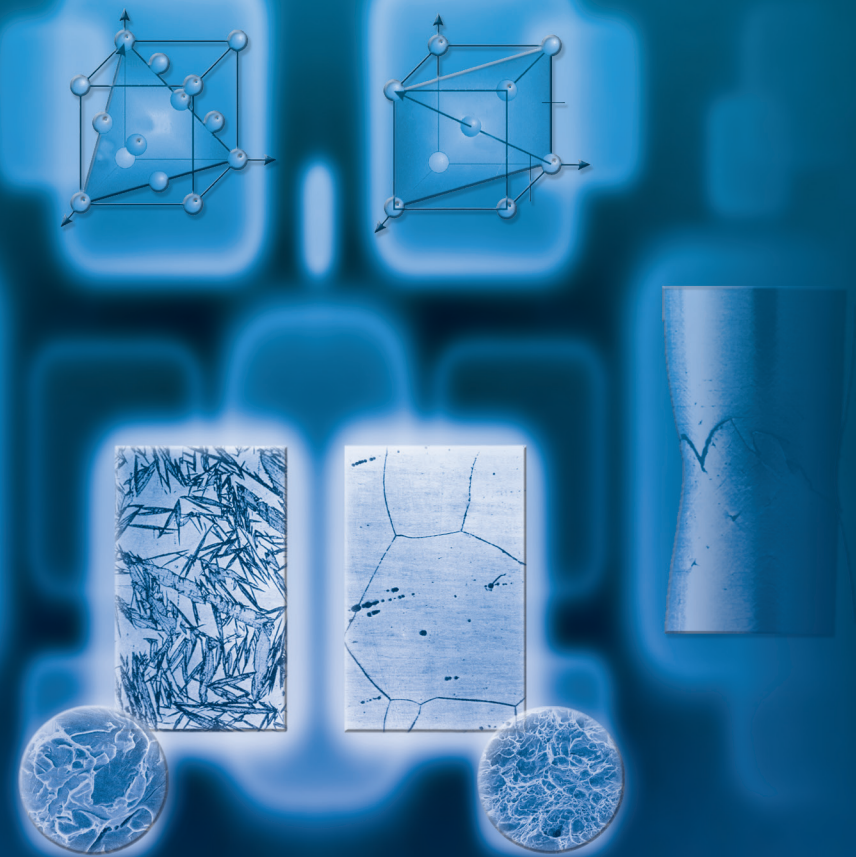


С.А. Никулин, В.Ю. Турилина

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ и термическая обработка

Материаловедение и термическая обработка



№ 752

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра металловедения и физики прочности

С.А. Никулин

В.Ю. Турилина

Материаловедение и термическая обработка

Учебное пособие

Издание 2-е, переработанное и дополненное

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению Металлургия



Москва 2013

УДК 669.017:621.78
Н65

Рецензент
д-р техн. наук, проф. *С.В. Добаткин*

Никулин, С.А.

Н65 Материаловедение и термическая обработка : учеб. пособие /
С.А. Никулин, В.Ю. Турилина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. :
Изд. Дом МИСиС, 2013. – 171 с.
ISBN 978-5-87623-688-3

Пособие содержит материал, необходимый для самостоятельной подготовки студентов к лекциям и практическим занятиям по дисциплине «Материаловедение». Рассмотрены следующие разделы: деформация, разрушение и механические свойства; фазовые и структурные превращения при нагреве и охлаждении; основные виды термической обработки; основные углеродистые и легированные стали, применяемые в технике. Этот материал даст студентам целостное представление о процессах, происходящих в сталях при термическом и деформационном воздействии, о взаимосвязи структуры и свойств, об основных принципах легирования сталей, о способах обеспечения требуемой структуры и комплекса свойств методами термической обработки сталей различного назначения.

Пособие соответствует программам курсов «Материаловедение», «Материаловедение и термическая обработка металлов», «Специальные сплавы», «Специальные стали и сплавы» для направлений «Материаловедение и технологии материалов», «Металлургия», «Физика».

УДК 669.017:621.78

ISBN 978-5-87623-688-3

© Никулин С.А.,
Турилина В.Ю., 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Деформация, разрушение и механические свойства металлов	6
1.1. Общие положения.....	6
1.2. Упругая деформация	7
1.3. Пластическая деформация и деформационное упрочнение	9
1.3.1. Пластическая деформация металлов скольжением.....	9
1.3.2. Пластическая деформация металлов двойникованием	11
1.3.3. Деформационное упрочнение.....	12
1.4. Разрушение.....	15
1.4.1. Виды разрушения металлов.....	15
1.4.2. Механизмы зарождения трещин	17
1.4.3. Вязкое разрушение	19
1.4.4. Хрупкое разрушение	24
1.5. Механические испытания	29
1.5.1. Классификация механических испытаний	29
1.5.2. Основные виды механических испытаний.....	31
2. Изменение структуры и механических свойств металлов при деформации и последующем нагреве.....	56
3. Механизм и кинетика фазовых превращений в твердом состоянии.....	61
3.1. Превращения в стали при нагреве.....	61
3.2. Превращения в стали при охлаждении. Диаграмма изотермических превращений аустенита	67
3.3. Термокинетические диаграммы превращений	78
4. Термическая обработка стали.....	81
4.1. Классификация видов термической обработки. Общие положения и определения.....	81
4.2. Отжиг I рода	83
4.2.1. Гомогенизационный (диффузионный) отжиг	83
4.2.2. Рекристаллизационный отжиг	85
4.2.3. Отжиг для снятия остаточных напряжений	86
4.3. Отжиг II рода.....	88
4.3.1. Виды отжига II рода	88
4.3.2. Перегрев и пережог стали	92
4.4. Закалка стали.....	95
4.4.1. Закалка на мартенсит.....	95

4.4.2. Основные закономерности мартенситного превращения...	97
4.4.3. Выбор режима закалки.....	98
4.4.4. Закаливаемость и прокаливаемость стали.....	100
4.4.5. Способы закалки стали	103
4.5. Отпуск стали	106
4.5.1. Превращения в стали при отпуске. Выбор режимов отпуска.....	106
4.5.2. Вторичное твердение стали	109
4.5.3. Отпускная хрупкость.....	110
4.6. Старение стали.....	111
4.7. Способы поверхностного упрочнения стальных изделий	112
4.7.1. Химико-термическая обработка. Общие закономерности.....	112
4.7.2. Поверхностная закалка стали	119
5. Углеродистые и легированные стали	126
5.1. Металлургическое качество стали (неметаллические включения и примеси в стали)	126
5.2. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали.....	130
5.3. Классификация и маркировка сталей	133
5.4. Строительные стали	136
5.5. Машиностроительные стали.....	140
5.5.1. Углеродистые качественные стали	140
5.5.2. Улучшаемые стали	142
5.5.3. Цементуемые и азотируемые стали	145
5.5.4. Высокопрочные стали	148
5.5.5. Мартенситно-стареющие стали.....	150
5.5.6. Подшипниковые стали	151
5.5.7. Рессорно-пружинные стали	152
5.5.8. Криогенные стали.....	153
5.5.9. Износостойкие стали.....	154
5.6. Коррозионно-стойкие стали	156
5.7. Жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы	158
5.8. Теплостойкие стали	160
5.9. Жаропрочные стали и сплавы	160
5.10. Литейные стали.....	162
5.11. Инструментальные стали.....	164
Библиографический список.....	170

ВВЕДЕНИЕ

Термическая обработка является основным и самым распространенным способом создания заданной структуры для обеспечения механических и других свойств в сталях и сплавах различного назначения. На металлургических и машиностроительных предприятиях термическую обработку применяют как промежуточную операцию для улучшения комплекса технологических свойств и как окончательную технологическую операцию для придания изделиям необходимых свойств с целью обеспечения их эксплуатационных характеристик.

Для правильного выбора стали под конкретное изделие, определения вида и режима ее термической обработки для обеспечения требуемых свойств необходимы знания о процессах, происходящих в сталях при термической обработке, о влиянии различных факторов на структуру и свойства сталей, о процессах их деформации и разрушения.

Поэтому цель этого раздела курса «Материаловедение» – дать студентам основные представления о современной теории термической обработки и практике ее применения, научить применять полученные знания при анализе формирования структуры и фазового состава в сталях в процессе термической и деформационной обработки, выборе сталей для изготовления изделий с заданными свойствами и проведении их термообработки, при проведении и анализе результатов основных механических испытаний.

В пособии кратко изложены основные темы этого раздела курса: деформация, разрушение и механические свойства; фазовые и структурные превращения при нагреве и охлаждении; основные виды термической обработки; основные углеродистые и легированные стали, применяемые в технике.

Приведенный материал даст студентам целостное представление о процессах, происходящих в сталях при термическом и деформационном воздействии, о взаимосвязи структуры и свойств, об основных принципах легирования сталей, о способах получения необходимой структуры и комплекса свойств методами термической обработки сталей различного назначения.

1. ДЕФОРМАЦИЯ, РАЗРУШЕНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

1.1. Общие положения

Механические свойства – одни из основных характеристик металлических материалов, применяемых в различных областях современной техники.

Все механические свойства определяются процессами деформации и разрушения в различных условиях нагружения, как при выполнении технологических операций обработки при изготовлении изделий, так и во время эксплуатации деталей машин и конструкций. Многообразие условий эксплуатации и обработки металлических материалов требует проведения большого числа разных механических испытаний для определения характеристик механических свойств. Прежде всего, механические испытания позволяют оценить *механическую прочность* материалов. Обычно под механической прочностью понимают способность материала сопротивляться деформации без разрушения. Величины, характеризующие сопротивление деформации или разрушению, саму деформацию и вязкость (энергоёмкость деформации и разрушения) называют *механическими свойствами*.

Под действием внешних напряжений происходит деформация, во время которой могут изменяться форма и размеры тела. Деформация, исчезающая после разгрузки (снятия напряжения), называется *упругой*, а сохраняющаяся после прекращения действия внешних напряжений – *остаточной*.

Под *пластической* деформацией понимают необратимые изменения формы и размеров тела, остающиеся после снятия нагрузки.

Фундаментальными характеристиками величины деформации, которые используются в теориях упругости и пластичности, являются относительные удлинения e и сдвиги g :

$$e = \int_{l_0}^{l_k} dl/l = \ln(l_k/l_0);$$
$$g = \operatorname{tg} \alpha,$$

где l_0 и l_k – начальная и конечная длина образца;

α – угол сдвига, рад.

Удлинение происходит под действием нормальных *растягивающих* напряжений S , а сдвиг – под действием *касательных* напряжений t . Напряжения являются удельной нагрузкой и в простейшем случае одноосного растяжения стержня определяются как отношение

$$S = P / F,$$

где S – растягивающее напряжение, МПа;

P – действующая нагрузка, Н;

F – площадь сечения, перпендикулярного продольной оси стержня, вдоль которого действует нагрузка, мм².

Нормальным растягивающим напряжениям присписывается знак «+». Нормальным может быть также сжимающее напряжение, которое тоже обозначается S , но со знаком «-».

Вектор касательных напряжений, в отличие от нормальных, не направлен перпендикулярно сечению, в котором они рассчитываются, а лежит в плоскости этого сечения. Именно под действием касательных напряжений происходит скольжение дислокаций, т.е. идет пластическая деформация.

1.2. Упругая деформация

Поведение металлов при упругой деформации описывается законом Гука, который определяет прямую пропорциональность между напряжением и упругой деформацией. На рис. 1.1 показаны упругие участки кривых напряжение – деформация при одноосном растяжении и кручении (сдвиге).

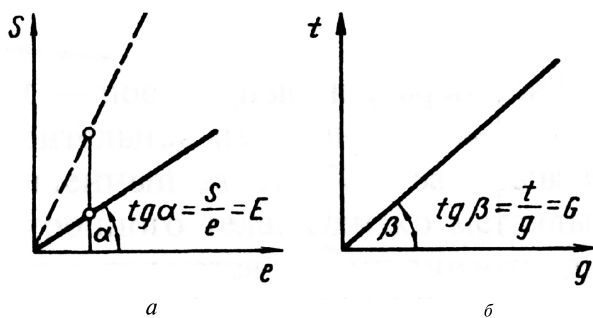


Рис. 1.1. Участки упругой деформации на кривых «напряжение – деформация» при одноосном растяжении (а) и кручении (б)

Наклон каждой из этих кривых, т.е. коэффициент пропорциональности, связывающий напряжение и деформацию, характеризует *модули упругости*:

$$E = S / e;$$

$$G = t / g.$$

Модуль E , определяемый при растяжении, называется модулем Юнга (модуль нормальной упругости), модуль G – модулем сдвига (касательной упругости). Модули упругости определяют жесткость материала, т.е. интенсивность увеличения напряжения при упругой деформации.

Механизм упругой деформации металлов заключается в обратимых относительно малых смещениях атомов из положения равновесия в кристаллической решетке. Чем больше величина смещения каждого атома, тем больше упругая макродеформация всего образца. Величина упругой деформации в металлах не может быть большой (относительное удлинение в упругой области обычно меньше 0,1 %), так как атомы в кристаллической решетке способны упруго смещаться лишь на небольшую долю межатомного расстояния. Физический смысл модулей упругости состоит в том, что они характеризуют сопротивляемость металлов упругой деформации, т.е. смещению атомов из положений равновесия в решетке.

Модули упругости являются константами для каждого материала и относительно мало изменяются под влиянием внешних факторов. С повышением температуры от 0 К до температуры плавления модули упругости чистых металлов и большинства сплавов снижаются в 2–2,5 раза. Зависимость эта не линейна – темп снижения модулей по мере приближения к солидусу увеличивается.

Модули упругости металлов – структурно малочувствительные свойства. Например, размер зерна в поликристалле на них почти не влияет, а сильная холодная деформация лишь немного (на ~1 %) снижает модули, что связано с влиянием остаточных микронапряжений, возникающих при наклепе. При формировании текстуры модули упругости могут существенно меняться из-за увеличивающейся анизотропии деформированного металла.

При легировании металлов элементами, образующими твердые растворы, модули упругости изменяются по закону, близкому к линейному, причем могут и увеличиваться, и уменьшаться.

1.3. Пластическая деформация и деформационное упрочнение

Пластическая деформация является результатом необратимого смещения атомов. В кристаллах эти смещения атомов в большинстве случаев происходят путем движения дислокаций, что является основным атомным механизмом пластической деформации. Движение дислокаций может вызывать макропластическую деформацию образца путем *скольжения* либо *двойникования*. В результате такого движения дислокаций происходит сдвиг одних отдельных частей кристалла относительно других (скольжение), или сдвиг и поворот атомных рядов в отдельных участках образца под некоторым углом к направлению сдвига (двойникование).

Эти два способа формоизменения можно рассматривать как механизмы пластической деформации.

Микро- и макрокартины пластической деформации скольжением и двойникованием существенно различаются и их анализируют отдельно.

В большинстве случаев металлы и сплавы деформируются путем скольжения. Двойникование обычно наблюдается в металлах и сплавах с ОЦК- и ГП-решетками.

1.3.1. Пластическая деформация металлов скольжением

Классическая схема деформации скольжением при растяжении и системы скольжения в металлах и сплавах с разными кристаллическими решетками показаны на рис. 1.2.

В элементарном виде механизм сдвига одной части кристалла относительно другой можно представить как результат пробега через него дислокации, например краевой, с длиной, равной ширине кристалла. Чем больше количество движущихся дислокаций и длиннее суммарный путь их перемещений, тем больше величина макропластической деформации:

$$g = \rho bl,$$

где g – относительный сдвиг, характеризующий величину пластической деформации;

ρ – плотность дислокаций;

b – усредненный вектор Бюргерсадвигающихся дислокаций;

l – средняя длина их перемещения.

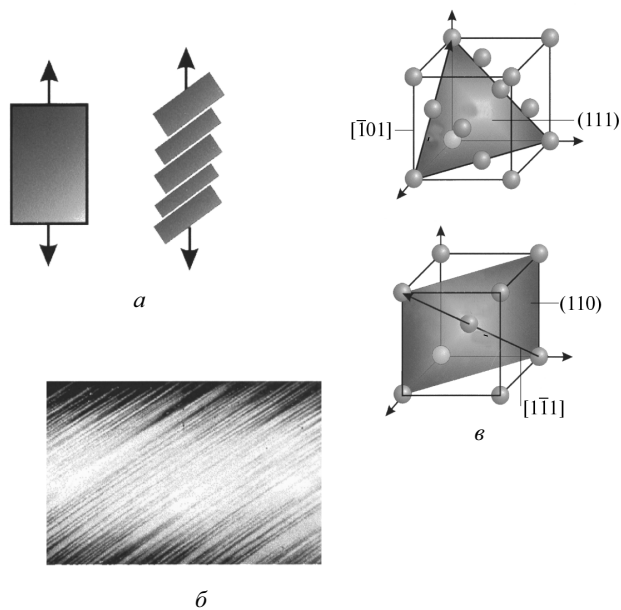


Рис. 1.2. Деформация скольжением: *а* – схема деформации при растяжении; *б* – полосы скольжения в деформированном Al; в – плоскости и направления скольжения: сверху – решетка ГЦК (γ -Fe, Cu, Al, Ni); плоскости скольжения – $\{111\}$; направления скольжения – $\langle 110 \rangle$; внизу – решетка ОЦК (α -Fe, Cr, W); плоскости скольжения – $\{110\}, \{112\}, \{123\}$; направления скольжения – $\langle 111 \rangle$

В реальных металлах и сплавах еще до начала деформации имеется много дислокаций разных типов. Плотность дислокаций в отожженных металлах и сплавах $\rho = 10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$. Под действием приложенных напряжений начинают работать различные их источники, порождающие новые дислокации. Движущиеся дислокации могут выходить на поверхность образца и могут взаимодействовать внутри него друг с другом: вступают в реакции, тормозятся, аннигилируют, образуют сплетения и т.д. Реальная картина пластической деформации металлических материалов определяется структурой, составом материала и условиями его деформации.

Линии скольжения (см. рис. 1.2) – это ступеньки, образующиеся на поверхности в результате выхода дислокаций. Анализируя расположение линий скольжения, расстояние между ними, их высоту, можно составить не только качественное, но и количественное представление

о картине и величине пластической деформации. По направлению линий скольжения можно определить плоскости и направления скольжения, зная кристаллографическую ориентировку анализируемой поверхности образца.

Скольжение и сдвиги в кристаллах при низкотемпературной деформации идут вдоль определенных для каждого типа решетки кристаллографических плоскостей и направлений. Направление скольжения всегда лежит в своей плоскости скольжения. Совокупность направлений и плоскости скольжения называется *системой скольжения*. В металлах может действовать одна или одновременно несколько систем скольжения.

Направления и плоскости преимущественного скольжения являются наиболее плотноупакованными в каждой решетке.

1.3.2. Пластическая деформация металлов двойникованием

Деформация двойникованием идет в тех случаях, когда скольжение по тем или иным причинам затруднено. Наиболее часто двойникование наблюдается при низких температурах и высоких скоростях деформации, особенно в металлах с ГП- и ОЦК-решетками. В чистых ГЦК-металлах деформация двойникованием имеет место только при отрицательных температурах и высоких скоростях деформации.

При двойниковании происходит сдвиг одной части кристалла относительно другой вдоль определенной плоскости и направления двойникования (рис. 1.3).

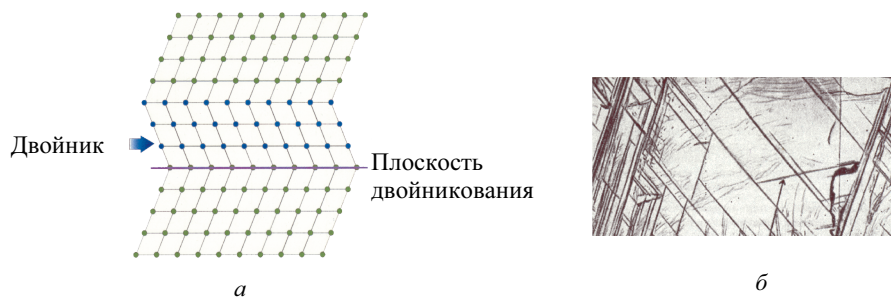


Рис. 1.3. Деформация двойникованием: *а* – схема деформации; *б* – двойники деформации в кристалле цинка

Плоскость двойниковогоания – обычно кристаллографическая плоскость с малыми индексами, которая является плоскостью симметрии двойниковогоого образования относительно исходного кристалла.

Наиболее часто двойниковоание происходит в ГП-металлах, где число систем скольжения минимально, особенно при отношении $c/a \geq 1,633$. В неблагоприятно ориентированных для базисного скольжения монокристаллах и многих зернах поликристаллов приведенные напряжения сдвига, достаточные для двойниковогоания, оказываются ниже тех напряжений, которые необходимы для небазисного скольжения.

Часто началу двойниковогоания в ГП-металлах предшествует скольжение. Результирующее повышение плотности дислокаций создает концентрацию напряжений в микрообъемах, достаточную для зарождения двойников. Иногда, наоборот, при неблагоприятной ориентировке ГП-кристалла для базисного скольжения его деформация начинается с двойниковогоания. При этом ориентировка базисных плоскостей может измениться таким образом, что в дальнейшем будет идти деформация скольжением.

Двойниковоание по одной плоскости не может обеспечить значительной пластической деформации металла. В результате ГП-металлы с отношением $c/a \geq 1,633$ (Cd, Zn, Mg), где действует в основном один тип плоскостей двойниковогоания $\{1012\}$, не могут сильно деформироваться только за счет двойниковогоания. С увеличением числа действующих плоскостей и направлений двойниковогоания при переходе к ГП-металлам с низким отношением c/a (Ti, Zr) величина пластической деформации двойниковоанием возрастает.

При металлографическом исследовании в световом и электронном микроскопах каждый двойник деформации выявляется в виде двух параллельных полос (следов его пересечения с поверхностью излома, шлифа или фольги) (см. рис. 1.3, б).

В поликристалле двойники никогда не переходят из одного зерна в другое. Обычно они заканчиваются внутри зерна, а если доходят до границы, то возникающие в месте этого стыка напряжения могут способствовать появлению двойника в соседнем зерне, где он будет иметь иную ориентировку.

1.3.3. Деформационное упрочнение

Низкотемпературная пластическая деформация (при температурах $T_d < 0,2...0,3 T_{пл}$) сопровождается повышением сопротивления материала образца деформации по мере увеличения степени деформации.

Здесь T_d – температура деформации, $T_{пл}$ – температура плавления. Это явление называется *деформационным упрочнением*. Упрочнение (повышение прочностных характеристик материала) после предварительной холодной деформации называется *наклепом*.

Деформационное упрочнение обусловлено торможением и размножением дислокаций. Чем труднее перемещаться дислокациям в материале, тем больше *коэффициент деформационного упрочнения* (производная напряжения по деформации), характеризующий наклон кривой деформации. В процессе испытания этот коэффициент меняется, и его изменения в конечном итоге определяют геометрию диаграммы деформации. Для строгого анализа закономерностей деформационного упрочнения необходимо пользоваться диаграммами деформации в координатах истинное напряжение (S или t)–деформация (e или g). Поскольку пластическая деформация скольжением в металлах осуществляется за счет движения дислокаций в определенных плоскостях под действием касательных, а не нормальных напряжений, более правильно строить кривые t – g .

Поликристалл принципиально отличается от монокристалла наличием в его структуре сетки высокоугловых границ. Если пренебречь другими возможными различиями (концентрацией примесей, количеством макродефектов, субструктурой), то поликристалл можно рассматривать как совокупность произвольно ориентированных монокристаллов (зерен), отделенных один от другого высокоугловыми границами. При растяжении такого поликристалла внутри каждого зерна вдали от границ картина на начальных стадиях пластической деформации в первом приближении должна быть такой же, какой она была бы, если это зерно деформировать отдельно. Из-за разной ориентации зерен деформация в них начинается не одновременно и развивается неоднородно.

В первую очередь скольжение идет в благоприятно ориентированных зернах, внутри которых имеется система скольжения, где действуют максимальные касательные напряжения. В этих зернах, если они имеют достаточно большие размеры, некоторое время может наблюдаться типичное легкое скольжение, сопровождающееся, в частности, появлением длинных тонких линий на их поверхности. Однако макроскопическое удлинение образца за счет легкого скольжения практически невозможно. Благоприятно ориентированных зерен обычно относительно мало и они разобщены. Для того чтобы деформировался весь образец, необходимо участие в деформации большинства зерен. Сле-

довательно, нужно обеспечить передачу деформации от одних зерен, относительно благоприятно ориентированных, к другим, ориентированным относительно внешней силы менее благоприятно.

Дислокации внутри благоприятно ориентированных зерен на начальных стадиях деформации скользят без серьезных помех на большие расстояния и многие из них доходят до границ зерен. Последние, как известно, являются эффективным барьером для дислокаций, которые тормозятся здесь, образуя скопления. Вокруг скоплений возникают поля упругих напряжений, которые действуют на границы и прилегающие к ним участки соседних зерен в дополнение к приложенным извне напряжениям. В этих условиях могут начать работать дислокационные источники на границах и в приграничных областях, несмотря на относительно неблагоприятную ориентировку систем скольжения генерируемых ими дислокаций. Так происходит *эстафетная передача деформации* от зерна к зерну в поликристалле. Плотность дислокаций после больших деформаций ($\epsilon > 50\%$) повышается до $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

После того как деформация охватит все кристаллиты, внутри каждого из них можно наблюдать картины распределения линий скольжения и дислокаций.

Развитие текстуры деформации в поликристаллах приводит к изменению ориентировки внутри каждого зерна и вытягиванию всех их вдоль направления растяжения. При этом направление преимущественного скольжения (например, в ГЦК-решетке $\langle 110 \rangle$) во всех зернах примерно параллельно оси растяжения.

Кривые деформационного упрочнения поликристаллов с различными решетками качественно одинаковы. При низких температурах после участка упругой деформации наблюдается упрочнение, которое можно приближенно описать параболической функцией

$$S = S_0 + Ae^n,$$

где S – истинное напряжение;

S_0 – предел текучести;

A – константа;

e – истинная деформация;

n – показатель степени деформационного упрочнения, $0 < n < 1$.

Пластическая деформация и упрочнение сильно зависят от типа решетки, ориентировки кристалла и способа деформации (скольжением или двойникованием).

Процессы деформации и упрочнения также зависят от ряда других важнейших внешних и внутренних факторов (схема напряженного состояния, температура и скорость деформации, а также химический и фазовый состав и структура сплавов).

1.4. Разрушение

Способность материалов деформироваться и выдерживать большие нагрузки без разрушения является важнейшим качеством, определяющим их технологичность и эксплуатационные свойства. В большинстве случаев деформация при достижении достаточно высоких напряжений заканчивается разрушением. Процесс разрушения начинается с образования трещин субмикроскопических размеров и заканчивается макроскопическим разделением образца или конструкции на отдельные части. Ряд важнейших механических свойств металлов и сплавов характеризуют их сопротивление разрушению, величину или работу деформации до разрушения.

1.4.1. Виды разрушения металлов

Существует три вида напряжений: сжимающие (отрицательные нормальные), растягивающие (положительные нормальные) и касательные. Разрушение всегда происходит под действием растягивающих или касательных напряжений. Сжимающие напряжения сами по себе не могут вызвать разрушения. В макроскопических теориях прочности различают два вида разрушения: *отрыв* в результате действия нормальных растягивающих напряжений и *срез* под действием касательных напряжений.

По внешнему виду разрушенных образцов можно определить вид разрушения (отрыв или срез), что в некоторых случаях имеет практическое значение.

По характерному механизму развития, скорости и энергоемкости процесса развития разрушения различают *хрупкое* и *вязкое* разрушение. Считается, что отрыв может произойти без предварительной макропластической деформации, в то время как разрушению путем среза такая деформация всегда предшествует. Поэтому отрыв часто соответствует *хрупкому*, а срез – *вязкому* (пластичному) разрушению.

Оба типа разрушения – вязкое и хрупкое – имеют две стадии: рождение трещины и ее распространение. Любому, в том числе хруп-

кому разрушению металлов и сплавов предшествует пластическая деформация, необходимая для зарождения трещины. По механизму зарождения трещин хрупкое и вязкое разрушение принципиально не различаются. Качественное различие между ними связано с энергоемкостью и скоростью распространения трещины. При хрупком разрушении эта скорость очень велика, она достигает 0,4–0,5 скорости распространения звука в материале образца. В случае же вязкого разрушения трещина распространяется в основном с относительно малой скоростью, соизмеримой со скоростью деформации образца.

При распространении (росте) трещины перед ее вершиной в некоторой зоне идет пластическая деформация. Размер этой пластической зоны определяется пределом текучести материала. Обычно в материалах с высокой прочностью зона пластической деформации в вершине трещины небольшая и разрушение развивается по хрупкому механизму. В материалах с низкой прочностью ее размер гораздо больше и разрушение развивается по вязкому механизму. Поэтому энергоемкость вязкого разрушения значительно больше, поскольку при развитии вязкой трещины пластическая деформация идет не только вблизи ее вершины, но и по значительному объему детали или образца. В результате работа, необходимая для продвижения трещины, в данном случае значительно больше, чем при развитии хрупкой трещины, когда пластическая деформация локализована в узкой зоне у ее вершины. Деформация, предшествующая хрупкому разрушению, обычно намного меньше, чем при вязком разрушении.

Распространение трещины является наиболее важной стадией разрушения. Этот процесс, в основном, определяет сопротивление материала разрушению. Стадия распространения трещины тоже состоит из двух стадий – *докритического*, относительно медленного развития трещины, когда процесс разрушения еще можно контролировать, и *закритического* распространения трещины, когда окончательное разрушение становится очень быстрым, трудно управляемым и часто необратимым.

Такое подразделение второй стадии процесса разрушения на до- и закритическую подстадии имеет принципиальное значение для инженерной практики. Если до недавнего времени конструкция с любой трещиной считалась непригодной для эксплуатации, то теперь при конструировании основным стал принцип «безопасного поврежде-