

ТРАНСПОРТНОЕ МАТЕРИАЛО- ВЕДЕНИЕ

В.И.БЕРЛИН

Б.В.ЗАХАРОВ

П.А.МЕЛЬНИЧЕНКО



В. И. БЕРЛИН,
Б. В. ЗАХАРОВ,
П. А. МЕЛЬНИЧЕНКО

ТРАНСПОРТНОЕ МАТЕРИАЛО- ВЕДЕНИЕ

Под редакцией канд. техн. наук Б. В. Захарова

Утверждено
Главным управлением учебными заведениями МПС
в качестве учебника для студентов
вузов железнодорожного транспорта



МОСКВА «ТРАНСПОРТ» 1982

Берлин В. И., Захаров Б. В., Мельниченко П. А. Транспортное материаловедение: Учебник для вузов. ж.-д. трансп. / Под ред. Б. В. Захарова. — М.: Транспорт, 1982. — 287 с.

В учебнике рассмотрены состав, строение, свойства, методы испытания и улучшения широко применяемых на железнодорожном транспорте металлов, полимеров, строительных и важнейших электротехнических, а также топливных и смазочных материалов.

Рассчитана на студентов инженерно-экономических специальностей вузов железнодорожного транспорта; может быть использована практически работниками организаций снабжения.

Ил. 170, табл. 55, библиогр. 10 назв.

Книгу написали: канд. техн. наук *В. И. Берлин* — введение, первый раздел, главу 2 второго раздела, главы 1, 3, 4 четвертого раздела; канд. техн. наук *Б. В. Захаров* — главы 1, 3, 4 и 5 второго раздела, главу 2 четвертого раздела, пятый раздел; канд. техн. наук *П. А. Мельниченко* — третий раздел.

Рецензенты: О. В. Кунцевич, М. М. Машнев, Э. А. Мурзоян, А. В. Шаройко.

Заведующий редакцией *Л. И. Криштали*
Редактор *Г. А. Арсёнова*

Б $\frac{3601000000-209}{049(01)-82}$ 209-82.

ВВЕДЕНИЕ

Предмет и содержание курса. Материаловедение изучает состав, строение, свойства, методы улучшения и испытания материалов, а также основы их производства и технологию обработки.

Производство важнейших материалов и добыча топлива достигли в СССР к 1981 г. высокого уровня (табл. 1).

Таблица 1

**Рост производства важнейших материалов
и добыча топлива**

Вид продукции	Уровень производства и относительный рост по годам				
	1940	1950	1960	1970	1980
Сталь, млн. т	18,3	27,3	65,3	115,9	148,0
	1	1,5	3,6	6,3	8,1
Прокат черных металлов (готовый), млн. т	11,4	18,0	43,7	80,6	103
	1	1,6	3,8	7	9
Смолы синтетические и пластические массы, млн. т	0,01	0,07	0,31	1,67	3,64
	1	7	31	167	364
Цемент, млн. т	5,8	10,2	45,5	95,3	124
	1	1,8	7,8	16,4	21,4
Нефть, включая газовый конденсат, млн. т	31,1	37,9	147,9	353,0	603
	1	1,2	4,8	11,4	19,4
Уголь, млн. т	165,9	261,1	509,6	624,1	716,4
	1	1,6	3,1	3,9	4,3
Газ, млрд. м ³	3,2	5,8	45,3	197,9	435
	1	1,8	14,1	62	135,2

Выплавка стали в 1940 г. на душу населения составляла 95 кг, а в 1980 г. она достигла почти 592 кг, производство цемента — соответственно 30 и 497 кг. Высокими темпами развивается добыча нефти, газа, производство пластических масс, химических, электротехнических и других материалов. На долю Советского Союза в настоящее время приходится более 20% мирового производства материалов. По производству чугуна, стали, цемента и по добыче ископаемых углей СССР занимает ведущее место в мире.

Важнейшими задачами одиннадцатой пятилетки в области производства и использования материалов является улучшение качества всех видов продукции, расширение ассортимента, увеличение производства новых видов изделий, отвечающих современным требованиям. Поставлена задача повысить удельный вес продукции высшей категории качества в общем объеме ее выпуска.

Увеличение выпуска и повышение качества материалов должно сопровождаться усилением режима экономии материальных ресурсов. В одиннадцатой пятилетке намечено обеспечить экономию топливно-энергетических ресурсов в народном хозяйстве в количестве 160—170 млн. т условного топлива, в том числе 70—80 млн. т за счет уменьшения норм расхода; снижение в машиностроении и металлообработке норм расхода в среднем: проката черных металлов — не менее чем на 18—20%, труб стальных — на 10—12%, проката цветных металлов — на 9—11%; экономию в строительстве проката черных металлов и лесоматериалов — на 7—9%, цемента — на 5—7%.

В развитии экономики Советского Союза транспорт, особенно железнодорожный, играет огромную роль, связывая в единое целое все районы страны. Железнодорожный и другие виды транспорта, транспортное машиностроение и транспортное строительство вместе являются крупнейшим потребителем материалов — металлов, строительных, лесных, полимерных, химических и других, а также топлива. Материалы необходимы для сооружения железнодорожного пути, мостов, зданий, постройки локомотивов, вагонов, морских и речных судов, автомобилей, путевых и других машин, развития устройств автоматики и связи, эксплуатации технических средств, а также для ремонта и замены устаревших конструкций.

Повышение долговечности и надежности конструкций и сооружений предполагает использование материалов с высокими и устойчивыми характеристиками. Задача дальнейшего повышения скоростей движения и массовых норм поездов, повышения грузонапряженности железных дорог не может быть выполнена без применения высокопрочных и износостойких материалов, а также материалов, устойчивых против коррозии. Для строительства Байкало-Амурской магистрали и успешного освоения северных районов страны необходимы материалы с высокой надежностью в условиях низких температур.

Требования к качеству материалов непрерывно возрастают. Без этого невозможен дальнейший технический прогресс. Вместе с тем качество материалов в конструкциях в значительной степени определяется технологией изготовления и обработки деталей, ибо технология создает структуру, а структура определяет эксплуатационные свойства материала. Связь «технология — структура — свойства» позволяет последовательно, анализируя структуру, оценивать качество деталей машин, подвижного состава, строительных конструкций.

На железнодорожном транспорте и в транспортном строительстве, так же как и во всем народном хозяйстве, необходимы эффективные меры по экономии материалов, но не в ущерб качеству подвижного состава, машин и сооружений. Выбор того или иного материала или замена одного материала другим должны иметь инженерное и экономи-

ческое обоснование. Не всегда и не во всем, например, высокопрочные легированные стали лучше простых углеродистых: они хуже свариваются, более чувствительны к ударным нагрузкам и в то же время они более дорогие.

Краткая классификация и стандартизация материалов. Для удобства учета, планирования и заготовки материалов, а также снабжения ими потребителей разработана номенклатура материалов.

Номенклатурой называют перечень всех потребляемых материалов, топлива, запасных частей и оборудования в строго определенном порядке классификации. Классифицируются материалы по признакам их происхождения, способам обработки и назначению. В зависимости от происхождения материалы подразделяются на естественные и искусственные (в том числе синтетические), на неорганические и органические. Неорганические материалы включают металлы и неметаллические материалы, органические — топливо, лесные, полимерные и др. Подробная классификация металлов, полимерных, строительных и других материалов, а также топлива дается в соответствующих разделах. В статистическом учете материалы делятся в зависимости от степени их готовности к потреблению на сырье, топливо, полуфабрикаты и готовую продукцию.

Требования к качеству материалов и допустимые отклонения размеров устанавливают государственные общесоюзные стандарты (ГОСТы). Требования государственных стандартов являются обязательными как для поставщика, так и для потребителя. Стандартизация материалов — неперенное условие технического прогресса. Составной частью стандарта являются технические условия, представляющие собой описание основных свойств и признаков, которым должен удовлетворять материал. Система качественных показателей в стандартах определяет сортность материала и дает указание о величине допусков и дефектов, за пределами которых начинается брак. В государственных стандартах содержатся правила приемки, маркировки, упаковки, перевозки и хранения материалов.

Стандарт на каждый материал и изделие имеет свой номер. Например, государственный стандарт на углеродистую качественную конструкционную сталь обозначается ГОСТ 1050—74. Число 1050 обозначает номер стандарта, а 74 — год его утверждения. При переработке стандарта его номер сохраняется.

Для оценки качества или проверки соответствия свойств материала требованиям стандартов производятся испытания. Испытывать всю партию материала невозможно; испытанию подвергают лишь отдельные образцы, по результатам которого и делают заключение о свойствах всей партии. Эти образцы должны представлять средние свойства и называются они средней пробой. Мерой правильности взятия пробы является сходство результатов при повторном испытании.

Свойства материалов делятся на физические, химические, механические и технологические.

Важнейшими методами испытания материалов являются химический анализ, исследование строения (структуры), физические методы контроля качества, механические испытания и технологические пробы.

Химический анализ бывает качественным и количественным. Качественный анализ устанавливает, какие элементы образуют данный материал, а количественный дает точное определение весового количества каждого элемента в материале.

Исследование строения (структуры) делят на макроанализ — без увеличения или при небольшом увеличении и на микроанализ, когда строение материала определяется при больших увеличениях.

Физические методы исследований применяются для определения электротехнических и теплотехнических характеристик, а также плотности, объемной массы, водопроницаемости, водопоглощения, гигроскопичности и других свойств.

Механические испытания бывают статические — при медленном нагружении, динамические — при ударном приложении нагрузки и усталостные — при многократно повторяющемся нагружении.

Технологические пробы — это простейшие испытания в производственных условиях с целью выявления пригодности данного материала к той или иной обработке.

Раздел первый. МЕТАЛЛЫ

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ

§ 1. ПОНЯТИЕ О МЕТАЛЛАХ И ИХ КРАТКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Металлами называют вещества, характерными признаками которых являются пластичность, теплопроводность, высокая электропроводность и особый металлический блеск.

Общность свойств металлов определяется подобием электронного строения их атомных оболочек и типом межатомной связи. Атомы металлов на внешней оболочке имеют один, два, три электрона, а атомы неметаллов — от четырех до семи. У металлов внешние свободные электроны слабо связаны с ядром, поэтому они легко перескакивают с орбиты одного атома на орбиты других атомов, образуя подобие электронного газа. Атомы при этом ионизируются.

При соединении металлов с металлами возникает металлический тип связи, который обуславливается взаимопритяжением между положительно заряженными ионами (ионный скелет) и отрицательно заряженными свободными электронами (электронный газ). Благодаря тому что роль цементирующей связи, соединяющей ионы металлов в единое целое, выполняют образующие электронный газ свободные электроны, металлический тип связи не является жестким, а сами металлы являются телами пластичными, т. е. при смещении отдельных объемов относительно друг друга связь между ионами не нарушается.

Свободные электроны являются переносчиками тепла от атома к атому, что обуславливает значительную теплопроводность металлов. Высокая электропроводность металлов объясняется тем, что под действием даже небольшой разницы потенциалов свободные электроны перемещаются в одном направлении, образуя электрический ток.

Каждый металл отличается от другого строением (взаимным расположением атомов в пространстве) и свойствами (физическими, химическими, механическими и технологическими), тем не менее по ряду признаков их можно объединить в группы (рис. 1).

По физико-химическим свойствам металлы разделяются на следующие группы:

железные — железо, кобальт, никель, обладающие магнитными свойствами (ферромагнетики);

тугоплавкие — имеющие температуру плавления выше, чем у железа (1539°C);

легкоплавкие — имеющие температуру плавления ниже 500°C ;
 легкие — у которых плотность не превышает $4,50\text{ г/см}^3$;
 благородные — обладающие высокой коррозионной стойкостью;
 редкоземельные — лантаноиды;
 урановые — актиноиды.

Кроме того, все металлы можно разделить на две большие группы. — черные и цветные металлы. К черным металлам относятся железо и его сплавы с углеродом (чугуны и стали), а к цветным — все остальные металлы.

Металлы, широко применяемые в технике, называются техническими. Это железо, алюминий, магний, медь, свинец, олово, цинк, никель, титан. Большое число элементов составляет группу редких металлов. Из наиболее важных для современной техники металлов лишь очень немногие имеются в земной коре в большом количестве. К их числу относятся алюминий (8,8% массы земной коры), железо (5,1%), магний (2,1%), титан (0,6%). Медь, марганец, хром, ванадий, цирконий содержатся в земной коре в сотых долях, а цинк, олово, никель, кобальт, церий, ниобий — в тысячных долях процента. Остальных металлов еще меньше.

Металлы — основа технического прогресса. За годы Советской власти в нашей стране производство металлов росло бурными темпами (см. табл. 1). Применяются металлы в зависимости от их свойств, однако при этом обязательно учитывается и их стоимость. Относительная стоимость важнейших металлов приведена ниже (за единицу стоимости принята стоимость железа):

3 Li Литий	4 Be Бериллий																
11 Na Натрий	12 Mg Магний	13 Al Алюминий															
19 K Калий	20 Ca Кальций	21 Sc Скандий	22 Ti Титан	23 V Ванадий	24 Cr Хром	25 Mn Марганец	26 Fe Железо	27 Co Кобальт	28 Ni Никель	29 Cu Медь	30 Zn Цинк	31 Ga Галлий	32 Ge Германий	33 As Мышьяк			
37 Rb Рубидий	38 Sr Стронций	39 Y Иттрий	40 Zr Цирконий	41 Nb Ниобий	42 Mo Молибден	43 Tc Технеций	44 Ru Рутений	45 Rh Родий	46 Pd Палладий	47 Ag Серебро	48 Cd Кадмий	49 In Индий	50 Sn Олово	51 Sb Сурьма			
55 Cs Цезий	56 Ba Барий	57-71 Лантаноиды	72 Hf Гафний	73 Ta Тантал	74 W Вольфрам	75 Re Рений	76 Os Осмий	77 Ir Иридий	78 Pt Платина	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Таллий	82 Pb Свинец	83 Bi Висмут			
87 Fr Франций	88 Ra Радий	89-103 Актиноиды	104 Ku Курчатовий	105 Ns Нильсеновий													

Основные обозначения

 Щелочно-земельные металлы	 Редкоземельные металлы	 Тугоплавкие металлы	 Благородные металлы
 Легкие металлы	 Урановые металлы	 Железные металлы	 Легкоплавкие металлы

Рис. 1. Распределение металлов по группам

Металл	Относительная стоимость
Железо	1
Алюминий	6
Медь	7,5
Магний	8,0
Никель	17
Олово	22
Хром	25
Кобальт	35
Вольфрам	75

Металл	Относительная стоимость
Титан	160
Молибден	170
Серебро	290
Ванадий	750
Рубидий	2200
Палладий	5000
Золото	11 000
Иридий	25 000
Платина	27 000
Родий	45 000

Эти данные являются ориентировочными, так как не учитывают конъюнктурные обстоятельства. Однако перемещение вне групп, очерченных горизонтальными линиями, вряд ли возможно.

§ 2. СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Свойства металлов, как и других материалов, принято делить на физические, химические, механические и технологические. Все свойства материалов зависят от их химического состава и строения (структуры).

Физические свойства металлов характеризуются плотностью, температурой плавления, теплопроводностью, тепловым расширением, удельной теплоемкостью, электропроводностью и способностью намагничиваться. Химические свойства определяются отношением металлов к химическим воздействиям различных сред. Физические свойства изучаются в курсе физики, а химические — коррозионная стойкость, окалинность и др. — рассматриваются в соответствующих главах данного учебника.

Важнейшее значение для определения пригодности металлов в качестве конструкционных материалов имеют их механические свойства. К механическим свойствам относятся:

прочность — способность металла оказывать сопротивление действию внешних сил, не разрушаясь. Отношение прочности к плотности называют удельной прочностью. Сопротивление металла действию многократно повторяющегося нагружения носит название усталостной прочности;

упругость — свойство металла восстанавливать свою форму после прекращения действия внешних сил, вызвавших изменение формы (деформацию);

пластичность — свойство металла деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять измененную форму после прекращения действия сил. Пластичность — свойство, обратное упругости;

твердость — способность металла оказывать сопротивление проникновению в него более твердого тела;

вязкость — способность металла оказывать сопротивление ударным нагрузкам. Вязкость — свойство, противоположное хрупкости;

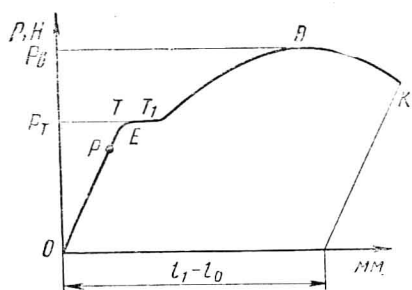


Рис. 2. Диаграмма растяжения образца из мягкой стали

обычно применяют круглые образцы диаметром 10 и 20 мм. Расчетная длина образцов берется равной десятикратному или пятикратному диаметру.

Испытываемый образец материала с первоначальной площадью поперечного сечения F_0 , мм², постепенно растягивается возрастающей силой P , Н. Результаты испытаний изображаются диаграммой растяжения (рис. 2). На диаграмме по оси ординат откладывается растягивающая сила P , а по оси абсцисс — абсолютное удлинение образца (деформация). С возрастанием нагрузки растет и напряжение σ , которое характеризуется отношением величины нагрузки к площади поперечного сечения образца и выражается в паскалях (1 Па = 1 Н/м²).

Прямая линия OP на диаграмме показывает, что до точки P удлинение образца возрастает пропорционально росту нагрузки. Эта зависимость носит название закона пропорциональности. Наибольшее напряжение, до которого испытываемый образец деформируется без отклонения от закона пропорциональности, называется *пределом пропорциональности*. До этой точки деформация бывает упругой, так как полностью исчезает после снятия нагрузки. При дальнейшем растяжении образца наблюдается отклонение от закона пропорциональности.

Точка E соответствует пределу упругости, т. е. напряжению, при котором образец при снятии нагрузки обнаруживает первые признаки остаточной деформации.

При дальнейшем возрастании усилия растяжения у пластичных материалов на диаграмме наблюдается горизонтальный участок $T - T_1$, указывающий на то, что образец продолжает удлиняться без заметного возрастания нагрузки (материал как бы «течет»). Напряжение, при котором образец продолжает деформироваться при временном постоянстве нагрузки, называется *пределом текучести*.

Предел текучести σ_T определяется

$$\sigma_T = P_T / F_0,$$

где P_T — нагрузка, соответствующая пределу текучести, Н;
 F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца, мм².

Высокоуглеродистые стали и некоторые неметаллические материалы не дают площадки текучести на диаграмме растяжения. Для таких металлов за предел текучести условно принимают напряжение, вызы-

износостойкость — сопротивление металла изнашиванию вследствие процессов трения. Износ определяется по изменению размеров или массы деталей.

Значения характеристик рассмотренных механических свойств определяются статическим растяжением, а также испытаниями на твердость, ударную вязкость, усталость и износ.

Испытание на растяжение (ГОСТ 1497—73). При этом виде испытан-

вающее остаточное удлинение, равное 0,2% начальной длины. Это так называемый *условный предел текучести* ($\sigma_{0,2}$).

Точка *B* показывает наибольшее значение усилия растяжения во время испытания образца. Условное напряжение, которое соответствует наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца, называется *пределом прочности при растяжении* (временное сопротивление разрыву). Предел прочности σ_B определяют по формуле

$$\sigma_B = P_B / F_0,$$

где P_B — наибольшее значение нагрузки, Н;

F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца, м^2 .

У металлов разрыв образца происходит при более низкой нагрузке, чем P_B (точка *K* на диаграмме). Это объясняется образованием «шейки», т. е. резким уменьшением сечения образца в одном месте, в котором напряжение продолжает расти до момента разрыва образца.

Отношение нагрузки в момент разрыва к площади поперечного сечения в шейке образца называется *истинным сопротивлением разрыву*:

$$\sigma_K = P_K / F_K,$$

где P_K — нагрузка в момент разрыва образца, Н;

F_K — площадь поперечного сечения шейки образца после разрыва, м^2 .

Диаграмма растяжения дает представление о пластичности материала, которая характеризуется относительным удлинением δ и относительным сужением площади поперечного сечения образца ψ .

Относительным удлинением называется отношение приращения длины образца к первоначальной его длине, выраженное в процентах:

$$\delta = (l_1 - l_0) 100 / l_0,$$

где l_0 — первоначальная расчетная длина образца, мм;

l_1 — длина образца после растяжения, мм.

Относительным сужением называется отношение уменьшения площади поперечного сечения образца к первоначальной площади, выраженное в процентах;

$$\psi = (F_0 - F_1) 100 / F_0,$$

где F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца, мм^2 ;

F_1 — наименьшая площадь поперечного сечения образца после растяжения, мм^2 .

Испытание на ударный изгиб (ударная вязкость ГОСТ 9454—78).

В лабораторных условиях изделия испытывают ударом (динамические испытания) на маятниковом копре (рис. 3). При испытании металлов образец стандартной формы $10 \times 10 \times 55$ мм, обычно с надрезом

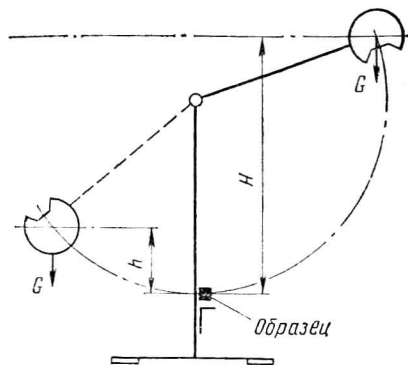


Рис. 3. Схема испытания металла на ударный изгиб

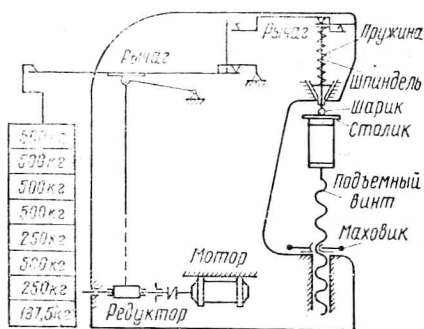


Рис. 4. Кинематическая схема прибора Бринелля

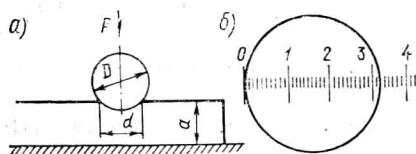


Рис. 5. Определение твердости:

а — схема определения твердости по методу Бринелля; б — схема измерения диаметра отпечатка

имеющие значения a_H менее $0,3 \text{ МДж/м}^2$, называются хрупкими, а хорошо сопротивляющиеся удару — вязкими.

Определение твердости (ГОСТ 9012—59.) Для определения твердости незакаленных сталей, чугуна и цветных металлов обычно применяют метод Бринелля (рис. 4). По этому методу определения твердости стальной закаленный шарик диаметром D вдавливается с силой P в поверхность испытываемого металла. В результате на поверхности образца остается отпечаток в виде шарового сегмента диаметром d с площадью поверхности F (рис. 5, а).

Твердость по Бринеллю, Па (Н/м^2), определяют

$$HB = P/F.$$

Для определения твердости в практической деятельности пользуются специальными таблицами, в которых приведены значения твердости в зависимости от диаметра отпечатка, нагрузки и диаметра вдавливаемого шарика. Схема измерения диаметра отпечатка показана на рис. 5, б. Соотношение между толщиной материала, диаметром шарика и нагрузкой при испытании по методу Бринелля приведено в табл. 2.

Способом Бринелля испытывают металлы, твердость которых не превышает 4500 МПа .

Как показали эксперименты, между твердостью по Бринеллю HB и пределом прочности при растяжении σ_b существует следующая приближенная зависимость для:

глубиной 2 мм , устанавливают на опорах копра, причем надрез располагают строго против того места, где маятник ударит по образцу. Затем маятник весом G поднимают на высоту H . В таком положении запас потенциальной энергии маятника $A = GH, \text{ Дж}$. Затем маятник освобождают. Падая, он разрушает образец. Неизрасходованная энергия поднимает маятник с другой стороны на высоту h , совершая работу $a = Gh, \text{ Дж}$.

Работа, затраченная на разрушение образца, определится

$$A_H = A - a = G(H - h).$$

Если эту работу отнести к площади поперечного сечения, то получим удельную работу удара, Дж/м^2 , или ударную вязкость:

$$a_H = A_H/F.$$

Материалы, легко разрушающиеся под действием удара и имеющие значения a_H менее $0,3 \text{ МДж/м}^2$, называются хрупкими, а хорошо сопротивляющиеся удару — вязкими.

Материалы, легко разрушающиеся под действием удара и имеющие значения a_H менее $0,3 \text{ МДж/м}^2$, называются хрупкими, а хорошо сопротивляющиеся удару — вязкими.

Материалы, легко разрушающиеся под действием удара и имеющие значения a_H менее $0,3 \text{ МДж/м}^2$, называются хрупкими, а хорошо сопротивляющиеся удару — вязкими.

Твердость по Бринеллю, Па (Н/м^2), определяют

$$HB = P/F.$$

Для определения твердости в практической деятельности пользуются специальными таблицами, в которых приведены значения твердости в зависимости от диаметра отпечатка, нагрузки и диаметра вдавливаемого шарика. Схема измерения диаметра отпечатка показана на рис. 5, б. Соотношение между толщиной материала, диаметром шарика и нагрузкой при испытании по методу Бринелля приведено в табл. 2.

Способом Бринелля испытывают металлы, твердость которых не превышает 4500 МПа .

Как показали эксперименты, между твердостью по Бринеллю HB и пределом прочности при растяжении σ_b существует следующая приближенная зависимость для:

Показатели при испытании на твердость

Металлы	Интервал твердости, МПа	Толщина испытываемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой и диаметром шарика	Диаметр шарика D , мм	Нагрузка, Н
Черные (стали, чугуны)	До 4500	Более 6	$P = 30D^2$	10	30 000
		От 6 до 3		5	7 500
		Менее 3		2,5	1 875
Цветные (медь, латунь, бронза)	350—130	Более 6	$P = 10D^2$	10	10 000
		От 6 до 3		5	2 500
		Менее 3		2,5	625
Особо мягкие цветные (алюминий, баббит, олово)	80—350	Более 6	$P = 2,5D^2$	10	2 500
		От 6 до 3		5	625
		Менее 3		2,5	156

термически неупрочненной углеродистой стали $\sigma_B = 0,36$ НВ; серого чугуна $\sigma_B = 0,1$ НВ.

По методу Роквелла (ГОСТ 9013—59) твердость определяют: для относительно мягких материалов с твердостью до 2400 МПа — вдавливанием стального шарика диаметром 1,59 мм при нагрузке 1000 Н; для более твердых металлов — вдавливанием алмазного конуса при нагрузке 1500 Н (HRC) или 600 Н (HRA). Величину твердости устанавливают с помощью индикатора, циферблат которого имеет две шкалы: красную B — для испытаний стальным шариком; черную C — для испытаний алмазным конусом. Твердость по Роквеллу измеряется в условных единицах. С помощью специальных таблиц показания твердости по Роквеллу могут быть переведены на показания по Бриггеллу.

Испытание на усталость. Рессоры, шейки осей локомотивов и вагонов, пальцы кривошипов, колесные валы двигателей и другие детали испытывают нагрузки, изменяющиеся по величине и направлению. Испытания на усталость (выносливость) металла производятся обычно на машинах, обеспечивающих знакопеременный изгиб, попеременное сжатие и растяжение, кручение или повторную ударную нагрузку. Результаты испытаний изображают в виде диаграммы, на которой по оси ординат откладывают напряжения σ , а по оси абсцисс — количество на-

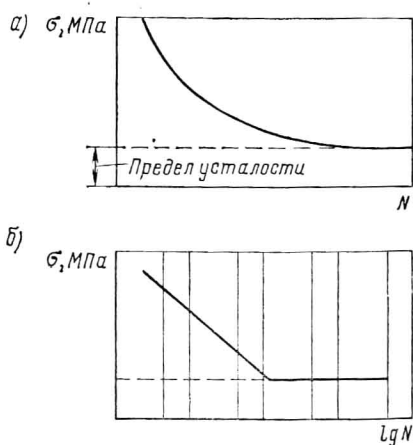


Рис. 6. Кривые усталости

гружений N (рис. 6, а). Наиболее удобно строить диаграммы усталости в полулогарифмических координатах, на которых легче определить точку перехода кривой в горизонтальное положение. Перегиб на диаграмме характеризует предел усталости (рис. 6, б).

Технологические пробы. Для определения способности металла принимать в холодном состоянии заданную форму при сжатии без признаков трещин, надрывов и изломов производится проба на осадку.

Способность листового металла к штамповке определяется пробой на выдавливание (ГОСТ 10510—74), а к образованию загиба — пробой на двойной кровельный замок (ГОСТ 13814—68). Проволока проверяется на скручивание и навивание, трубы — на изгиб, сплющивание, бортование и т. д.

Абразивная износостойкость определяется (ГОСТ 17367—71) сравнением размеров или веса испытуемого и эталонного образцов при их трении о поверхность с закрепленными абразивными частицами.

Глава 2. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

§ 1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Различают аморфное и кристаллическое строение тел. В аморфных телах атомы расположены в пространстве хаотически, в кристаллических — закономерно.

Металлы — тела кристаллические. Кристаллическое строение металлов можно представить себе в виде пространственной решетки (рис. 7), в узлах которой расположены атомы (точнее, ионы, так как свободные электроны металлов, перемещаясь от одного атома к другому, образуют как бы «электронный газ»).

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме, называется элементарной кристаллической ячейкой. Каждый металл имеет определенный тип кристаллической ячейки, но чаще всего встречаются три типа: объемноцентрированная кубическая ОЦК (рис. 8, а), границентрированная ГЦК (рис. 8, б) и гексагональная плотноупакованная ГПУ (рис. 8, в).

В *объемноцентрированной кубической* ячейке атомы расположены в углах куба и один атом в центре объема куба. Такие ячейки имеют металлы: Fe_α , Cr, W, Mo , Ti_β , Nb, Ta, Li и др.

В *границентрированной кубической* ячейке атомы расположены в углах куба и в центре каждой грани. Этот тип ячеек имеют металлы: Fe_γ , Co_β , Ni, Cu, Ag, Au, Pb и др.

В *гексагональной* ячейке атомы расположены в углах и в центре шестигранных оснований призмы, а три атома — в средней плоскости призмы. Подобные ячейки имеют металлы: Ti_α , Co_α , Zn, Cd, Be и др.

Индексы α , β , γ обозначают, что соответствующие металлы имеют разные кристаллические решетки при различных температурах (см. § 1 главы 3).

Расстояния между соседними атомами в кристаллической решетке называют периодами, или параметрами. Они очень малы, поэтому для их измерения принята особая единица — ангстрем (Å), равная 10^{-8} см. Период решетки a металлов, кристаллизующихся в кубической системе, находится в пределах от 2,86 до 6,0 Å.

На рис. 7 приведена схема идеальной кристаллической решетки. В действительности линий, соединяющих атомы, нет и атомы не удалены друг от друга, а соприкасаются своими внешними оболочками, так как только при таком условии возможен переход свободных электронов от одного атома к другому. Плотность упаковки атомов в металлах весьма велика. В кубической объемноцентрированной решетке атомы занимают 68% объема, а в кубической гранецентрированной и гексагональной решетке — 74% объема.

Реальные металлы имеют некоторые несовершенства кристаллического строения, а именно точечные, линейные и поверхностные.

Атомы (ионы), расположенные в узлах кристаллической решетки, имеют непрерывное колебательное движение. Они могут сохранять положение равновесия, но могут также перемещаться внутри кристаллической решетки и даже покидать ее, испаряясь. Перемещение атомов вещества внутри кристалла называется внутрикристаллической диффузией, а перемещение атомов в его собственной решетке — самодиффузией.

Смещенный с узла решетки атом называется *дислоцированным*, а оставшееся не занятое атомом свободное место в решетке — *вакансией* («дыркой»). Вакансии и дислоцированные атомы приводят к искажению кристаллических решеток (рис. 9, а). Дислоцированные атомы — это

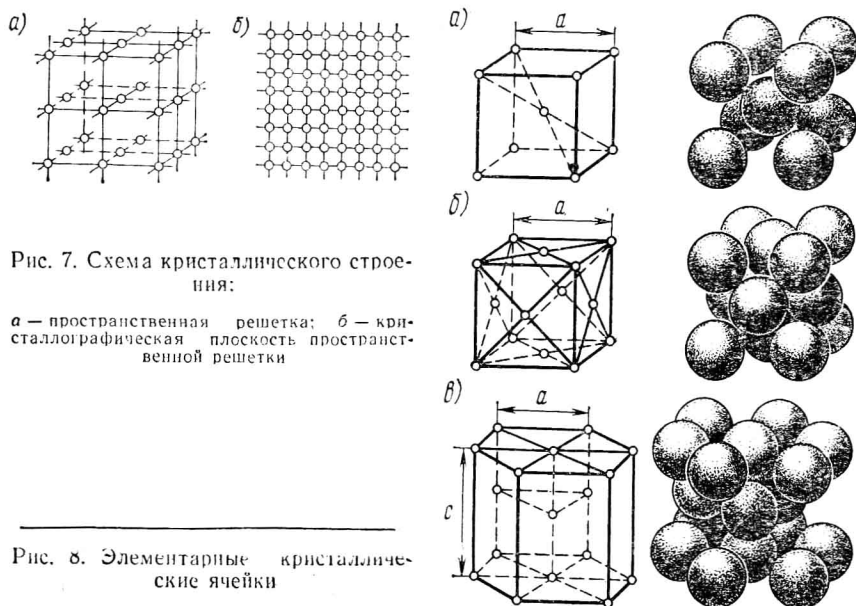


Рис. 7. Схема кристаллического строения:

a — пространственная решетка; b — кристаллографическая плоскость пространственной решетки

Рис. 8. Элементарные кристаллические ячейки

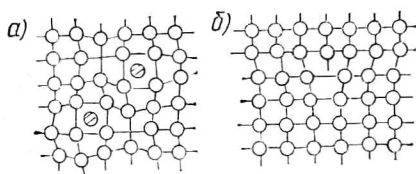


Рис. 9. Виды несовершенств решетки:
а — вакансии и дислоцированные атомы,
б — линейная дислокация

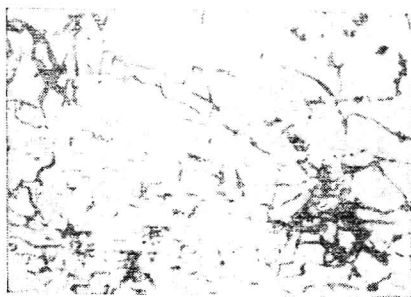


Рис. 10. Следы травления дислокаций, расположенных по границам блоков железа, $\times 20\,000$

в основном атомы примесных элементов, которые могут замещать атомы в узлах (атомы замещения) или находиться в межузельных порах (атомы внедрения).

Линейные несовершенства — дислокации имеют малые размеры в двух измерениях, но вместе с тем — большую протяженность в третьем. Вариантов дислокаций много. На рис. 9, б приведена схема лишь одной простейшей дислокации. Они бывают также краевые и винтовые. К линейным несовершенствам относят, кроме того, цепочки вакансий и межузельных атомов.

Следует отметить, что атомы на границе между зернами имеют менее правильное расположение, чем в объеме зерна. Это *поверхностные несовершенства*. Само зерно состоит из большого числа разориентированных на небольшие углы областей (блоков). Такая структура называется блочной, или мозаичной.

На границах блоков так же, как и на границах зерен, дислокации возникают в больших количествах (рис. 10).

Для оценки дислокационной структуры важно знать плотность дислокаций — суммарную длину их в 1 см^3 металла. Размерность плотности дислокаций — см^{-2} ($\rho = \text{см}/\text{см}^3$). У железа, как и у большинства металлов, плотность дислокаций колеблется в пределах $10^8 - 10^{13}\text{ см}^{-2}$, т. е. более 1 млн. км дислокаций в 1 см^3 .

Наличие в реальных кристаллах большого числа дислокаций и вакансий объясняет то, что реальные металлы имеют прочность во много раз меньшую, чем они должны иметь теоретически. Временное сопротивление разрыву железа $\sigma_v = 280\text{ МПа}$, высокопрочной стали — $1800-2500\text{ МПа}$, а полученных нитевидных кристаллов чистого железа, в котором вакансии и дислокации отсутствуют, — около $13\,000\text{ МПа}$.

В последние годы получены металлы с аморфным строением. Оно образуется в результате быстрого нагрева (лазером или другим концентрированным источником тепла) тонких слоев металла до жидкого состояния и сверхскоростного их охлаждения. Такие металлы обладают особыми свойствами, которые резко отличаются от свойств кристаллических металлов. Они могут быть более твердыми и износостойкими, обладать повышенной проводимостью и специальными магнитными свойствами.