

ВВЕДЕНИЕ

Реализация технических способностей человека началась с металлов, которые по своему положению в электрохимическом ряду напряжений могут классифицироваться как благородные. Древнейшими металлами во временной последовательности являются золото и серебро, за ними следует медь. Благодаря добавлению относительно благородного, легко получаемого олова к меди появилась ранняя техника плавания, с помощью которой удалось получить бронзу, имеющую более низкую температуру плавления, чем чистая медь. Это значительно облегчило обработку данного сплава по сравнению с чистой медью, прежде всего с помощью литья иковки.

Положение металлов в электрохимическом ряду напряжений, пожалуй, оказало большее влияние на развитие человечества, чем многие другие факторы. Целые исторические эпохи характеризуются применявшимися материалами — камнем, бронзой, железом. Железо и в дальнейшем цинк требовали более высокоразвитых металлургических способов и появились позднее; наконец, были освоены алюминий и магний; произошло это лишь в XIX столетии.

Ниже приведено соотношение между электрохимическим рядом напряжений и началом применения некоторых металлов.

	Au^{3+}	Ag^+	Cu^{2+}	Sn^{2+}	Fe^{2+}	Zn^{2+}	Al^{3+}	Mg^{2+}
Электродный потенциал	+1,50	+0,80	+0,34	-0,14	-0,44	-0,76	-1,62	-2,34
Год начала применения	≈ 4000 до н. э.	≈ 4000 до н. э.	≈ 4000 до н. э.	≈ 2000 до н. э.	≈ 1000 до н. э.	≈ 1500 н. э.	1850 н. э.	1850 н. э.

Одновременно в ранние исторические эпохи были развиты технические приемы по регулированию свойств материала, причем на передний план выдвигалось стремление к увеличению прочности. Отметим следующие вехи и в истории обработки материалов.

Упрочнение посредством деформации в холодном состоянии	≈ 4000 г. до н. э.
--	--------------------

Закаливание стали	≈ 1000 г. до н. э.
Дисперсионное твердение (старение) алюминия	1905 г. н. э.
Коррозионно-стойкая сталь	1930 г. н. э.
Суперсплавы	1950 г. н. э.

Обработка материалов в давние времена была исключительно результатом чистого опыта и часто проходила под знаком мистики (интуиции) по строго охраняемым рецептам. Так, «термообработка» мечей в органических веществах, например в навозе или в навозной жиже, создавала эффект, который мы сегодня могли бы классифицировать как «нитроцементацию».

Только научные разработки Нового времени и появление соответствующих методов исследования с использованием новейших данных создали предпосылки для дальнейшего развития материала в строго научной систематике. Развитие материалов с самых давних времен характеризовалось оптимизацией способов его обработки, особенно благодаря целенаправленному приспособлению материалов к очень высоким и разнообразным требованиям, как сегодня это происходит в производстве. Разработки материалов последних лет распространяются от массового производства, например, микролегированных сталей, высококачественных плакированных материалов, материалов с направленной кристаллизацией, с монокристаллической структурой, композитных конструкций до материалов микроэлектроники и точной механики, а также металлов, обладающих памятью.

Связь между уровнем технологии обработки материала и создаваемой техникой в настоящее время стала еще более тесной. Оптимальный материал для детали или установки стал составной частью конструкции. Таким образом, необходимо в полной мере обладать возможностями для приспособления и управления материалом, чтобы прийти к техническим решениям, соответствующим заданным требованиям.

Тесная связь между техническим развитием и наличием подходящих материалов иллюстрируется всей историей техники с начала промышленного века. На переднем плане были материалы, особенно на основе железа, занимающие и сегодня бесспорно ведущее место среди конструкционных материалов (90% всех получаемых и промышленно используемых металлов).

Первые парогенераторы, сконструированные Джеймсом Уаттом, состояли в основном из листового проката пудлингового железа. Эти первые парогенераторы должны были склепываться из многих отдельных прокатанных полос. Качество материалов и исполнение приводили к возникновению многих аварий, связанных со взрывами котлов. Лишь появ-

ление литой стали и мощных прокатных станов сделало возможным изготовление достаточно надежных парогенераторов.

Развивающаяся техника требовала для своей реализации материалов с более высокой прочностью для того, чтобы можно было изготавливать мощные установки, например паровые турбины, тепловые двигатели и, наконец, газовые турбины.

Поставленные требования выполнялись с помощью разработки сплавов и благодаря соответствующей термообработке и закалке. Так, были разработаны стали с улучшенной структурой благодаря легированию марганцем, кремнием, ванадием, никелем и молибденом. Конструкционные детали и поверхности, подвергавшиеся динамической нагрузке и износу, потребовали высокой твердости поверхности при вязкой сердцевине, что было достигнуто с помощью специальных сталей, которые пригодны для закалки на мартенсит, цементации и азотирования. Высокой термостойкости стали можно было добиться, в частности, благодаря добавлению карбидообразователей, например хрома, ванадия, молибдена, вольфрама, ниобия и титана.

В связи с развитием воздухоплавания и необходимостью создавать мощные самолеты появилась потребность в легких высокопрочных конструкционных материалах. Существенной предпосылкой к этому было открытие Вильма (1909), который смог достигнуть увеличения твердости алюминия более чем на 500% благодаря незначительным добавкам магния и меди и соответствующей термообработке. Полученный им так называемый дюралюминий стал важным фактором для развития самолетостроения.

Развитие материаловедения во многом определяет прогресс современного машиностроения. Создание новых материалов и разработка передовых технологий позволяют не только уменьшить массу машин, приборов и конструкций, но дают возможность создать новые, не имеющие аналогов механизмы. Разработка материалов стимулирует появление новых технических идей и проектов, с прогрессом материаловедения связано развитие традиционных отраслей промышленности: машиностроения, химии, строительства, транспорта, судостроения. Научно-техническая революция и появление таких новых отраслей техники, как ракетостроение, энергетика, управление термоядерными процессами, освоение космоса, физика высоких энергий, также обязаны прогрессу материаловедения. Известно, что революционную роль в электронике и радиотехнике сыграли разработанные в последние годы сверхпроводники и аморфные сплавы, а в авиации и ракетостроении — композиционные материалы.

Прогресс в области теоретического материаловедения опирается на соответствующие разделы химии, физики твердого тела и механики ма-

териалов. Однако следует отметить, что наука о материалах и рациональных областях их применения в основном развивается экспериментальным путем. Поэтому развитие современного материаловедения в значительной степени обусловлено разработкой новых методов исследования строения и физико-механических свойств материалов.

Совершенствование газовых турбин и легко создаваемая и быстро вращающаяся турбина в качестве двигателя для самолетов еще раз демонстрируют тесную связь между возможностью технической реализации и наличием материалов. Реактивные двигатели для самолетов строились уже в конце 30-х — начале 40-х годов XX века в различных исполнениях, однако чаще всего они не имели достаточной мощности или были пригодны лишь для очень кратковременного применения, так как материалов с высокой жаропрочностью, необходимой для экономически оправданной длительной эксплуатации, в тот момент не существовало (рис. 1).

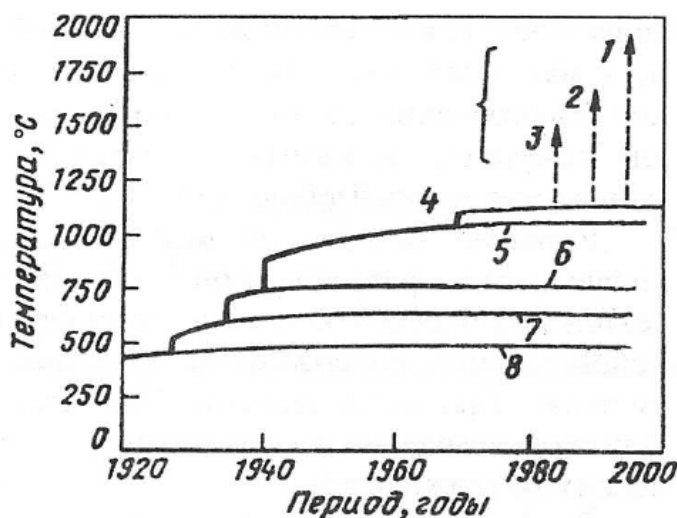


Рис. 1

Обзор развития термостойких материалов (1–3 — ожидаемое потенциальное развитие):

1 — керамика; 2 — армированный бетон; 3 — металл; 4 — дисперсионно закаленные и направленно затвердевшие суперсплавы; 5 — суперсплавы; 6 — хромоникелевые сплавы; 7 — хромистые стали; 8 — стали, бронза, легированная латунь, сплавы алюминия, чугуны.

В большинстве технических разработок, направленных на экономию энергии, проявляется борьба с двумя вторыми законами: вторым законом

Ньютона и вторым законом термодинамики. С первым сталкиваются при рассмотрении массы конструкции, а со вторым — в стремлении достичь наиболее высоких температур.

Известно, что максимальная доля энергии, которую можно превратить в работу, т. е. КПД любого термодинамического процесса, не может быть больше теоретического предела, определяемого вторым законом термодинамики:

$$\text{КПД} = 1 - T_2/T_1,$$

где T_1 , T_2 — температуры соответственно на входе и выходе энергетического преобразователя устройства.

Если температура пара на входе в турбину составляет $T_1 = 810$ К, а на выходе температура воды $T_2 = 370$ К, то $\text{КПД} = 1 - T_2/T_1 = 0,53$. Реальный КПД большинства промышленных устройств не превышает 0,35.

Газотурбинные лопасти выполнялись вначале из высоколегированных хромоникелемолибденовых материалов, которые, кроме того, содержали тантал (ниобий), кремний и марганец. С увеличением содержания никеля возникли так называемые суперсплавы, т. е. материалы на никелевой основе. Они обладают сегодня, при использовании знаний о механизмах дисперсионного твердения, термостойкостью при постоянной эксплуатации почти до 1000°C . Требующийся коэффициент полезного действия и необходимость повышения мощности способствуют появлению направленно затвердевших сплавов и композиционных лопастей в сочетании с прогрессивными технологиями нанесения покрытий.

Говоря о развитии и исследовании материала, нельзя не включить в рассмотрение область химических установок и техники для обеспечения процессов. Здесь безопасное превращение химических реакций в мощные технологические процессы стало возможным только благодаря изготовлению сталей, устойчивых к давлению водорода, и сталей, обладающих максимальной надежностью и сопротивлением коррозии. С техникой изготовления тесно связано развитие инструментальных материалов для режущих, вытяжных и пробивных инструментов, а также инструментов для горячей обработки.

Развитие материалов включает наряду с развитием специальных сплавов также развитие и оптимизацию техники плавки и литья, а также технику процессовковки и термообработки. Важным требованием для использования возможностей материала является высокая степень его чистоты. Так, из-за недостаточной степени чистоты материала его фактическое поведение в технологии производства может быть ниже технических возможностей.

Особые требования выдвигаются вследствие увеличения размеров в тяжелом машиностроении. Так, для валов в строительстве турбогенераторов необходимо иметь в распоряжении слитки массой 400 и 500 т, которые обладали бы максимальной равномерностью по качеству и отсутствием дефектов.

Теоретический идеальный материал должен обладать комплексом свойств. Он должен быть бесконечно прочным и жестким; невесомым; устойчивым против ползучести; свариваемым; абсолютно коррозионно-стойким, а также обладать рядом других полезных свойств, потребность в которых иногда возникает, например радиационной стойкостью.

Естественно, что таких материалов нет и мечту инженера о теоретически идеальном материале осуществить невозможно. Поэтому задачей конструктора является выбор материала с компромиссным набором свойств, а специалист в области материаловедения должен получить такую структуру материала, которая обеспечит подобный компромисс.

Для обоснованного выбора конструктор должен иметь отчетливое представление о возможностях, которыми располагают современные материалы и технологии, а также о перспективах использования новых материалов в машиностроении ближайшего будущего.

Из многообразия свойств материалов основное внимание обычно уделяют прочности и жесткости, вязкости и пластичности, жаропрочности и хладостойкости, коррозионной стойкости, снижению массы конструкции и экономичности. Чтобы улучшить свойства выбранных материалов, необходимо знать методы, позволяющие управлять структурой материала.

РАЗРУШЕНИЕ И КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Различают физические, химические, технологические и механические свойства материалов.

Физические свойства определяют поведение материалов в тепловых, гравитационных, электромагнитных и радиационных полях. К физическим свойствам относятся плотность, теплоемкость, температура плавления, термическое расширение, магнитные характеристики, теплопроводность, электропроводимость.

Под химическими свойствами понимают способность материалов вступать в химическое взаимодействие с другими веществами, сопротивляемость окислению, проникновению газов и химически активных веществ. Характерным примером химического взаимодействия металла и среды является коррозия.

Технологические свойства металлов и сплавов характеризуют их способность подвергаться горячей и холодной обработке, в том числе при выплавке, горячем и холодном деформировании, обработке резанием, термической обработке и особенно сварке. При рассмотрении свойств отдельных видов материалов их технологичности будет уделено соответствующее внимание.

Целесообразность применения тех или иных материалов определяется не только их свойствами, но и их стоимостью.

При конструировании изделий в первую очередь руководствуются механическими свойствами материалов. Механические свойства материалов характеризуют их способность сопротивляться деформированию и разрушению под воздействием различного рода нагрузок. Механические нагрузки могут быть статическими, динамическими и циклическими. Кроме того, материалы могут подвергаться деформации и разрушению как при разных температурах, так и в различных, в том числе агрессивных, средах.

1.1. УПРУГАЯ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Деформацией называется изменение форм и размеров тела под действием напряжений. Деформация, возникающая при сравнительно небольших напряжениях и исчезающая после снятия нагрузки, называется упругой, а сохраняющаяся — остаточной или пластической. При увеличении напряжений деформация может заканчиваться разрушением.

На диаграмме растяжения (рис. 1.1) упругая деформация характеризуется линией OA . Выше точки A нарушается пропорциональность между напряжением и деформацией. Рост напряжения приводит не только к упругой, но и к остаточной пластической деформации.

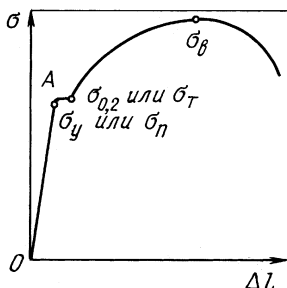


Рис. 1.1. Диаграмма растяжения

Упругая и пластическая деформации в своей физической основе принципиально отличаются одна от другой. При упругой деформации происходит обратимое смещение атомов из положений равновесия в кристаллической решетке. Упругая деформация не вызывает заметных остаточных изменений в структуре и свойствах металла. После снятия нагрузки сместившиеся атомы под действием сил притяжения (при растяжении) или отталкивания (при сжатии) возвращаются в исходное равновесное положение, а кристаллы приобретают первоначальную форму и размеры. Упругие свойства материалов определяются силами межатомного взаимодействия.

В основе пластической деформации лежит необратимое перемещение одних частей кристалла относительно других. После снятия нагрузки исчезает лишь упругая составляющая деформации. Пластичность, т. е. способность металлов перед разрушением претерпевать значительную пластическую деформацию, является одним из важнейших свойств металлов. Благодаря пластичности осуществляется обработка металлов давлением. Пластичность позволяет перераспределять локальные напряжения равномерно по всему объему металла, что уменьшает опасность разрушения.

Для металлов характерно большее сопротивление растяжению или сжатию, чем сдвигу. Поэтому процесс пластической деформации обычно

представляет собой процесс скольжения одной части кристалла относительно другой по кристаллографической плоскости или плоскостям скольжения с более плотной упаковкой атомов, где сопротивление сдвигу наименьшее. Скольжение осуществляется в результате перемещения в кристалле дислокаций. В результате скольжения кристаллическое строение перемещающихся частей не меняется (рис. 1.2).

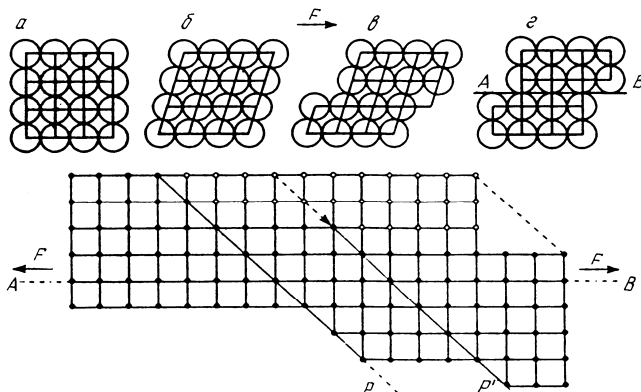


Рис. 1.2. Схема пластической деформации скольжением:

a — исходное состояние; *б* — упругодеформированное состояние; *в* — упруго- и пластически деформированное состояние; *г* — состояние после пластической (остаточной) деформации по плоскости *AB*; *F* — усилие.

Другим механизмом пластической деформации является двойникование. Как и скольжение, двойникование осуществляется за счет сдвига, однако в этом случае происходит сдвиг части кристалла в положение, соответствующее зеркальному отображению несдвинутой части (рис. 1.3). Двойникование, подобно скольжению, сопровождается прохождением дислокаций сквозь кристалл. При деформации двойникованием напряжение сдвига выше, чем при скольжении. Двойники обычно возникают тогда, когда скольжение по тем или иным причинам затруднено. Деформация двойникованием обычно наблюдается при низких температурах и высоких скоростях приложения нагрузки, так как в этих случаях для скольжения необходимо высокое напряжение сдвига. Двойники более характерны для металлов с ГП решеткой (Ti, Mg, Zn).

В соответствии с дислокационной концепцией, процессы скольжения и двойникования осуществляются не одновременным сдвигом одной атомной плоскости относительно другой, а последовательным перемещением дислокаций в плоскости сдвига. Благодаря тому, что для перемещения дислокаций требуются значительно меньшие усилия, чем для жесткого смещения атомных плоскостей, фактическое напряжение сдвига значительно меньше теоретического.

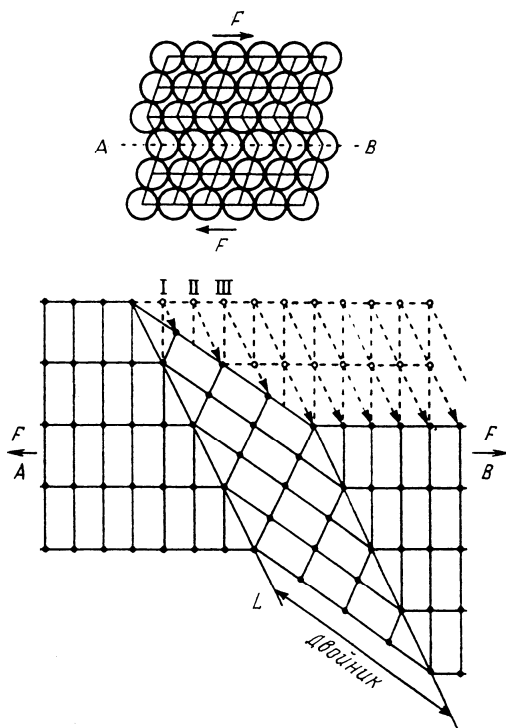


Рис. 1.3. Пластическая деформация двойникованием:
 F — усилие; AB — плоскость перемещения.

Величина напряжения, необходимого для осуществления пластической деформации, зависит от скорости деформирования и температуры. С увеличением скорости деформирования достижение заданной деформации требует больших напряжений, а при повышении температуры значение необходимых напряжений снижается. Таким образом, пластическая деформация является термически активируемым процессом. При понижении температуры предел текучести большинства металлов растет. Металлы с ГЦК решеткой имеют значительно меньшую зависимость предела текучести от температуры, чем металлы с другими типами решеток.

1.2. ХРУПКОЕ И ВЯЗКОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Заключительная стадия деформирования материалов — стадия разрушения — стала объектом исследования сравнительно недавно, так как раньше считали, что после появления трещин в материале изделие нельзя

использовать. Разрушение рассматривалось как заключительная мгновенная стадия нагружения, которая не может быть остановлена. В настоящее время выявлено, что стадия разрушения с момента появления повреждения может составлять до 90% долговечности конструкции.

Толчком к систематическому изучению механики разрушения явились участвовавшие случаи катастрофических аварий судов, мостов, резервуаров, летательных аппаратов и других конструкций, в свою очередь, обусловленные применением высокопрочных материалов и усложнением условий их работы.

Разрушение твердого тела представляет собой процесс разделения его на части под действием нагрузки, который также может сопровождаться термическими, радиационными, коррозионными и другими воздействиями. На атомном уровне разрушение представляет собой разрыв межатомных связей с образованием новых поверхностей. Если разрыв межатомных связей происходит перпендикулярно плоскости разрушения, то происходит разрушение сколом или отрывом. Если разрыв связей идет под действием силы, приложенной параллельно плоскости разрушения, то происходит разрушение сдвигом или скольжением. В металлах может иметь место и тот и другой вид разрушения, что определяется главным образом их кристаллической структурой. Кроме того, характер разрушения зависит от температуры, скорости деформации, напряженного состояния, чистоты металла и т. д.

В зависимости от степени пластической деформации перед разрушением различают два основных вида разрушений: хрупкое и вязкое. При вязком разрушении металл претерпевает перед разрушением не только упругую, но и значительную пластическую деформацию. При отсутствии пластической деформации или при ее незначительном развитии происходит хрупкое разрушение.

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва или скола, когда плоскость разрушения перпендикулярна нормальным напряжениям (рис. 1.4).

Под действием нормальных напряжений происходит упругая деформация кристаллической решетки, а после достижения предельной степени ее искажения происходит последовательный разрыв межатомных связей с отрывом одной атомной плоскости от другой, т. е. разрушение металла. Разрушение начинается от какого-либо дефекта, вблизи которого развивается концентрация напряжений, превосходящих теоретическую прочность металла. Концентрация напряжений K пропорциональна остроте дефекта и его длине: $K = 2\sqrt{l/r}$, где l — длина дефекта; r — радиус закругления в его вершине. Концентрации напряжений способствует образованию как внутренних, так и наружных дефектов — надрезов различной остроты и длины (рис. 1.5).

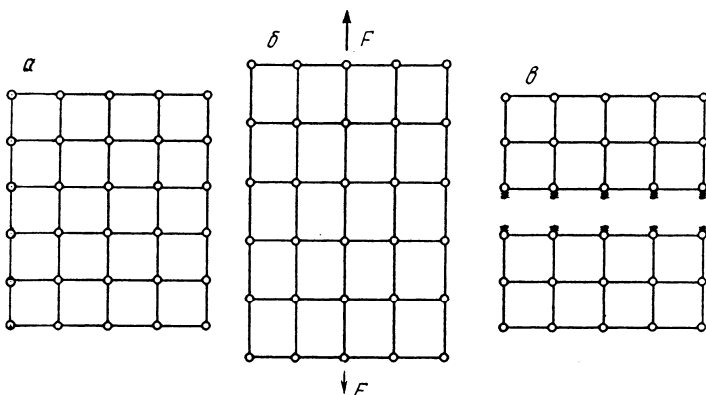


Рис. 1.4. Схема разрушения путем отрыва:

a — исходное состояние; b — упругая деформация; c — хрупкое разрушение (отрыв).

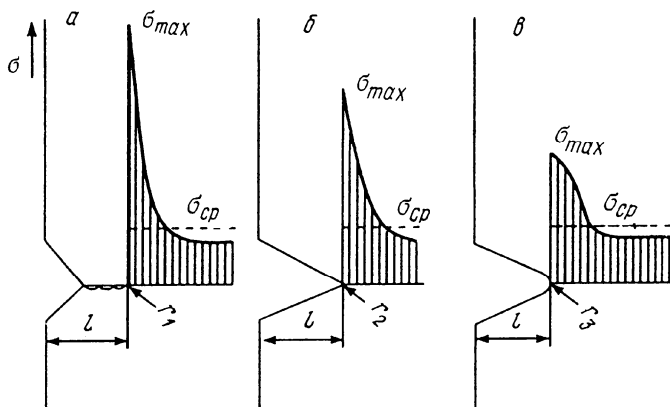


Рис. 1.5. Концентрация напряжений σ_{max} в устье дефекта:

a — трещина; b — острый надрез; c — закругленный надрез; $r_1 < r_2 < r_3$;
 σ_{cp} — средний уровень напряжений.

У достаточно пластичных металлов, характеризующихся релаксацией напряжений, местной концентрации напряжений вблизи несплошностей оказывается недостаточно и развитие трещин скола не происходит.

Вязкое разрушение происходит путем сдвига под действием касательных напряжений. Плоскость скольжения расположена под углом 45° к направлению главных нормальных напряжений.

Чисто сдвиговое вязкое разрушение характерно для таких аморфных материалов, как глина; чисто хрупкое разрушение свойственно идеально упругим материалам, например алмазу. Однако большинству реальных

материалов одновременно присуще и вязкое, и хрупкое разрушение, а разделение на отдельные виды разрушения условно проводится по преобладанию того или иного типа.

Характерными признаками вязкого и хрупкого разрушения являются энергоемкость, т. е. величина работы разрушения, вид трещины и поверхности излома и скорость распространения трещины.

При разрушении по хрупкому механизму затрачивается значительно меньшая работа на процесс самого разрушения, чем при вязком. Начавшееся хрупкое разрушение является самопроизвольным процессом. Оно происходит за счет высвобождения накопленной в системе упругой энергии, и поэтому для распространения трещины не требуется подвод энергии извне. При хрупком разрушении затрата энергии на образование новых поверхностей в результате раскрытия трещины меньше, чем освобождающаяся при этом накопленная упругая энергия. При вязком разрушении затрачивается значительно большая работа. Для развития вязкого разрушения необходим непрерывный внешний подвод энергии, расходуемой на пластическое деформирование металла впереди растущей трещины и преодоление возникающего при этом упрочнения. При этом работа, затрачиваемая на пластическую деформацию, значительно превышает работу собственно разрушения.

При хрупком разрушении магистральная разделяющая тело трещина имеет малый угол раскрытия (острая трещина), пластическая деформация вблизи поверхности разрушения почти полностью отсутствует (рис. 1.6). При вязком разрушении трещина имеет большой угол раскрытия (тупая трещина), поверхность разрушения характеризуется значительной степенью пластической деформации.

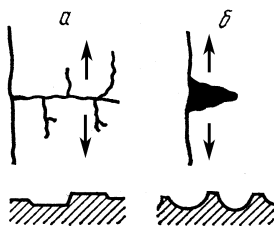


Рис. 1.6. Вид трещины и схема разрушения (сечение перпендикулярно поверхности излома):
 a — хрупкое; b — вязкое.

При низких температурах межзеренные границы обычно прочнее самих зерен, и поэтому у большинства металлов при низких температурах разрушение имеет транскристаллитный характер и проходит по зернам, а не по границам между ними. При повышенных температурах межзеренные границы обычно слабее зерен. Поэтому разрушение при повышенных температурах имеет, как правило, межкристаллитный характер (рис. 1.7).

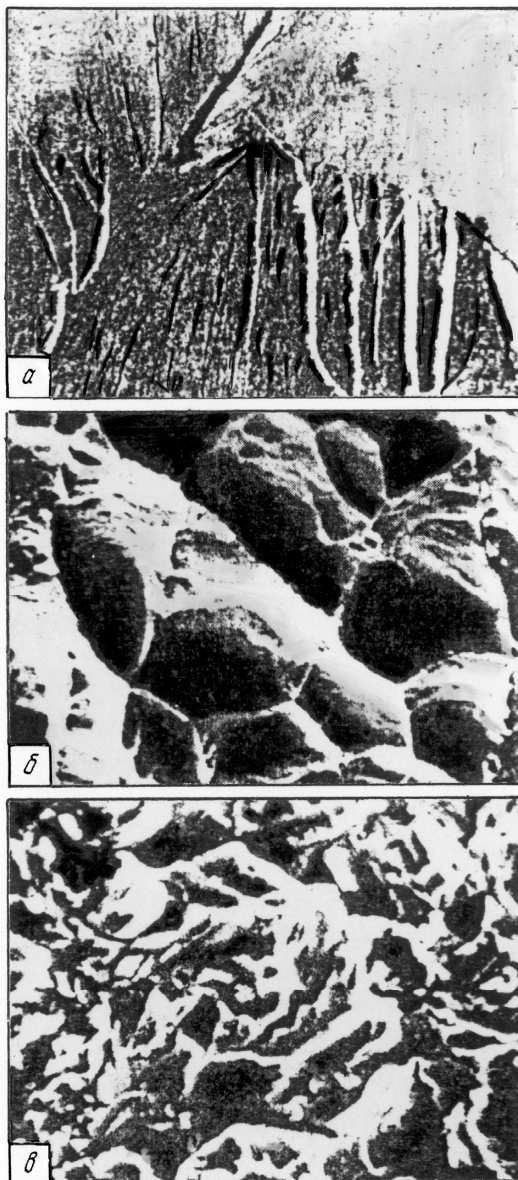


Рис. 1.7. Микроструктура изломов:
a — хрупкий ручьевый излом; *б* — вязкий чашечный излом CuNi20;
в — квазихрупкий излом литой стали при 77 К.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru