Е. В.* Тверже алмаза : очерки / Е. В. Соболев. — Новосибирск : Наука, 1984. — 127 с.
21. *Солнцев Ю. П.* Материаловедение : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю. П. Солнцев, С. А. Вологжанина. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2009. — 496 с.
22. Справочник по клеям и клеящим мастикам в строительстве / [О. Л. Фиговский, В. В. Козлов, А. Б. Шолохова и др.] ; под ред. В. Г. Микульского, О. Л. Фиговского. — М. : Стройиздат, 1984. — 240 с.
23. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники : в 10 кн. — Кн. 9 : Сборка : учеб. пособие для ПТУ / [О. С. Моряков]. — М. : Высш. шк., 1990. — 126 с.
24. *Федотов Я. А.* Электроника и интеллект / Я. А. Федотов. — Минск : Вышэйш. шк., 1985. — 190 с.
25. *Фрейдин А. С.* Полимерные водные клеи / А. С. Фрейдин. — М. : Химия, 1985. — 144 с.
26. *Холодкова А. Г.* Общая технология машиностроения : учеб. пособие для нач. проф. образования / А. Г. Холодкова. — М. : Издательский центр «Академия», 2005. — 224 с.
27. *Черепахин А.А.* Материаловедение : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / А. А. Черепахин. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 256 с.
28. *Черпаков Б. И.* Металлорежущие станки : учебник для нач. проф. образования / Б. И. Черпаков, Т. А. Альперович. — М. : Издательский центр «Академия», 2003. — 368 с.
29. *Шаскольская М. П.* Кристаллы / М. П. Шаскольская. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Наука, 1985. — 208 с.

Оглавление

Введение 4

ЧАСТЬ I
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Глава 1. Общие сведения о материалах 8

1.1. Кристаллические и аморфные вещества 8
1.2. Строение твердых тел 14
1.3. Монокристаллические материалы 23
1.4. Жидкие кристаллы 27
1.5. Некоторые общие свойства металлов 31

Глава 2. Термическая, химико-термическая обработка и методы испытания материалов 34

2.1. Диаграммы состояния сплавов 34
2.2. Термическая обработка металлов и сплавов 39
2.3. Химико-термическая обработка 48
2.4. Механические испытания металлов 52
2.5. Технологические испытания и пробы 61

ЧАСТЬ II
МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНО- И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Глава 3. Конструкционные материалы 68

3.1. Сплавы железа 68
3.2. Сплавы на основе меди и никеля 76
3.3. Легкие сплавы 82
3.4. Свойства легирующих веществ 89
3.5. Материалы с упругими свойствами 97
3.6. Износостойкие материалы 100
3.7. Коррозия металлов и способы их защиты 105

Глава 4. Неметаллические конструкционные материалы 113

4.1. Пластмассы 113
4.2. Техническая керамика 121
4.3. Стекла 123
4.4. Резина. Переработка резины 125

4.5. Древесина и древесные изделия 129
4.6. Технические клеи 135

ЧАСТЬ III
МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Глава 5. Магнитные, электрические и тепловые свойства материалов 138

5.1. Магнитные свойства 138
5.2. Электрические свойства 141
5.3. Тепловые свойства 152

Глава 6. Полупроводники и приборы на их основе 160

6.1. Полупроводники 160
6.2. Полупроводниковые приборы 162

ЧАСТЬ IV
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава 7. Материалы для режущих инструментов 168

7.1. Инструментальные стали 168
7.2. Твердосплавные и минералокерамические материалы 171
7.3. Алмазы и алмазоподобные материалы 178
7.4. Сверхтвердые материалы 182

Глава 8. Материалы для штампов, пресс-форм и измерительных инструментов 188

8.1. Материалы для штампов и пресс-форм 188
8.2. Материалы для измерительных инструментов 191

ЧАСТЬ V
ПОРОШКОВЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава 9. Новые материалы 196

9.1. Общие сведения 196
9.2. Порошковые спеченные сплавы 197

Глава 10. Керметы и композиционные материалы 201

10.1. Керметы и покрытия на их основе 201
10.2. Композиционные материалы 203

ЧАСТЬ VI
ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Глава 11. Литейное производство 210

11.1. Литье металлов 210

11.2. Литье и обработка керамики 214
11.3. Переработка пластмасс 222

Глава 12. Механическая и электрическая обработка материалов 239

12.1. Резание материалов 239
12.2. Обработка металлов давлением 249
12.3. Электрические методы обработки материалов 261

Глава 13. Заготовительные операции 269

13.1. Входной контроль материалов 269
13.2. Разделение материалов на заготовки 270

Список литературы 281

Учебное издание

Моряков Олег Сергеевич

Материаловедение

Учебник

4-е издание, стереотипное

Редактор *Л. А. Левченкова*
Технический редактор *Н. И. Горбачёва*
Компьютерная верстка: *О. В. Пешкетова*
Корректор *С. Ю. Свиридова, Н.С.Потёмкина*

Изд. № 104108205. Подписано в печать 29.06.2012. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Балтика». Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 18,0.
Тираж 1 500 экз. Заказ № 15184.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
125252, Москва, ул. Зорге, д. 15, корп. 1, пом. 26б.
Адрес для корреспонденции: 129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1, а/я 48.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.
Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16067 от 06.03.2012.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного электронного оригинал-макета
в типографии филиала ОАО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.
E-mail: idelpress@mail.ru