

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1. Кристаллическое строение и основные механизмы структурообразования	8
1.1. Кристаллическое строение металлов	8
1.1.1. Несовершенства кристаллического строения	11
1.1.2. Строение кристаллического зерна	17
1.1.3. Полиморфные превращения в твердом состоянии	18
1.1.4. Теоретическая и фактическая прочность металлов	19
1.1.5. Поверхностные кристаллические дефекты	21
1.2. Кристаллизация металлов	22
1.2.1. Механизм процесса кристаллизации (классическая теория)	24
1.2.2. Дендритный характер кристаллизации	26
1.3. Ликвация	30
1.3.1. Особенности дендритной ликвации в отливках из конструкционной стали	31
Глава 2. Свойства металлов и сплавов	37
2.1. Физические свойства металлов	37
2.2. Химические свойства металлов	41
2.2.1. Химическое родство металлов	43
2.2.2. Коррозионная стойкость металлов	46
2.3. Механические свойства металлов	52
2.3.1. Деформация и разрушение металла	52
2.3.2. Показатели механических свойств	57
2.4. Технологические свойства металлов	71
2.5. Эксплуатационные свойства металлов	81
2.5.1. Эксплуатационные свойства при высоких температурах	84
2.5.2. Эксплуатационные свойства при низких температурах	87
2.5.3. Эксплуатационные свойства при циклических нагрузках	91
2.5.4. Эксплуатационные свойства при трении и износе	96
Глава 3. Классификация и основы маркировки сталей	105
3.1. Классификация сталей	105
3.2. Основы маркировки сталей	113

Глава 4. Влияние химического состава	
и неметаллических включений на свойства стали	121
4.1. Фазы в сталях	121
4.2. Основы легирования сталей	128
4.3. Влияние основных легирующих элементов	
на свойства конструкционной стали	130
4.4. Влияние неметаллических включений	
на свойства стали	136
4.5. Сера в стали	141
4.6. Сульфиды в стали, их состав и свойства	144
4.6.1. Моносульфид железа (FeS)	144
4.6.2. Сульфид марганца (MnS)	145
4.6.3. Сульфид кальция (CaS)	147
4.6.4. Сульфиды редкоземельных металлов (РЗМ)	148
Глава 5. Конструкционные стали	
со специальными свойствами	154
5.1. Высокопрочные легированные стали	154
5.2. Коррозионно-стойкие стали	157
5.3. Хладостойкие стали и сплавы	160
5.3.1. Хладостойкие стали климатического холода	161
5.3.2. Влияние различных факторов	
на хладноломкость металлов	165
5.3.3. Влияние вредных примесей	
и газов на хладостойкость	168
5.3.4. Влияние конструктивных факторов	
на разрушение стали	170
5.3.5. Хладостойкие низколегированные стали	173
Заключение	177
Список использованной и рекомендуемой литературы	178

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное машиностроение требует повышения служебных свойств и надежности работы изделий, что неразрывно связано с применением и совершенствованием конструкционных сталей и сплавов, а также с разработкой новых материалов с особыми структурой и свойствами для специальных условий эксплуатации. При этом остро стоят вопросы разработки и оптимизации технологий производства и упрочняющей обработки материалов. Для решения данных вопросов современному техническому специалисту необходимо совместно рассматривать особенности кристаллического строения, структуры, химического состава, деформации и разрушения, а также условий применения конструкционных сталей и сплавов. При этом важны теоретические закономерности физико-химических явлений, лежащих в основе традиционных и новых технологий их производства.

Приведенные в учебном пособии теоретические сведения должны оказать существенную помощь обучающимся при изучении дисциплины «Конструкционные стали и сплавы», способствовать более глубокому пониманию связи структуры, свойств и технологии производства конструкционных сплавов и задач, стоящих перед инженерами при повышении свойств существующих и создании новых материалов и технологий изготовления изделий из них. Изложенный в учебном пособии материал содержит основную теоретическую часть, дополнительную информацию для семинарских занятий и самостоятельной работы студентов, что соответствует рабочей программе учебной дисциплины и основным задачам ее освоения.

При создании учебного пособия использовано большое количество литературных источников, включая учебные и научные издания. При этом учебный материал представлен компактно, в достаточном объеме, удобной для восприятия и понимания форме с приведением практических примеров. Выполнены качественные рисунки, классификационный и теоретический материал сгруппирован в таблицы, что позволяет реализовать один из ключевых принципов обучения — наглядность. Всё это позволит обучающимся лучше понять и усвоить сущность процессов и явлений, структуры, связей и взаимодействий, изложенных в теоретических положениях.

Учебное пособие состоит из 5 глав. В первой главе приведены основы кристаллического строения и структурообразования сталей и сплавов. Во второй главе рассмотрены основные физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства

металлических материалов, характеризующие их показатели и способы их определения. В третьей главе изложены классификация и основы маркировки сталей. Четвертая глава содержит сведения о влиянии химического состава и неметаллических включений на свойства сталей. В пятой главе рассмотрены используемые в промышленности конструкционные стали и сплавы со специальными свойствами.

С методической точки зрения материал учебного пособия изложен в определенной логической последовательности, что позволяет обучающимся лучше понимать и осваивать учебный материал, а также сформировать целостную картину взаимосвязи состава, структуры и свойств конструкционных сталей. В конце каждой главы достаточно подробно сделаны общие выводы. Читателю предлагается проверить уровень своих знаний и усвоения теоретического материала, ответив на вопросы для самоконтроля.

Автор выражает надежду, что приведенный в учебном пособии теоретический материал будет способствовать плодотворной подготовке будущих специалистов в области машиностроения и материаловедения и их дальнейшему развитию как инженеров.

ВВЕДЕНИЕ

Конструкционные стали являются основным материалом для изготовления широкого спектра деталей, работающих в различных условиях, от надежности которых зависит безопасность эксплуатации конструкций, оборудования, механизмов и машин. Из всех материалов, применяемых в настоящее время и прогнозируемых в будущем, только сталь позволяет получить оптимальное сочетание высоких значений механических и эксплуатационных характеристик при хорошей технологичности и сравнительно низкой стоимости [33].

Изучение структурообразующих процессов в металле является научной основой для повышения свойств существующих и разработки новых конструкционных сталей с заданными структурой и свойствами с учетом растущих потребностей развития современного машиностроения.

Одно из основных условий успешного развития современного машиностроения — это повышение служебных свойств конструкционных сталей и сплавов. С повышением рабочих нагрузок и ужесточением условий эксплуатации растут требования к деталям и конструкциям, поэтому развитие промышленности требует создания новых или совершенствования существующих марок сталей. Решение этих задач связано с разработкой новых составов с особыми структурой и свойствами, с созданием и совершенствованием технологий производства, обработки и упрочнения. Современные технологии производства конструкционных сталей и сплавов основаны на научных методах реализации физико-химических процессов и явлений, протекающих в объеме и поверхностных слоях жидких расплавов, заготовок и изделий при различных внешних воздействиях.

Концепция учебного пособия базируется на неразрывной связи структуры, состава и технологии производства со свойствами конструкционных сталей, которые, в свою очередь, определяют надежность изделий при различных условиях эксплуатации. Поэтому совместно рассматриваются особенности кристаллического строения, структурных превращений и изменений, химического состава и совокупности физических, химических, механических, технологических и эксплуатационных свойств сталей и сплавов.

В связи с этим материал излагается в определенной последовательности, начиная с особенностей процессов формирования структуры и свойств, возможностей управления ими, влияния химического состава и неметаллических включений и заканчивая служебными свойствами металла в готовых изделиях и примерами различных видов сталей для конкретных условий эксплуатации.

ГЛАВА 1

КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

Знание теоретических основ строения и структурообразования, особенностей изменения структуры металла при производстве, обработке и эксплуатации позволяет управлять процессами формирования структуры и свойств сталей и сплавов. Это дает возможность совершенствования и создания новых технологий производства конструкционных материалов с заданными механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами.

1.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Металлы с физической точки зрения — это твердые тела, имеющие электронное строение, обладающие высокой плотностью, тепло- и электропроводностью, металлическим блеском, способностью к расплавлению и кристаллизации, магнитными и другими характерными свойствами, отличающими их от неметаллов. Общим свойством металлов и сплавов является их *кристаллическое строение*, характеризующееся определенным закономерным расположением атомов в пространстве. Атомы состоят из положительно заряженного ядра, внутри которого находятся протоны и нейтроны, а по орбитам вокруг него движутся отрицательно заряженные электроны. Ядро состоит из протонов и нейтронов. Количество протонов и число электронов соответствуют порядковому номеру металла в периодической таблице. В пространстве атомы металлов располагаются в геометрически правильном порядке, соприкасаясь между собой внешними электронными сферами [15].

Для описания атомно-кристаллической структуры используют понятие *кристаллической решетки*, являющейся воображаемой пространственной сеткой с ионами в узлах, между которыми перемещаются электроны, образуя «электронный газ», обеспечивающий устойчивость решетки, обуславливающий характерные свойства металлов и наличие металлической связи (рис. 1).

Металлическая связь — это связь между положительно заряженными ионами (катионами) и общими свободными электронами, движущимися во всем объеме.

Электроны в атомах металлов расположены дальше, чем в неметаллах. Этим объясняется беспрепятственное отделение валентных

электронов, поэтому металлы всегда выступают восстановителями в химических реакциях. В металлах электроны, находящиеся на внешних оболочках (валентные электроны), не связаны с отдельными атомами, а оторваны от них и принадлежат всему объему металла. Такие коллективизированные электроны, называемые электронами проводимости, обуславливают электропроводность металлов, образуют «электронный газ», компенсирующий силы взаимного электростатического отталкивания положительных ионов, обеспечивая металлическую связь в твердом состоянии [9].

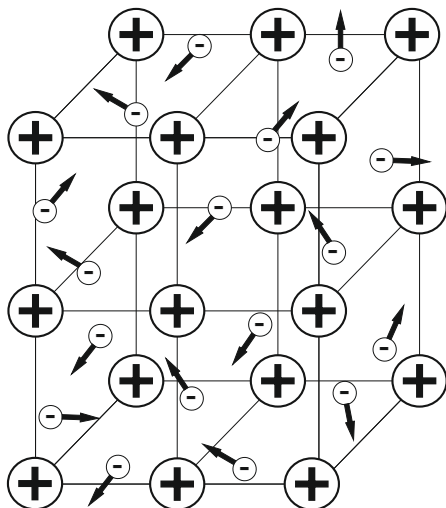
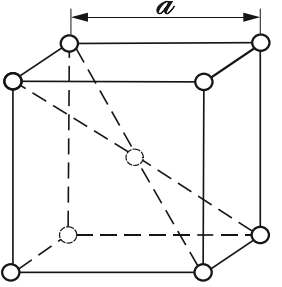
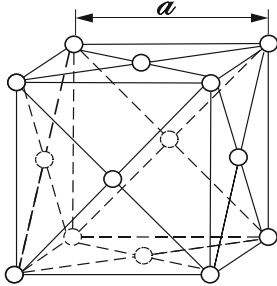
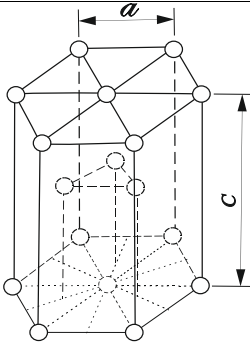


Рис. 1. Модель кристаллической решетки с металлической связью

Атомы металлов образуют кристаллическую решетку, состоящую из элементарных кристаллических ячеек (повторяющихся комплексов атомов). Стремление атомов металла расположиться ближе друг к другу, плотнее, приводит к тому, что количество встречающихся вариантов взаимного расположения атомов металла в кристаллах невелико. Наиболее часто металлы имеют кристаллические решетки следующих типов: объёмно-центрированный куб (ОЦК), гранецентрированный куб (ГЦК), гексагональная плотноупакованная (ГПУ). Основные характеристики решеток представлены в таблице 1.

Некоторые металлы, например Fe и Ti, в зависимости от внешних условий (температура и давление) могут существовать в состояниях с различными кристаллическими решетками — это явление называется полиморфизмом или аллотропией.

Основные характеристики кристаллических решеток металлов

Вид ре- шетки	Геометрическая модель	Характеристика	Примеры металлов
ОЦК		8 ионов находятся в углах куба, 1 — в его середине на пересечении диагоналей	α -Fe, Cr, W, V, Mo, Nb, Li, Na, K, β -Ti
ГЦК		Ионы располагаются в углах куба и центре каждой грани, центр куба свободен	γ -Fe, Cu, Ni, Al, Ca, Pb, Ag, Pt
ГПУ		Шестигранная призма, состоит из отстоящих друг от друга на параметр c параллельных гексагональных оснований. Ионы расположены в вершинах и центре шестигранных оснований, 3 иона находятся на средней плоскости между основаниями и образуют треугольник	Zn, Mg, Co, Zr, Cd, Be, α -Ti

Внутренняя кристаллическая структура зерна реальных металлов и сплавов не является правильной, она имеет определенную степень искажения. Характер и степень нарушения правильности (совершенства) кристаллического строения, вид, количество и распределение дефектов определяют в значительной мере все механические и служебные свойства конструкционных материалов.

1.1.1. Несовершенства кристаллического строения

Рассмотрим встречающиеся несовершенства кристаллического строения (дефекты), классифицируемые по характеру измерения в пространстве на: *точечные, линейные, поверхностные, объемные*.

Точечные дефекты вызваны нарушениями структуры с размерами во всех измерениях, сопоставимыми с размерами атома. Данные дефекты классифицируют следующим образом (рис. 2):

1) собственные дефекты кристаллической решетки:

- *вакансии* — незанятые места в узлах кристаллической решетки;
- *межузельные атомы* — атомы, находящиеся вне узлов кристаллической решетки;

2) примесные дефекты:

- *атомы замещения* — примесные атомы, замещающие атомы основного металла в узлах решетки или заполняющие вакансии;
- *атомы внедрения* — примесные атомы, внедряющиеся в свободные места решетки и занимающие междоузлия.

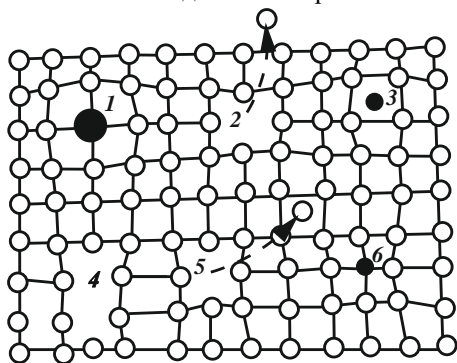


Рис. 2. Схема точечных дефектов кристаллической решетки: 1 — примесный атом замещения; 2 — атом, вышедший на поверхность кристалла (дефект Шоттки); 3 — примесный атом внедрения; 4 — бивакансия; 5 — вакансия и межузельный атом (дефект Френкеля); 6 — примесный атом замещения.

В любом твердом веществе возникают тепловые колебания, в результате которых отдельные атомы приобретают значительно

большую энергию, чем средний уровень энергии атомов, характеризуемый температурой данного тела. Эти атомы могут покидать равновесные положения в узлах решетки и перемещаться в междоузлиях, оставляя места в узлах решетки незанятыми. Атом, расположенный в междоузлии решетки, — дислоцированный атом, а узел в кристаллической решетке, не занятый атомом, — вакансия. Работа, которая требуется для того, чтобы удалить атом из регулярного положения, называется *энергией активации* и является важнейшей характеристикой способности атомов к перемещению. Величина эта не зависит от температуры, а определяется природой вещества. В кристаллической решетке реализуются механизмы перемещения вакансий, дислоцированных атомов из одного междоузлия в другие или обмена двух соседних атомов [16]. Вакансии могут объединяться, образуя пары (бивакансии) или даже скопления.

Вокруг вакансий или дислоцированных атомов нарушается равномерность окружения атомами-соседями по сравнению с бездефектными участками решетки. В результате этого вокруг вакансий и дислоцированных атомов возникает поле упругих искажений кристаллической решетки [9].

Итак, точечные дефекты являются центрами локальных искажений кристаллической решетки и выступают источниками поля упругих искажений и внутренних напряжений решетки, что оказывает влияние на механические свойства материала. Данные дефекты решетки играют также важную роль при протекании диффузионных процессов в металлах и сплавах.

Диффузия — перенос вещества, обусловленный беспорядочным тепловым движением диффундирующих частиц. Это один из процессов, на которых основана теория химико-термической обработки стали [9]. Диффундирующий элемент может образовывать с металлом систему непрерывных твердых растворов и систему сплавов с ограниченной растворимостью и с химическими соединениями. Различают два вида диффузии: 1) *самодиффузия*, когда происходит перемещение атомов основного металла в собственной кристаллической решетке; 2) *гетеродиффузия*, когда происходит перемещение инородных (растворенных) атомов в чужой кристаллической решетке [31].

В первом случае в результате хаотического теплового движения отдельные атомы основного металла время от времени меняют места в своей кристаллической решетке, совершая переход из одного положения в другое. Этот процесс перемещения однородных атомов происходит непрерывно и хаотически и не приводит к изменению концентрации.

Во втором случае инородные атомы перемещаются в направлении от мест высокой концентрации к местам низкой концентрации. Этот процесс совершается самопроизвольно, так как состояние с неравномерной концентрацией обладает большей свободной энергией, чем состояние с равномерным распределением растворенных атомов.

Влияние температуры, значительно ускоряющее диффузионные процессы в металле, обусловлено тем, что с повышением температуры увеличиваются тепловые колебания, благодаря чему увеличивается число вакансий в решетке.

Количественно процесс диффузии характеризуется так называемым *коэффициентом диффузии* D (см²/с), который численно равен количеству вещества, продиффундировавшего через площадку в 1 см² в течение секунды при перепаде концентраций по обе стороны площадки, равном единице [9].

$$D = Ae^{\frac{-Q}{RT}},$$

где A — коэффициент, зависящий от кристаллической решетки; Q — энергия активации; T — абсолютная температура; e — основание натуральных логарифмов; R — газовая постоянная ($R = 8,31441$ Дж/(моль·К)).

Коэффициент диффузии разных веществ сильно зависит от уровня энергии активации: чем больше Q , тем резко меньше D . В твердых растворах внедрения процесс диффузии облегчается тем, что не требует вывода атома растворителя в иррегулярное положение, поэтому энергия активации меньше, чем при образовании твердых растворов замещения. Например, при диффузии углерода в γ -железе $Q = 30$ ккал/г-атом (растворы внедрения), а в случае диффузии металлов (растворы замещения) $Q = 60$ ккал/г-атом. Для стали с 0,2% С при 1100°C $D = 6 \cdot 10^{-7}$ для диффузии углерода и $D = 6 \cdot 10^{-11}$ для диффузии молибдена [9].

Некоторые особенности диффузии в металлах объясняются их кристаллическим строением. *Анизотропия* свойств кристаллов — различие свойств в зависимости от направления — проявляется также в способности диффузии протекать в разных направлениях с различной скоростью. Все кристаллы анизотропны. Например, анизотропия свойств деформированных металлов зависит от наличия неметаллических включений, располагающихся при деформации в строчки.

Границы зерен являются участками, в которых диффузионные процессы облегчены ввиду наличия в этих местах дефектов кристаллического строения. Если растворимость диффундирующего веще-

ства в металле мала, то часто наблюдается преимущественная диффузия по границам зерен [31]. В случае значительной растворимости диффундирующего элемента в основном металле роль пограничных слоев повышенной растворимости уменьшается. В момент фазовых превращений диффузия протекает быстрее.

Второй вид несовершенства кристаллического строения — это *линейные дефекты* решетки, характеризующиеся поперечными размерами, не превышающими несколько межатомных расстояний, и длиной размера кристалла. К линейным дефектам относят *дислокации*, представляющие собой линии, вдоль которых нарушено правильное расположение атомных плоскостей в кристалле. Типичные простейшие виды дислокаций — это *краевые* и *винтовые* [15].

Краевые дислокации образуют лишнюю полуплоскость атомов — *экстраплоскость*, характеризующуюся малыми размерами в двух направлениях, но имеющую значительную протяженность в третьем измерении (рис. 3). Если экстраплоскость краевой дислокации находится в верхней части кристалла, то дислокацию называют положительной, если в нижней — то отрицательной. Знак дислокаций позволяет оценить результат их взаимодействия. Дислокации одного знака отталкиваются, а противоположных — притягиваются [9].

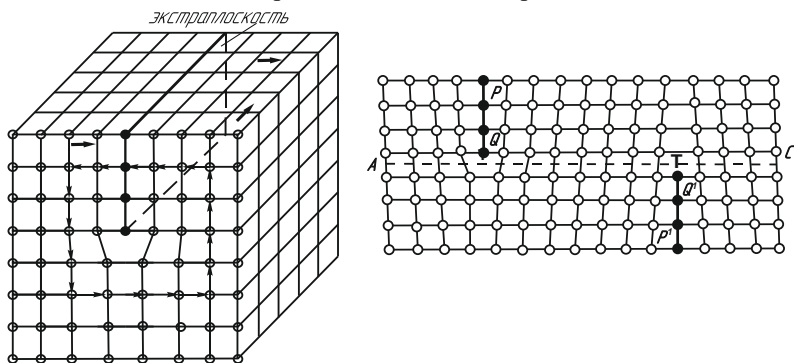


Рис. 3. Схема краевой дислокации:

а) пространственная; б) расположение атомов в области дислокации.

Вблизи линии краевой дислокации атомы смещены со своих мест и кристаллическая решетка искажена, что вызывает образование поля напряжений: выше линии дислокации решетка сжата, а ниже растянута [16]. Вследствие искажения решетки в районе дислокации она легко смещается от нейтрального положения, а соседняя плоскость, перейдя в промежуточное положение, превращается в экстра-

плоскость, образуя дислокацию вдоль краевых атомов. Таким образом, дислокация может перемещаться вдоль некоторой плоскости скольжения, расположенной перпендикулярно к экстраплоскости. Граница зерна является препятствием для движения дислокаций, поэтому у границ зерен плотность дислокаций больше.

Винтовые дислокации образуются путем частичного сдвига атомных слоев с нарушением их параллельности (рис. 4). Получается такая картина, что если двигаться вокруг дислокации, то плоскость решетки сдвигается на один или несколько слоев подобно винтовой лестнице. Перемещение от атома к атому вокруг линии дислокации происходит вдоль винтовой линии.

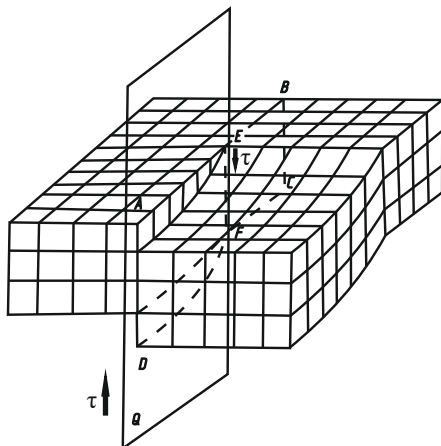


Рис. 4. Схема винтовой дислокации

Винтовая дислокация появляется при деформации кристалла. При воздействии на кристалл она будет перемещаться вдоль плоскости скольжения за счет разрыва-соединения соседних половинок плоскостей. По мере деформации разрыв новой плоскости происходит как раз на линии дислокации, так как на ней искажения кристаллической решетки максимальные.

Важное практическое значение для оценки структуры и её изменений имеет суммарная характеристика количества дислокаций — *плотность дислокаций* p . Это суммарная длина дислокаций Σl , приходящаяся на единицу объема V кристалла: $p = \Sigma l / V$ (см⁻²). Для отожженных металлов $p = 10^6 - 10^8$ см⁻², после холодной деформации p увеличивается до $10^{11} - 10^{12}$ см⁻², что соответствует примерно 1 млн км дислокаций в 1 см³ [9]. Увеличение плотности свыше 10^{12} см⁻² приво-

дит к появлению трещин и разрушению металла. Как видно, плотность дислокаций в реальных металлах и сплавах большая, поэтому они значительно влияют на все их свойства. При этом плотность дислокаций — величина переменная, она изменяется в зависимости от видов обработки металлов и условий эксплуатации изделий.

Дислокации образуются в структуре металлов при кристаллизации, пластической деформации, фазовых превращениях, под действием различных внешних факторов в зависимости от условий эксплуатации. Напряжения, концентрируясь у различных дефектов, генерируют дислокации [9]. Дислокации неравномерно рассредоточены в объеме металла, поэтому их распределение образует дислокационную структуру. Дислокации легко перемещаются под действием напряжений и способны накапливаться в определенных объемах. Преградой для движения дислокаций выступают микродефекты кристаллической структуры, макродефекты (поры и трещины), примеси и неметаллические включения, границы зерен, места с повышенной плотностью дислокаций. В результате роста количества дислокаций в определенных объемах они сами начинают мешать перемещаться друг другу, при этом происходит увеличение прочности металла с потерей пластичности и вязкости, что в дальнейшем может привести к появлению трещин и разрушению структуры.

Дислокации наряду с другими дефектами участвуют в фазовых превращениях. Вдоль дислокаций скорость диффузии намного выше, чем через бездефектную кристаллическую решетку. Дислокации выступают местом концентрации примесных атомов, которые образуют вокруг дислокации зоны повышенной концентрации (так называемые облака, или атмосферы, Коттрелла), мешающие перемещению дислокаций и упрочняющие металл, но делающие его более хрупким [12]. Связано это с тем, что дислокации притягивают к себе атомы различных примесей, которые осаждаются в виде цепочки вдоль края экстраплоскости [9]. Такие атомы снижают уровень упругих искажений дислокационной структуры. С повышением температуры облака Коттрелла рассеиваются, так как происходит частичное растворение примесей в основном металле. При понижении температуры до достижения предела растворимости примеси выделяются в структуре и образуют дисперсные включения второй фазы. Такое явление приводит к дополнительному охрупчиванию металла в условиях низких температур. Это является одной из причин хладноломкости металлов и сплавов.

Итак, теория дислокаций объясняет многие процессы, происходящие в структуре металлов, зависимости между структурными изменениями и свойствами, а также природу пластичности и огромную разницу между теоретической и практической прочностью металлов.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru