

Министерство образования РФ

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

Физический факультет

Кафедра физического материаловедения

КАРТЫ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ

Учебно-методическое пособие для студентов кафедры
физического материаловедения
4 – 6 года обучения

Нижегород, 2003 г.

1. Механизмы разрушения конструкционных материалов

В конструкционных материалах при различных температурно-силовых условиях реализуются определенные механизмы зарождения и роста пор и трещин. (табл. 1.3 и 1.4.) Множество факторов, влияющих на их зарождение, рост и распространение (табл. 1.1 и 1.2), делают определение превалирующего механизма разрушения довольно сложным. В работах Эшби предложена классификация механизмов разрушения конструкционных материалов хорошо работающая для чистого железа, ферритных и аустенитных сталей, тугоплавкой керамики, а также льда. Для этих материалов Эшби выделил семь основных механизмов разрушения: 1) раскальвание¹ (тип 1); 2) раскальвание (тип 2); 3) раскальвание (тип 3); 4) вязкое разрушение при низких температурах; 5) вязкое разрушение при средних температурах; 6) межзеренное разрушение при ползучести; 7) пластический разрыв.

Области действия этих механизмов показаны на картах механизмов разрушения (рис. 3-6).

1.1. Факторы, влияющие на характер разрушения

В процессе эксплуатации детали, узлы и конструкции в целом подвергаются различным воздействиям, приводящим к хрупкому или вязкому разрушению.

Характер разрушения определяется большим числом разнообразных факторов. Выделим три основные группы: (1) внешние условия, (2) дефекты структуры материала и (3) механизмы пластической деформации, обусловленные внешними условиями и структурным состоянием материала.

1.1.1. Внешние условия разрушения

К внешним условиям разрушения следует отнести (1) характер (способы) нагружения материала, (2) температуру T , (3) напряжение σ и (4) скорость деформации $\dot{\epsilon}$.

Таблица 1.1.

Связь характера нагружения и деформационных процессов

Характер нагружения	Деформационные процессы, приводящие к разрушению
Статическое ($\sigma(t) = \text{Const}$) – постоянная величина	Низкотемпературная ползучесть Высокотемпературная ползучесть Диффузионная ползучесть
Циклическое ($\sigma(t)$ – периодическая функция)	Малоцикловая усталость Многоцикловая усталость
Динамическое ($\sigma(t)$ – нарастающая функция)	Динамическая деформация

В таблице 1.1 дана классификация основных способов нагружения² материала, с точки зрения характера приложения напряжения σ во времени t .

¹ В литературе довольно широко распространён термин “скол”. Он представляется несколько неудачным, так как ассоциируется со сдвиговыми явлениями. Более правильный термин – “раскальвание” или “раскол” лучше отображает существо явления: расщепление (отрыв) по кристаллографической плоскости спайности.

² Далее будем рассматривать процессы разрушения протекающие только при статическом нагружении.

В таблице 1.2 указаны диапазоны изменения T , σ и $\dot{\epsilon}$, а также условные наименования различных областей изменения этих величин, в которых характер разрушения существенно различен.

Таблица 1.2
Диапазоны изменения параметров характеризующих температурно-силовые условия разрушения

Условия, в которых происходило разрушение	Диапазоны и их условные наименования
Температура (T)	Низкая ($T < 0,3T_{пл}^1$) Средняя ($0,3T_{пл} < T < 0,7T_{пл}$) Высокая ($T > 0,7T_{пл}$)
Напряжение (σ)	Низкое $\sigma < 10^{-4}G^2$ Среднее $10^{-4}G < \sigma < 10^{-2}G$ Высокое $\sigma > 10^{-2}G$
Скорость деформации ($\dot{\epsilon}$)	Низкая $\dot{\epsilon} > 10^{-4}c^{-1}$ Средняя $10^{-4}c^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^2c^{-1}$ Высокая $\dot{\epsilon} > 10^2c^{-1}$

1.1.2. Дефекты структуры

В таблице 1.3. приведена классификация основных дефектов структуры материала, принимаемых во внимание при идентифицировании механизмов разрушения и анализе фрактограмм, и дана их характеристика.

Таблица 1.3.

Характеристика дефектов структуры материала

Дефекты структуры	Параметры дефектов структуры
Исходные трещины	Размер (c). Объемная доля (f_c).
Стыки границ зерен	Размер зерен (d). Объемная доля стыков ($1/d^3$).
Частицы в объеме зерен	Размер (R_v). Объемная доля (f_v).
Частицы на границах зерен	Размер (R_b). Объемная доля (f_b).

1.1.3. Механизмы деформации

В таблице 1.4. приведены основные механизмы деформации и указаны значения внешних условий, при которых доминирует тот или иной механизм.

Таблица 1.4.

Механизмы деформации

Механизмы деформации	Напряжение (σ)	Температура (T)
Дислокационное скольжение Двойникование	Среднее, высокое	Низкая, средняя
Дислокационная (степенная) ползучесть	Среднее, высокое	Средняя
Диффузионная ползучесть	Низкое	Средняя, высокая
Динамическая рекристаллизация	Среднее	Высокая

¹ $T_{пл}$ – температура плавления.

² G – модуль сдвига

1.2. Механизмы зарождения и роста трещин

1.2.1. Материалы с исходными трещинами

В некоторых материалах трещины существуют изначально (исходные трещины). (В конструкционных материалах они связаны, как правило, с технологическими дефектами: волосовинами, закатами и т.д.) Поведение таких материалов зависит от величины внешних напряжений, температуры деформирования и размера (C) исходных трещин. Если внешнее (приложенное) напряжение σ превысит некоторый критический уровень σ^* , зависящий от размера трещины, то трещина может начать расти со скоростью звука (динамический рост трещины) и разрушить материал. В этом случае деформация и время до разрушения равны нулю, а условием разрушения является достижение внешним напряжением критического значения σ^* .

1.2.2. Материалы без исходных трещин

Большинство конструкционных материалов исходных трещин не содержит. Они образуются под действием локальных внутренних напряжений $\sigma_{вн}$, когда уровень этих напряжений превышает напряжение разрыва σ_p . Необходимый для разрушения высокий уровень локальных напряжений $\sigma_{вн}$ создают скопившиеся у препятствий (в первую очередь, у границ зерен или у дисперсных частиц) дислокационные скопления.

А. Низкие температуры

Если температуры деформации низки и в материале невозможно развитие accommodационных процессов, то единственным способом релаксации локальных внутренних напряжений становится образование микротрещины.

При низких температурах accommodационные процессы не могут привести к формированию в кончике трещины пластической зоны. Поэтому, зародившись, трещина остается "острой". (Радиус вершины r_0 острой трещины не превышает нескольких атомных расстояний.) В ее вершине локальные напряжения $\sigma_{вн}$ в десятки раз превышают приложенное напряжение σ ($\sigma_{вн} = \sigma \sqrt{C/r_0}$). При увеличении нагрузки такая трещина легко и быстро растёт. И как только ее размер превысит некий критический $C_{кр}$, процесс роста станет энергетически выгодным – начнется динамическое развитие трещины, приводящее к разрушению материала.

Деформация до разрушения в этом случае определяется деформацией, необходимой для формирования скопления дислокаций критической длины (мощности), создающего локальное внутреннее напряжение, равное разрушающему ($\sigma_{вн} \sim \sigma_p$), и деформацией, необходимой до подрастания трещины до критического размера. Суммарная деформация до разрушения, как правило, невелика и не превышает 1%. Время t_p до разрушения равно $t_p = \epsilon / \dot{\epsilon}$.

Б. Средние температуры

При средних температурах начинают действовать некоторые accommodационные процессы (например, поперечное дислокационное скольжение, а также процессы диффузионной accommodации). В этих условиях зарождение трещин несколько замедляется. Это связано с тем, что накопившиеся у препятствий дислокации приобретают способность покидать скопления, снижая уровень внутренних напряжений. В результате такой accommodационной подстройки, напряжение разрушения достигается в ходе более продолжительного деформирования. Кроме того, accommodационные процессы приводят к "загуплению" трещин – к формированию у их "кончиков" пластических зон. Такие трещины дорастают до критического размера гораздо медленнее, чем "острые". Рост таких трещин называется пластическим. Таким образом, деформация до разрушения определяется суммой дефор-

маций необходимых для зарождения трещин $\epsilon_{зар}$ и пластического роста $\epsilon_{рост}$ трещины. Время до разрушения может быть грубо оценено по формуле $t_p = \epsilon_{зар} / \alpha \dot{\epsilon} + \epsilon_{рост} / \beta \dot{\epsilon}$, где α и β – численные коэффициенты.

В. Высокие температуры

При высоких температурах зарождение трещин еще более затруднено, чем при средних температурах, вследствие высокой интенсивности диффузионных процессов. Деформация до начала зарождения трещины существенно зависит от параметров структуры материала и может достигать 10%. Зародившаяся трещина за счет поверхностной диффузии может быстро трансформироваться в пору. Поры могут расти либо диффузионно (при малых размерах), либо пластически (крупные поры). Разрушение образца в этих условиях происходит вследствие укрупнения и слияния пор.

В некоторых случаях из-за быстрого протекания процессов аккомодации зарождения пор вообще не происходит. Такой эффект наблюдается в чистых металлах, в которых отсутствуют крупные дисперсные частицы или когда эти частицы при высоких температурах растворяются.

В таблицах 1.5–1.8 приведена классификация различных типов дефектов, зарождающихся при различных температурно-силовых условиях, наиболее вероятные места зарождения, доминирующий механизм их роста и наиболее вероятные пути распространения разрушения.

Таблица 1.5.

Зарождение дефектов при различных температурно-силовых условиях

Дефекты	Низкие температуры		Высокие температуры	
	Низкие напряжения	Высокие напряжения	Низкие напряжения	Высокие напряжения
“Острые” трещины	–	+	–	–
Пластические трещины	+	–	–	+
Поры	–	–	+	–

Таблица 1.6.

Места зарождения трещин и пор

Поры и трещины зарождаются	При низких температурах	При высоких температурах
	в границах и стыках зерен	–
на частицах, расположенных на границах зерен	–	+
на частицах, расположенных в объеме зерен	+	+

Таблица 1.7.

Доминирующие механизмы роста пор и трещин при различных температурно-силовых условиях

Доминирующие механизмы роста	Низкие температуры		Высокие температуры	
	Низкие напряжения	Высокие напряжения	Низкие напряжения	Высокие напряжения
Динамический	–	+	–	–
Пластический	+	+	+	+
Диффузионный	–	–	+	–

Примечание. + поры и (или) трещины растут, – не растут.

Пути распространения разрушения

Пути распространения разрушения	Низкие температуры		Высокие температуры	
	Низкие напряжения	Высокие напряжения	Низкие напряжения	Высокие напряжения
По телу зерен (внутризеренное)	+	+	-	-
По границам зерен (межзеренное)	-	+ ¹	+	+

Примечание. + разрушение происходит, - разрушение не происходит.

1.3. Раскалывание

Тела, пластичность которых при температуре деформирования ограничена, раскалываются. Кроме некоторых Г.Ц.К.-металлов и их сплавов в условиях низких температур раскалываются все кристаллические тела. Главными причинами, приводящими к раскалыванию, являются: а) многоосное (и неблагоприятное) напряженное состояние; б) внутренние дефекты; в) низкие температуры (особенно для ферритных сталей); г) структурное состояние (например, отпуская хрупкость); д) высокая скорость нагружения. Раскалывание происходит в результате распространения трещин критического размера, которые либо изначально уже присутствовали в материале, либо выросли до критического размера непосредственно в процессе деформирования.

Разрушение материала путем раскалывания может происходить как через зерна, так и по границам зерен. Весьма значительные изменения текстуры, содержания примесей и температуры способны изменить путь раскалывания и привести к внутризеренному или межзеренному разрушению.

Раскалывание материала, как правило, происходит задолго до того, как приложенные напряжения достигнут уровня теоретической прочности.

К особому виду раскалывания следует отнести *динамическое разрушение* материала, которое происходит в результате быстрого приложения нагрузки, когда величина приложенного внешнего напряжения σ существенно превышает теоретическое напряжение разрушения $\sigma_{\text{ид}}$ ($\sigma > \sigma_{\text{ид}}$). При таком нагружении в материале распространяются упругие и пластические волны, способствующие "мгновенному" зарождению трещины, если ее изначально не было в материале, и ее динамическому росту. Такое разрушение наблюдается у всех материалов, в том числе и у материалов с Г.Ц.К. решеткой. Фрактограммы поверхности материала, разрушенного динамически, практически не отличаются от фрактограмм материала расколотого по типу 1. (См. рис. 7 или 8)

1.3.1. Раскалывание (тип 1).

Раскалыванию по типу 1 подвергаются, так называемые, хрупкие тела - тела, в которых уже изначально (вследствие абразивных эффектов, коррозии, или роста кристаллов) содержатся крупные врожденные дефекты размером $2C_0$, соизмеримым с размером зерна d (рис. 1а). Если деформирование происходит при достаточно низкой температуре, когда пластическое течение снижается до минимума, то вблизи этих дефектов концентрируются напряжения σ , величина которых превышает разрушающее σ_r . На дефекте возникает трещина длиной $2C_0$, которая раскалывает зерно (внутризеренное разрушение). При этих

¹ Только в случае когда границы зерен охрупчены, например, из-за выхода на границы охрупчивающих примесей (серы и фосфора в сталях или висмута в меди).

условиях величину разрушающего напряжения можно оценить, используя модифицированный критерий Гриффитса: $\sigma_p = \sqrt{EG_{\text{разр}} / \pi c_0}$, где $G_{\text{разр}}$ — вязкость разрушения.

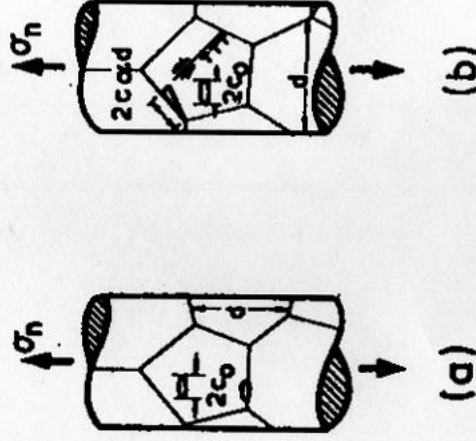


Рис. 1. Раскалывание

a — хрупкое тело, содержащее зародышевую трещину размера $2c_0$.
b — трещина, зарождающаяся в результате внутризеренного дислокационного скольжения. Ее длина $2c_0$ часто имеет величину сопоставимую с размером зерна. Распространение такой трещины может привести к раскалыванию.

Фрактограммы поверхности материала, разрушенного раскалыванием по типу 1 называются фрактограммами (рис. 7 и 8).

1.3.2. Раскалывание (тип 2).

Раскалыванию по типу 2 подвергаются квазихрупкие тела. Квазихрупкие тела могут изначально либо содержать врожденные трещины (в отличие от хрупких, их размеры таковы, что $\sigma < \sigma_p$), либо быть свободными от них. В тех случаях, когда они отсутствуют, при деформировании в результате скольжения или двойникования возможно возникновение аналогичных трещин. Но в обоих случаях трещины, до начала своего катастрофического движения в материале должны “подрасти” до размера зерна (рис. 1b). Следовательно, величина разрушающего напряжения будет определяться размером зерен d :

$$\sigma_p = \sqrt{EG_{\text{разр}} / \pi d}.$$

Отметим, что здесь разрушающее напряжение σ_p больше предела текучести (напряжения макротечения) σ_T материала, а деформация при разрушении ϵ_p , как правило, менее 1%.

Таким образом, раскалывание (тип 2) контролируется двумя процессами: зарождением трещин и распространением трещин. Каждый из этих процессов, в зависимости от типа материала, может быть определенным. Соответственно, на картах разрушения О.Ц.К., Г.П.У.¹ металлов и керамики в области разрушения раскалыванием могут быть выделены две зоны. В первой, механизмом, контролирующим разрушение, является зарождение трещин, во втором — их распространение.

Фрактограммы материала, разрушенного раскалыванием по типу 1 могут содержать изображение скола (рис. 7 и 8), квазискола (рис. 9) или сочетание скола с каким-либо другим фрактографическим рельефом (например, рис. 21, 23).

¹ В Г.Ц.К. металлах и их сплавах область раскалывания, как правило, не выявляется.

1.3.3. Раскалывание (тип 3).

С повышением температуры и снижением напряжения течения могут развиваться значительные пластические деформации (до 1-10%), прежде чем произойдет внезапное катастрофическое разрушение в результате раскалывания. Пластическая деформация в этом случае вызывает возрастание вязкости разрушения $\sigma_{разр}$, трещина притупляется и, как следствие, возрастает разрушающее напряжение σ_r . Фрактограммы представляют собой сочетание скола или квазискола с ямочным рельефом (рис. 20) и гребнями отрыва (рис. 21).

Таблица 1.9.

Связь разрушения раскалыванием (по Эшби), механизмов зарождения и роста трещин и рельефа, наблюдаемого на фрактограммах

Характеристики раскалывания						
Механизмы раскалывания	Исходные трещины	Зарождение трещин	Тип трещин	Характер роста и распространения трещин	Величина деформации до разрушения	Тип фрактограммы
Тип 1	критического размера	нет	острая	динамический, внутризеренный	0%	Скол
Тип 2	меньше критического размера или их нет	в вершине дислокационного скопления	острая	пластический, затем динамический внутризеренный рост магистральной трещины	~ 1%	Скол и/или квазискол + гребни отрыва
Тип 3	нет	в вершине дислокационного скопления	пластическая	пластический, затем динамический внутризеренный рост магистральной трещины	от 1% до 10%	Скол и/или квазискол + гребни отрыва

1.4. Вязкое разрушение

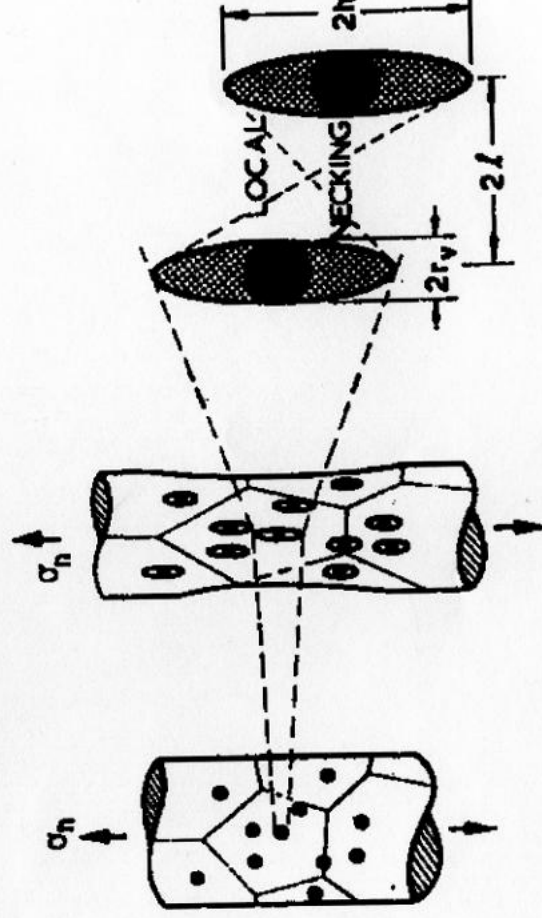


Рис. 2. Вязкое разрушение

Вязкое разрушение при ползучести, возникает либо когда трещины существовали в материале изначально, либо когда они возникли в результате включения концентрации локальных внутренних напряжений

1.4.1. Вязкое разрушение при низких температурах

Вязкое разрушение начинается с зарождения и быстрого роста внутризеренных трещин. Отсюда следует, что оно должно определяться размером дефектов (трещин, включений) и расстоянием между ними. Росту трещин способствует концентрация напряжений, а их слияние в области локального сужения ведет к разрушению материала (рис. 2).

Как правило, трещины зарождаются на включениях. Твердые включения возмущают упругое и пластическое поля смещений в деформируемом теле, приводят к возрастанию напряжений вблизи частиц. Если включения велики, ($> 1 \mu\text{м}$) и в окружающем их материале не наблюдается грубого скольжения, то максимальные локальные напряжения у сферических частиц лишь в полтора – два раза превышают приложенное напряжение. Обычно этого недостаточно для отрыва частиц от основной массы материала. Но, если включения малы, то вблизи них локальная скорость упрочнения оказывается выше средней скорости деформации. Напряжения растут и, с течением времени, достигают разрушающего значения σ_p ; – происходит отслаивание включений (частиц) от основной матрицы, сопровождающееся интенсивным образованием трещин.

Если свойства материала известны, можно рассчитать величину деформации ϵ_p , при достижении которой начинают зарождаться трещины. Эта величина лежит между 0 и 1,0 и при конкретных расчетах удовлетворительно согласуется с экспериментом.

После зарождения трещины растут. Сферические трещины являются концентраторами напряжений и поэтому в процессе деформации быстро вытягиваются (скорость вытягивания примерно вдвое превышает скорость деформации образца) и становятся эллиптическими, затем их рост замедляется и сравнивается со скоростью деформации образца.

Наконец, при достижении некоторой критической деформации ϵ_p ($\epsilon_p \sim \frac{1}{V_{\text{трещины}} - V_{\text{матрицы}}} \cdot \ln\left(\frac{\alpha}{\sqrt{f_v}} - \alpha\right)$, где f_v – объемная доля пор, α – постоянная материала близкая к 1, $V_{\text{трещины}}$ – скорость роста трещины, $V_{\text{матрицы}}$ – скорость деформации матрицы) происходит слияние трещин и образец разрушается практически без дальнейшего удлинения. Вязкое разрушение при низких температурах обычно протекает по телу зерен, но если включения выделяются преимущественно по границам зерен, то становится возможным и межзеренное разрушение.

Фрактограммы материала разрушенного по такому механизму могут иметь сочетание ямочного рельефа с гребнями отрыва (рис. 24) или сочетание ямочного рельефа и межзеренного разрушения (рис. 25).

1.4.2. Вязкое разрушение при средних температурах

При температуре выше $0,3 T_{\text{пл}}$ наблюдается степенная ползучесть. Как известно, при ползучести напряжение зависит от скорости деформации и пластическое течение описывается степенным законом $\dot{\epsilon} = B\sigma^n$ (здесь B и n константы материала). При ползучести разрушение происходит в результате слияния пор, которые также, как и при вязком разрушении при низких температурах, зарождаются преимущественно внутри зерен на недеформируемых включениях. И хотя стадии разрушения материала (зарождение, рост и слияние пор) в основном повторяют стадии, приводящие к вязкому разрушению при низких температурах, все же имеется, по крайней мере, два существенных отличия.

Во-первых, поскольку в условиях ползучести приложенные напряжения существенно ниже, и поскольку при повышенных температурах активизируются процессы accommodation, зарождение пор замедляется и становится возможным лишь при значительно больших деформациях. Во-вторых, характерная для ползучести зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от напряжения σ , обеспечивает большую стабильность пластического течения и затрудняет слияние пор. Например, если $n=1$ (такая величина показателя степени в уравнении ползучести наблюдается при диффузионной ползучести стекла) слияния пор

вообще не происходит, даже при их очень высокой концентрации в материале. В итоге разрушение оказывается существенно зависящим от времени.

Фрактограммы материала разрушенного вязко при средних температурах имеют либо чисто ямочный рельеф (рис. 11-15), либо сочетание ямочного рельефа с гребнями отрыва (рис. 24).

Таблица 1.10.

Связь вязкого разрушения (по Эшби), механизмов зарождения и роста трещин и пор и рельефа, наблюдаемого на фрактограммах

Механизмы вязкого разрушения	Характеристики вязкого разрушения					Тип фрактограммы
	Исходные трещины	Зарождение трещин или пор	Тип трещин	Характер роста и развития трещин или пор	Величина деформации до разрушения	
Вязкое разрушение при низких температурах	нет	на частицах в объеме зерен в вершине дислокационного скопления зарождаются трещины	пластические	пластический рост трещин, распространение происходит чаще всего по телу зерен	(0-100)%	Квазискол + ямочный рельеф + гребни отрыва
Вязкое разрушение при средних температурах	возможно наличие исходных пор.	на частицах в объеме зерен зарождаются поры	трещин нет	пластический рост пор, их слияние происходит, обычно, в теле зерен	(10-100)%	Ямочный рельеф (равноосные, вытянутые или удлиненные ямки)

1.5. Межзеренное разрушение при ползучести

При низких напряжениях в условиях ползучести развивается зернограничное проскальзывание, способствующее зарождению на границах пор и клиновидных трещин, расположенных перпендикулярно оси растяжения. Разрушение переходит от внутризеренного к межзеренному.

Время до разрушения t_p (долговечность) в таком режиме деформирования с хорошим приближением может быть описано уравнением $t_p \cdot \dot{\epsilon}^{полз} = const^1 \approx 0.1$, где $\dot{\epsilon}^{полз}$ — скорость установившейся ползучести (уравнение Журкова или соотношение Монкана-Гранта).

Основные особенности рассматриваемого поведения можно объяснить, если предположить, что поры и трещины зарождаются вследствие процессов контролируемых степенной ползучестью, а их рост происходит диффузионным путем.

При зернограничном проскальзывании локальная скорость деформации вблизи частиц, расположенных в границах зерен, выше, чем в теле зерен. При размере зерна d , скорость $\dot{\epsilon}_{лок}$ вблизи включения диаметром $2R_v$ выше средней скорости деформации $\dot{\epsilon}$ в $(\chi \cdot \frac{d}{2R_{\%}})$ раз. ($\dot{\epsilon}_{лок} / \dot{\epsilon} = \chi \cdot \frac{d}{2R_{\%}}$). Здесь χ — доля макроскопической деформации, связанной с зернограничным проскальзыванием, обычно $\chi=0,3$.) Вследствие этого локальная

¹ Произведение скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ на долговечность t_p (время до разрушения) в общем случае есть функция напряжения при данной температуре и носит название "ресурс пластичности". Она является важной характеристикой жаропрочности,

деформация достигает критической величины, необходимой для зарождения поры в границе зерен, чем в теле зерна.

Это объяснение уравнения Журкова “работает” только в том случае, когда стадия зарождения занимает основное время жизни образца под нагрузкой, а стадия роста пор составляет существенно меньшую часть этого времени. Более общее объяснение состоит в том, что поры, когда они малы, растут в результате совместно протекающих процессов диффузии и степенной ползучести.

Фрактограммы имеют чисто ямочный рельеф (рис. 11-15).

1.6. Пластический разрыв

В условиях, когда рассмотренные выше механизмы зарождения трещин “не работают”, материал разрушается из-за механической потери устойчивости. Деформация локализуется в шейке или в полосах сдвига и продолжается до тех пор, пока площадь поперечного сечения не приблизится к нулю. Деформация до разрушения зависит от деформации, при которой начинается эта локализация и, следовательно, от показателей упрочнения и скоростной чувствительности материала. Такой механизм разрушения реализуется в тех случаях, когда затруднено образование пор или, если они зарождаются, затруднено их слияние.

Практически всегда (при высоких и низких температурах) поры зарождаются на включениях (дисперсных частицах), поэтому их появление может быть подавлено в следующих случаях:

- включения, на которых образуются поры, отсутствуют, например, в высокочистых материалах (Очищенный зонной плавкой алюминий разрушается путем пластического разрыва, в то время как алюминий технической чистоты – вязко);
 - включения в процессе деформации растворяются (При деформировании нержавеющей стали нагретой до 1000 °С растворяются карбиды);
 - зарождение пор на включениях затруднено из-за высокой прочности границы частица-матрица (Этот случай подавления зарождения пор на границах наблюдается в ферроидизированных сталях);
 - локальная релаксация внутренних напряжений не допускает возрастания напряжений вблизи включений до разрушающего значения σ_p (Чрезвычайно быстрая релаксация напряжений наблюдается в большинстве Г.Ц.К металлов при динамической рекристаллизации в условиях высоких температур, поэтому разрушение в, этом случае, происходит вследствие пластического разрыва);
 - слишком низок уровень локальных напряжений (Монокристаллы и крупнозернистые поликристаллы, содержащие в поперечном сечении менее 10 зерен, разрушаются путем пластического разрыва, хотя при тех же условиях деформации мелкозернистые образцы разрушаются вязко).
- Реализация пластического разрыва из-за невозможности слияния пор чрезвычайно редкий случай, его можно наблюдать только в некоторых сверхпластичных материалах, в которых высокая скоростная чувствительность напряжения течения способствуют стабилизации течения как в микро-, так и в макромасштабе. В таких материалах при деформировании поры появляются, но не объединяются.
- Фрактограммы, так же как и в случае межзеренного разрушения при ползучести имеют чисто ямочный рельеф (рис. 11-15).

Таблица 1.11.

Связь вязкого разрушения (по Эшби), механизмов зарождения и роста пор и рельефа, наблюдаемого на фрактограммах

Характеристики вязкого разрушения

Механизмы вязкого разрушения	Исходные поры	Зарождение пор и клиновидных трещин	Тип пор	Характер роста и развития пор и клиновидных трещин	Величина деформации до разрушения	Тип фрактограммы
Межзеренное разрушение при ползучести	могут быть	на частицах в границах зерен зарождаются поры, в стыках зарождаются клиновидные трещины	пластические	Сначала рост диффузионный, затем пластический	10%	Ямочный рельеф (равноосные, вытянутые или удлиненные ямки)
Пластический разрыв	нет	поры и трещины не зарождаются	нет	нет пор и трещин	100% (сильная локализация деформации)	Ямочный рельеф (равноосные, вытянутые или удлиненные ямки)

2. Карты механизмов разрушения

Карта механизмов разрушения представляет собой диаграмму, по осям которой отложены температура деформации, нормализованная по температуре плавления ($T/T_{пл}$) и напряжение нормализованное по модулю нормальной упругости E (σ/E). На диаграмме выделены области, соответствующие определенному механизму разрушения материала. В пределах этих областей нанесены линии постоянных времен до разрушения (t_p), позволяющие при заданных σ и T оценить величину времени до разрушения в условиях ползучести.

Карты справедливы лишь для уровней напряжений, обеспечивающих скорость деформации $\dot{\epsilon} \sim 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, то есть для долговечности t_p порядка 10^6 с , так как для более жестких условий разрушение происходит, в основном, за счет динамической деформации, при которой через металл распространяются упругие и пластические волны. Обозначенные на картах деформации границы действия механизмов разрушения довольно условны, поскольку во многих случаях одновременное действие нескольких механизмов приводит к разрушению по смешанному типу.

Верхняя граница напряжений идеальна (теоретической) прочностью $\sigma_{ид}$ материала. (Идеальную прочность материала можно найти используя критерий Гриффитса: $\sigma_{ид} = \sqrt{2E\gamma_{пов}} / \sqrt{S}$, где $\gamma_{пов}$ – поверхностная энергия материала на единицу площади, S – площадь, по которой происходит разрушение)

2.1. Основы построения карт механизмов разрушения

Для построения карты механизмов разрушения необходимо знать физические механические свойства материала и его механизмы деформации. (В качестве примера, физико-механические свойства стали 12X18H10T приведены в приложении 1, а механизмы деформации для этой стали указаны на карте механизмов деформации в приложении 2)

При расчете времени до разрушения $t_p(\sigma, T)$ предполагается, что оно складывается из двух основных величин – времени появления микронесплошностей (микротрещин, микропор) $t\{1\}$ и времени роста этих дефектов до критического размера $s-t\{2\}$.

Величина $t\{1\}$ определяется по формуле $t\{1\} = \varepsilon_1 / \dot{\varepsilon}$, где ε_1 — пороговая деформация, при которой в условиях ползучести происходит зарождение устойчивых против заличивания микротрещин, $\dot{\varepsilon}$ — скорость ползучести, определяемая при заданных σ и T по картам деформации материала. В общем случае величина ε_1 не является постоянной, а зависит от условий эксплуатации (значений σ , ε и T) и еще в большей степени от параметров микроструктуры материала (d , c_0 , R_v , R_b , f_v , f_b и т.д.). Так, например, в условиях низкотемпературной дислокационной ползучести, когда скорость протекания аккомодационных процессов невелика, величина ε_1 зависит, главным образом, от размера дисперсных включений R и может быть вычислена по формуле $\varepsilon_1 = c_1 \sqrt{\gamma_1^* / GR}$ (здесь c_1 — численный коэффициент, γ_1^* — эффективная энергия, необходимая для зарождения микротрещин на границе раздела частица-матрица при низкой температуре, $(\gamma_1^*)^2 = 2\gamma_{\text{пов}} - \gamma_{\text{част-матр}}$, $\gamma_{\text{пов}}$ — удельная энергия свободной поверхности, $\gamma_{\text{част-матр}}$ — удельная поверхностная энергия раздела частица-матрица). При повышенных температурах для оценки ε_1 следует использовать выражение $\varepsilon_1 = c_2(b/R) \sqrt{\gamma_2^* / Gb}$ (c_2 — численный коэффициент, γ_2^* — эффективная энергия, необходимая для зарождения микротрещин на границе раздела частица-матрица при высоких температурах). В случае, когда число дисперсных включений невелико, или их размеры невелики ($R < 10^3 b$), микротрещины при низкотемпературной дислокационной ползучести будут возникать преимущественно в стыках зерен и на фасетках межзеренных и межфазных границ. Пороговая деформация ε_1 в этом случае зависит, главным образом, от размера зерен d и может быть вычислена по формуле $\varepsilon_1 = c_3 \sqrt{\gamma_3^* / Gd}$ (c_3 — численный коэффициент, γ_3^* — эффективная энергия, необходимая для зарождения микротрещин на границе раздела частица-граница зерна ($\gamma_3^* = 2\gamma_{\text{пов}} - \gamma_{\text{част-гр.зерна}}$, $\gamma_{\text{пов}}$ — удельная энергия свободной поверхности, $\gamma_{\text{част-гр.зерна}}$ — удельная поверхностная энергия раздела частица-граница зерна)). Значения численных коэффициентов c_1 , c_2 и c_3 зависят от температуры, напряжения, формы частиц параметров их пространственного распределения и вычисляются с помощью специальных программ для ЭВМ.

Необходимо отметить, что величины γ_1^* , γ_2^* и γ_3^* являются весьма чувствительными к параметрам химического состава и его перераспределению в процессе эксплуатации. Происходящее под действием температуры и напряжений перераспределение примесных атомов и их выход на внутренние границы раздела (так называемая зернограничная сегрегация) могут приводить к существенному изменению величин эффективных энергий, необходимых для зарождения микротрещин на границах раздела (в некоторых случаях на порядок величины).

Величина $t\{2\}$ — время дорастания микротрещины до критического размера s^* вычисляется по формуле $t\{2\} = s^* / \dot{V}$, где \dot{V} — скорость роста зародышевой микротрещины.

Величина \dot{V} зависит, главным образом, от внешних условий, механизма пластической деформации материала и геометрических параметров зародышевых трещин: их начальных размеров (c_0), мест расположения и концентрации в теле и на границах зерен.

2.2. Уравнения описывающие рост трещин при ползучести

Известны три основных механизма роста микротрещин (пор) при ползучести: диффузионный, пластический и смешанный (диффузионно-пластический) Рассмотрим два наиболее важных для практики механизма роста, диффузионный и пластический. Случай комбинированного роста трещин не поддается простому аналитическому описанию и расчеты его скорости \dot{V} производятся с помощью специальных компьютерных программ.

Введем параметр L имеющий размерность длины $L = [(\sigma \Omega_D \delta) / (K T \alpha \dot{\varepsilon})]^{1/3}$ (α — численный коэффициент ($\alpha = 1-3$)). Если исходный размер трещин c_0 и характерные расстояния

между ними λ гораздо меньше величины L , то рост трещин осуществляется по диффузионному механизму. Выражение для \dot{V} в этом случае имеет вид $\dot{V} = \phi_v (\sigma \Omega D_b \delta / KT)$ (ϕ_v — численный коэффициент), а время подрастания трещины в объеме зерен до критического размера $t_v\{2\}$ определяется следующим выражением: $t_v\{2\} = (c^*)^3 / (\sigma \Omega D_b \delta / KT) \phi_v$.

Если размер трещин невелик, $c_0 \ll L$, то осуществляется чисто пластический рост дефектов и величина $t\{2\}$ определяется по формуле $t\{2\} = \ln((c^*)^3 / c_0) / \alpha \dot{\epsilon}$.

Основываясь на изложенных представлениях о механизмах зарождения и роста трещин при ползучести, для описания процесса разрушения материалов и расчетов значений времени до разрушения t_p будем использовать следующую топологию механизмов разрушения.

Внутрикристаллитное разрушение

$$t_p = [\epsilon_1 + 0.5 \frac{n}{n-1} \ln(0.7/f_v^{1/2} - 1)] / \dot{\epsilon},$$

где n — показатель степени в законе ползучести, f_v — объемная доля внутризеренных дисперсных частиц.

Межкристаллитное разрушение путем образования и роста трещин

$$t_p = 2 \gamma_1^* / \dot{\epsilon} b \delta \sigma,$$

где $\dot{\epsilon} b$ — скорость деформации по границам кристаллитов.

Межкристаллитное разрушение при диффузионном росте трещин

$$t_p = 6 \cdot 10^{-3} \lambda^3 (\sigma \Omega D_b \delta / KT)^{-1},$$

где λ — среднее расстояние между частицами, на которых возникли поры.

Межкристаллитное разрушение при пластическом росте трещин

$$t_p = (1 - \xi_0) / 1.5 \dot{\epsilon},$$

где ξ_0 — начальная доля площади, занимаемая микротрещинами на границе.

Главным предположением при построении карты механизмов разрушения на основе указанных уравнений является предположение о параллельном, взаимно независимом действии отдельных механизмов разрушения. Согласно этому предположению разрушение в заданных условиях происходит в соответствии с тем механизмом, который ведет к наиболее короткому времени до разрушения.

2.3. Карта механизмов разрушения Г.Ц.К. металлов

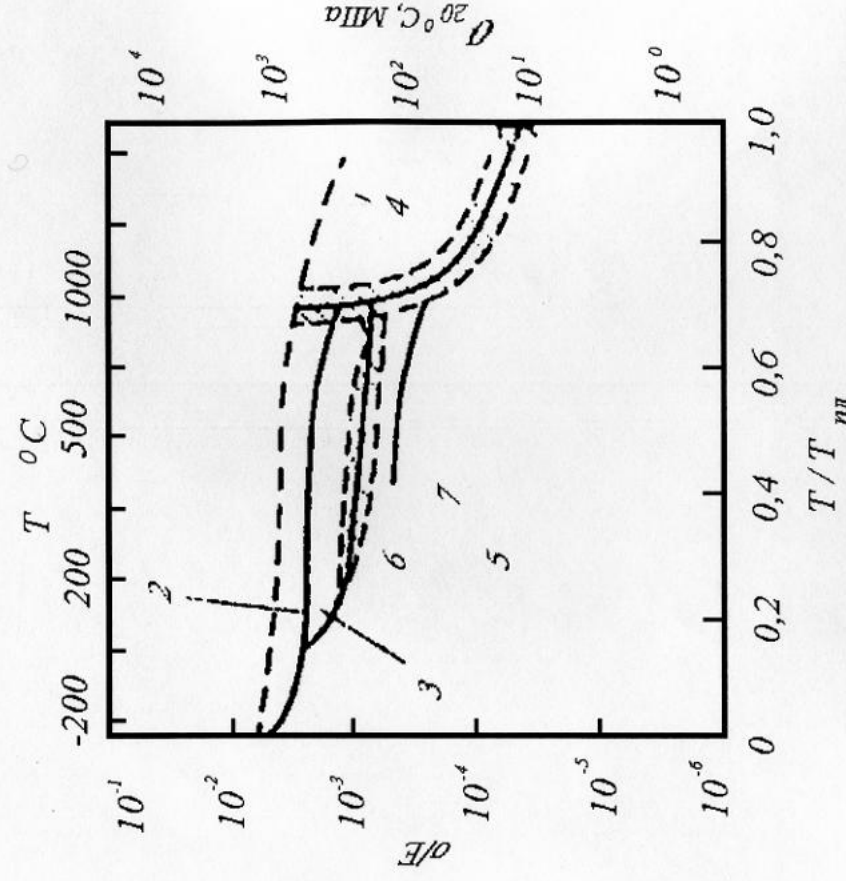


Рис. 3. Карта механизмов разрушения металлов с Г.Ц.К.-решеткой.

(Карта построена на основе испытаний на растяжение никеля технической чистоты) 1 – динамическое разрушение (скол); 2, 3 – вязкое разрушение (2 – при низких температурах, 3 – при средних температурах); 4 – пластический разрыв; 5, 6, 7 – область совместного протекания вязкого разрушения и межзеренного разрушения при ползучести; 5, 6, 7 – область образования клиновидных трещин на границах зерен, 7 – область образования пор на границах и стыках).

На карте механизмов разрушения металлов с Г.Ц.К. решеткой (рис. 3), можно выделить четыре области механизмов разрушения (1, (2, 3), 4 и (5, 6, 7)). При высоких напряжениях и низких температурах разрушение носит вязкий характер. Повышение температуры приводит к ползучести и уменьшению разрушающего напряжения. При относительных высоких напряжениях, в процессе внутризеренной ползучести разрушение происходит в результате роста и объединения пор. При более низких напряжениях и, следовательно, больших долговечностях доминируют процессы межзеренной ползучести, причем можно выделить две подобласти, в одной из которых причиной разрушения является зарождение клиновидных трещин, а в другой – преимущественное образование пор по границам зерен. Для обеих форм межзеренной ползучести характерна низкая пластичность и разрушение после весьма малых деформаций. Зона перехода внутризеренного разрушения к межзеренному на диаграмме заштрихована; здесь можно наблюдать разрушение смешанного типа.

При дальнейшем повышении температуры, начинается динамическая рекристаллизация, и разрушение происходит с образованием шейки.

2.4. Карта механизмов разрушений О.Ц.К. металлов

При наличии в образце врожденных внутренних дефектов происходит низкотемпературное раскалывание типа 1 без пластической деформации. Однако, обычно трещины

зарождаются в результате двойникования или скольжения и в дальнейшем они распространяются и приводят к внутризеренному или межзеренному разрушению. Уже небольшое повышение температуры делает возможным некоторое пластическое течение, и несмотря на быстрое снижение предела текучести и повышение вязкости, разрушение происходит раскалыванием по типу 3. При $T > 0.3T_{пл}$ повышенных напряжениях наблюдается вязкое разрушение при.

При низких напряжениях наблюдается межзеренное разрушение. Для области $\sim 0.5T_{пл}$ и $\sigma/E > 10^{-4}$ типичны клиновидные трещины, а при более низких напряжениях и одновременно высоких температурах, разрушение связано с развитием пор; в области температур, близких к точке плавления, и относительно высоких напряжениях, происходит пластический разрыв.

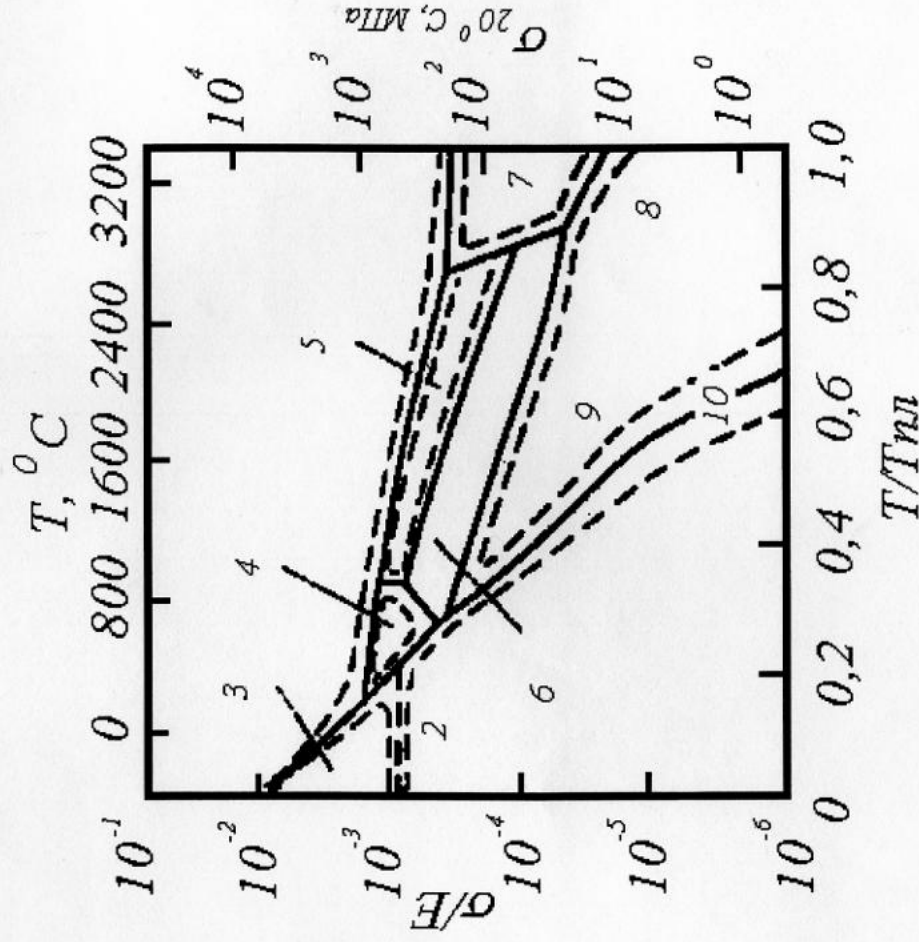


Рис. 4. Карта механизмов разрушений О.Ц.К.-металлов

(Карта построена на основе испытаний на растяжении вольфрама технической чистоты $d=100$ мкм): 1 – динамическое разрушение; 2 – раскалывание по типу 1; 3 – раскалывание по типу 2 (внутризеренное или межзеренное разрушение); 4 – раскалывание по типу 3 (внутризеренное или межзеренное разрушение); (5, 6) – вязкое разрушение (5 – при низкой температуре, 6 – при средней температуре); 7 – пластический разрыв; 8, 9, 10 – межзеренное разрушение при ползучести. (8 – область образования пор на границах зерен; 9 – область образования клиновидных трещин в стыках зерен).

2.5. Карта механизмов разрушений Г.П.У. металлов

В области низких температур у Г.П.У. металлов происходит раскалывание по типу 1. При чуть более высоких температурах базисное скольжение или двойникование приводят к зарождению мелких трещин и материал раскалывается по типу 2.

При более высоких температурах и напряжениях, когда активно большое число систем скольжения, Г.П.У. металлы ведут себя сходно с Г.Ц.К. металлами, но при низких температурах их характеристики приближаются к характеристикам керамик. Следует отметить, что Г.П.У. металлы и сплавы более склонны к разрушению межзеренной ползуче-

стью, чем О.Ц.К. и Г.Ц.К. металлы, в связи затруднением небазисного скольжения, требующегося для аккомодации зернограничного проскальзывания.

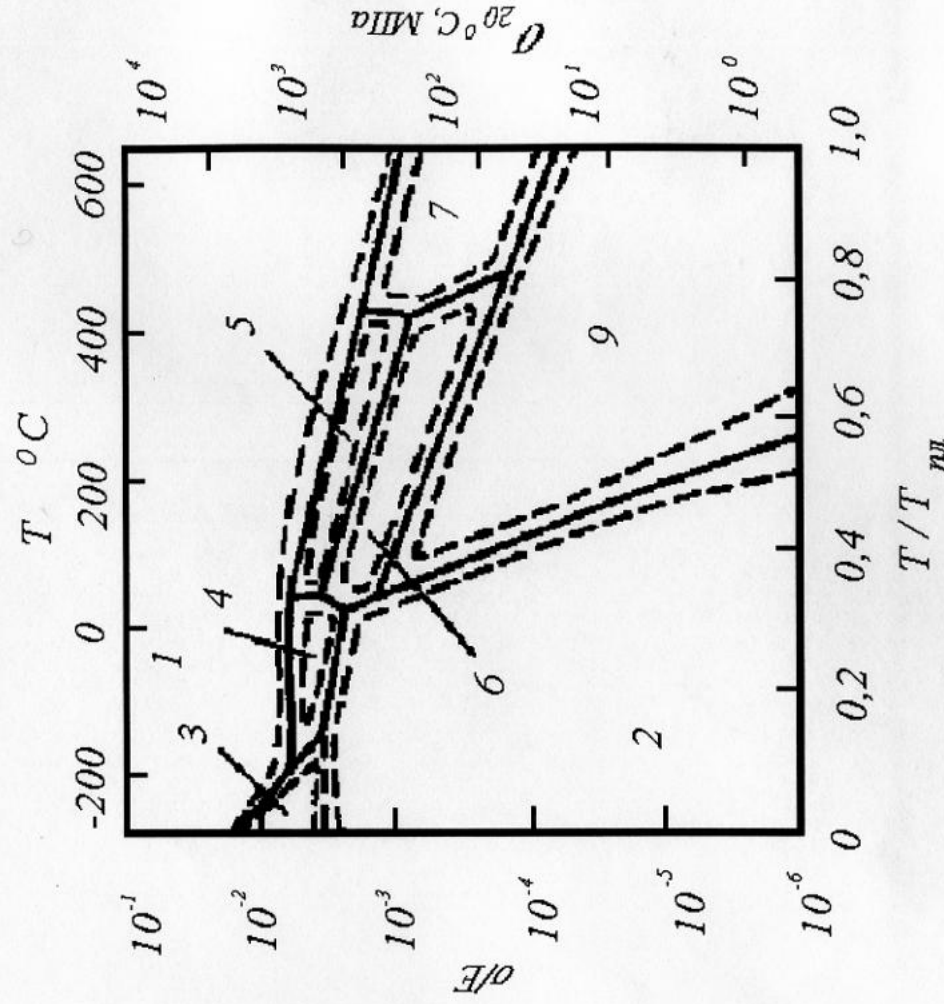


Рис.5. Карта механизмов разрушения металлов с Г.П.У. решеткой:

(Карта построена на основе испытаний на растяжение магния технической чистоты $d=100$ мкм)
 1 – динамическое разрушение; 2 – раскальвание по типу 1; 3 – раскальвание по типу 2 (внутризеренное или межзеренное разрушение); 4 – раскальвание по типу 3 (внутризеренное или межзеренное разрушение); 5 – вязкое разрушение при низких температурах; 6 – вязкое разрушение при средних температурах; 7 – пластический разрыв; 8, 9, 10 – межзеренное разрушение при ползучести. (8 – область образования пор на границах зерен; 9 – область образования клиновидных трещин в стыках зерен).

2.6. Карта механизмов разрушения керамических материалов

В керамике большие области занимает разрушение раскальванием по типам 1 и 2, но выше $0.45 T_{пл}$ небольшая общая пластическая деформация и ползучесть делают возможными хрупкое межзеренное разрушение (раскальвание по типу 3). При комбинации весьма высоких напряжений и температур, деформационно-стимулированный рост зерен и динамическая рекристаллизация способствуют процессам внутризеренной ползучести. Однако в области низких напряжений и высоких температур тугоплавкие оксиды разрушаются в результате ползучести путем межзеренного разрушения, при котором для более высоких напряжений характерно развитие клиновидных трещин, а для низких – рост пор.

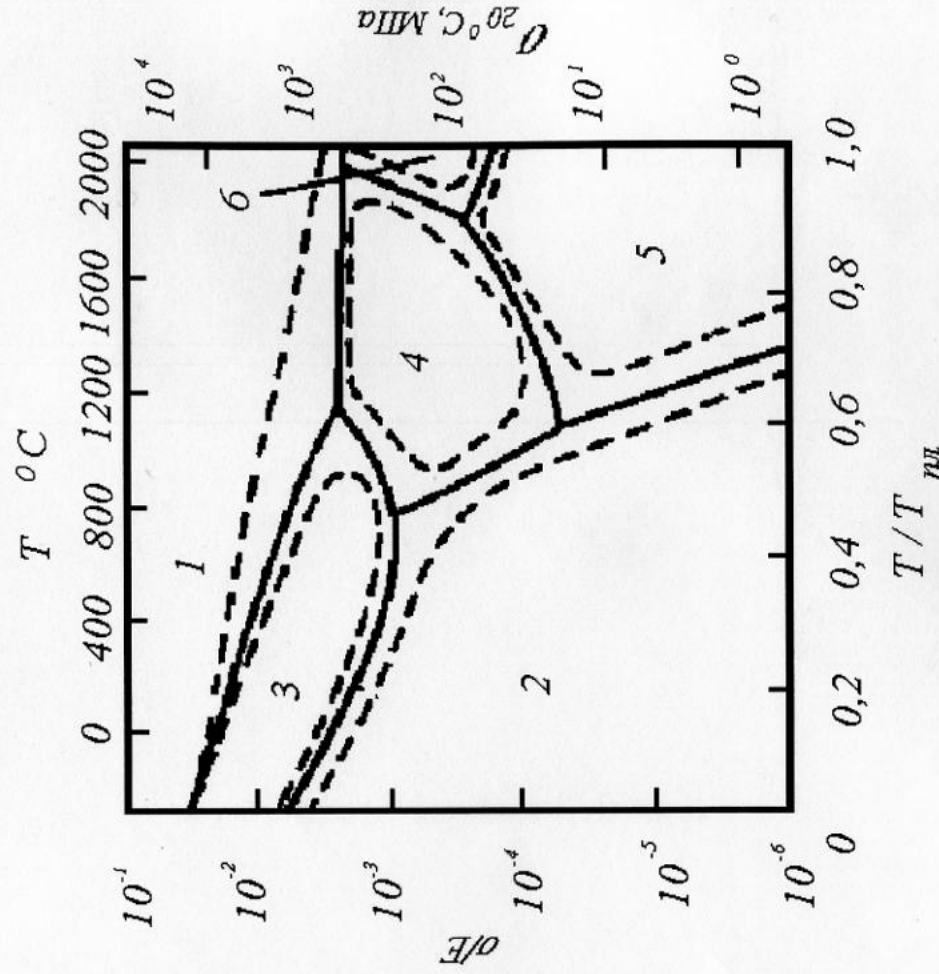


Рис. 6. Карта механизмов разрушения конструкционной керамики:

(Карта построена на основе испытаний на растяжение корунда Al_2O_3 , $d=10$ мкм)

1 – динамическое разрушение; 2 – раскалывание по типу 1; 3 – раскалывание по типу 2 (внутризеренное разрушение); 4 – раскалывание по типу 3 (внутризеренное или межзеренное разрушение); 5 – межзеренное разрушение при ползучести; 6 – вязкое внутризеренное разрушение при ползучести.

3. Фрактограммы. Их виды и классификация

Фрактограмма – это изображение разрушенной поверхности материала (излома¹), полученное, как правило, с помощью растрового электронного микроскопа.

Почаду фрактограммы использовались только для установления причин аварийных разрушений. В настоящее время, сфера их использования значительно расширилась. С их помощью определяют температуру перехода от вязкого разрушения к хрупкому, скорость приложения нагрузки, при которой разрушение материала становится хрупким, изучают влияние структуры на вязкость стали, следят за изменениями, происходящими в структуре бинарных сплавов при разрушении, и т.д. Только с помощью фрактограмм удается анализировать процессы усталости, наблюдать водородное охрупчивание, изучать дефекты роста кристаллов и высокотемпературную диссоциацию включений. Они широко используются также и для оценки энергоемкости процесса разрушения, и поэтому, наряду с количественными методами определения трещиностойкости и вязкости разрушения, занимают важное место в науке о разрушении материалов.

Любая фрактограмма отражает результат действия многих процессов, протекавших в образце в момент его разрушения. Поэтому интерпретация и анализ фрактографических изображений требует от исследователя знания основных микромеханизмов зарождения и роста пор и трещин.

¹ Излом представляет собой след магистральной трещины, в результате распространения которой произошло разделение материала.

Классификация фрактограмм

Фрактограммы полученные в растровом электронном микроскопе при малых увеличениях очень похожи на поверхности разрушения, рассматриваемые невооруженным глазом. Однако при больших увеличениях выявляются более тонкие детали (особенности рельефа), появившиеся в результате действия одного или сразу нескольких механизмов разрушения.

Основные типы рельефа поверхности разрушения, которые можно наблюдать на фрактограммах следующие:

1) скол (язычки, микродвойники и очаг трещины скола) (рис. 7 и 8), 2) квазискол (рис. 9), 3) ямочный рельеф (рис. 11-15), 4) гребни отрыва (рис. 21 и 24), 5) фасетки межзеренного разрушения (рис. 16), 6) высокотемпературный межзеренный рельеф (рис. 17 и 18), 7) усталостные бороздки¹ (рис. 19), 8) смешанный рельеф разрушения, включающий в себя сочетание скола, ямочного рельефа, гребней отрыва, усталостных бороздок и фасеток межзеренного разрушения (рис. 20-25).

Для идентификации механизмов разрушения с помощью фрактограмм, необходимо, прежде всего, иметь изображение разрушенной поверхности с различными увеличениями, достаточными для визуализации дефектов или следов действия механизмов деформации, которые явились причиной разрушения. Невозможно указать какую-либо определенную кратность увеличения. Однако в соответствии с таблицей 1.3. можно рекомендовать три степени увеличения разрушенной поверхности:

- 1) изображение должно содержать десятки зерен;
- 2) изображение должно содержать единицы зерен;
- 3) изображение должно содержать десятки частиц.

3.1. Скол

Скол – относительно ровная и гладкая кристаллографическая поверхность разрушенного зерна. На рис. 7 представлено при нарастающем увеличении три снимка поверхности расколотого образца. Можно заметить (рис. 7а), что плоскость скола меняет свою ориентировку от зерна к зерну. Изменение направления раскалывания приводит к ветвлению трещины вдоль различных плоскостей (в каждом отдельном зерне – кристаллографических плоскостей) и к хаотическому внешнему виду поверхности разрушения. В большинстве О.Ц.К. металлов эта плоскость разрушения относится к семейству $\{100\}$.

Скол наблюдаются на поверхностях расколотых металлов имеющих объемноцентрированную кубическую (О.Ц.К.) (железо, молибден, тантал, хром), или гексагональную плотноупакованную (Г.П.У.) (цинк, титан, магний) решетки. В металлах с гранецентрированной кубической решеткой (Г.Ц.К.) (алюминий, медь) скол наблюдается редко и только при особых условиях (высокие скорости приложения нагрузки или при коррозионной усталости).

Для скола типичны следующие детали:

- изменение ориентировки распространения раскалывания (рис. 7b, от зерна А к зерну В);
- ручьистый узор² (начинается на границе зерен А и В и продолжается в зерне В);

¹ Усталостное разрушение материала в работе не описываются. Фрактограммы с усталостными бороздками и их описание приведены в качестве справок.

²; Ручьистые узоры представляют собой ступеньки между локальными фасетками скола одной и той же общей плоскости раскалывания. Они направлены слева направо. Ступеньки ручьистых узоров обычно представляют собой результат раскалывания вдоль плоскостей скола второго порядка; стремясь к минимуму энергии разрушения, они объединяются подобно ручьям в направлении распространения трещины. Высота ступенек ручьистого узора связана с углом между осью растягивающего напряжения и направлением плоскости скола внутри данного зерна. Зерно, которое не содержит совсем, или содержит мало признаков ручьистого узора, может быть ориентировано под прямым углом к главной оси растяжения, что обеспечивает

- язычки¹ (указаны стрелочками на рис. 7b) и микродвойники²;
- очаги трещин скола: очаг главной трещины скола³ (точка С на рис. 8a и 8b) и очаги вторичных трещин (стрелки D и E на рис. 8a);

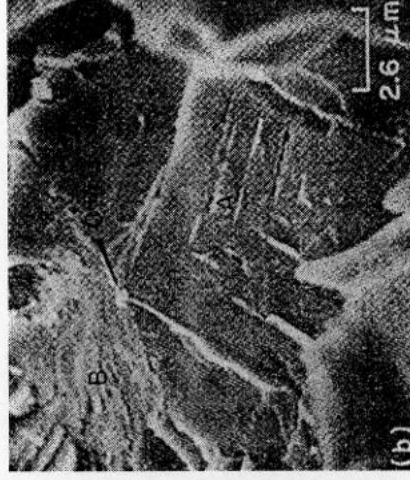


Рис. 7. Сталь 1040 расколота при -196°C (77К).

- а) $\times 1560$. (На фрактограмме видны десятки зерен. А и В два соседних зерна.)
- б) $\times 3900$. (На фрактограмме видно два зерна.)
- Стрелками указано места расположения язычков и микродвойников.
- с) $\times 7800$. Частиц и выделений не обнаружено.

3.2. Квазискол

Квазискол – это тот же, что и описанный в п.3.1 скол, но развивающийся в условиях сложной микроструктуры. Размер и ориентировку плоскостей раскола внутри бывшего аустенитного зерна определить трудно, поскольку зерно раскалывается по множеству кристаллографических плоскостей. При этом, естественно, плоскости квазискола (фасетки скола) имеют значительно меньший, чем зерно, размер. Такой вид разрушения, как правило, инициирован карбидными частицами и (или) крупными включениями.

легкое распространение разрушения вдоль единичной плоскости. Ручьиные узоры могут видоизменяться вследствие присутствия включений и дисперсных выделений.

¹ Язычки представляют собой очень тонкие, кристаллографически выделенные отщепления металла. Язычки наблюдаются на фасетках скола. Появляются только при разрушении расколом микродвойников.

² Микродвойники образуются в вершине главной (магистральной) трещины из-за большой пластической деформации, возникшей в результате ее движения. Визуально не обнаруживаются. Их присутствие можно обнаружить только по наличию язычков.

³ Очагом трещины скола является карбидная частица диаметром ~ 1 мкм (точка С на рис. 8a и 8b). От этой частицы трещина распространилась в соседние зерна.

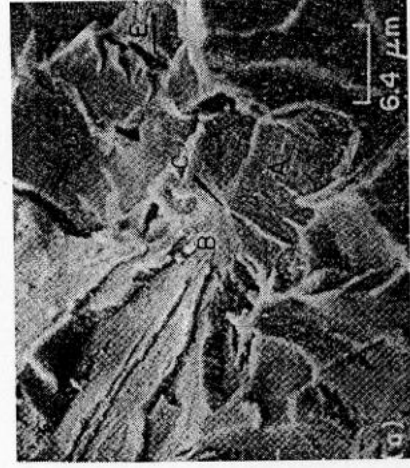


Рис. 8. Сталь 1040 расколота при -196°C .

(Тот же образец, что и на рис. 1. Другой участок.)

а) $\times 1\ 560$. А и В - зерна. С - небольшая карбидная частица на границе зерен А и В, инициировавшая локальную трещину скола через соседние зерна. D и E - вторичные трещины.
 б) - $\times 3\ 900$.

На плоскостях квазискола, также как и на плоскости скола, можно обнаружить и ручейный узор и язычки и очаги трещин скола, отсутствует только изменение ориентировки плоскости скола при переходе разрушения от зерна к зерну. Главным отличием квазискола от скола является наличие на фрактограммах гребней отрыва (остроконечных плоских пиков) разделяющих фасетки скола (рис. 8а) и неглубоких ямок (на рис. 9б они показаны стрелками).

Квазискол наблюдается, в основном, в сталях закаленных на мартенсит и затем отпущенных при температурах, отвечающих выделению дисперсных карбидов.

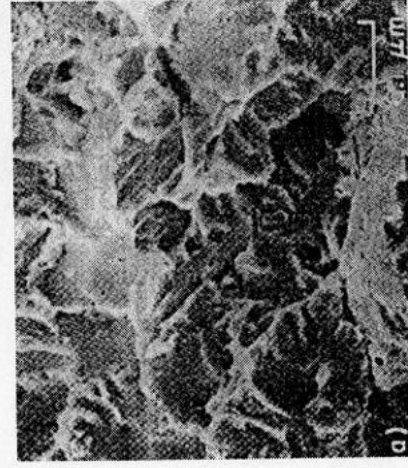


Рис. 9. Сталь 4340 разрушенная ударом при -196°C

(Образец термически обработан при 843°C , 1 ч, закален в масле и отпущен при 427°C , 1 ч)

а) $\times 1\ 650$.

б) $\times 4\ 140$. Стрелками отмечены неглубокие ямки.

3.3. Ямочный рельеф

Ямки, создающие специфический рельеф на фрактограммах, представляют собой половину микропоры, через которую произошло разрушение. Различают равноосные ямки (рис. 11 и 12), ямки сдвига (овальные) (рис. 13), и ямки отрыва (удлиненные) (рис. 14). Следует отметить, что равноосные ямки не всегда выглядят равноосными на фрактограммах, полученных в растровом электронном микроскопе, поскольку для получения хорошего контраста, образец в микроскопе наклоняют на $30 - 45^{\circ}$, из-за чего внешний вид ямок слегка искажается.

Форма ямок зависит от направления напряжений, определяющих рост микропор (рис. 10). Когда разрушение происходит в результате одноосного растяжения, ямки обычно имеют равноосную форму. Если происходит сдвиговая деформация (зоны сдвига или разрушение в результате кручения), то ямки имеют удлиненную параболическую форму,

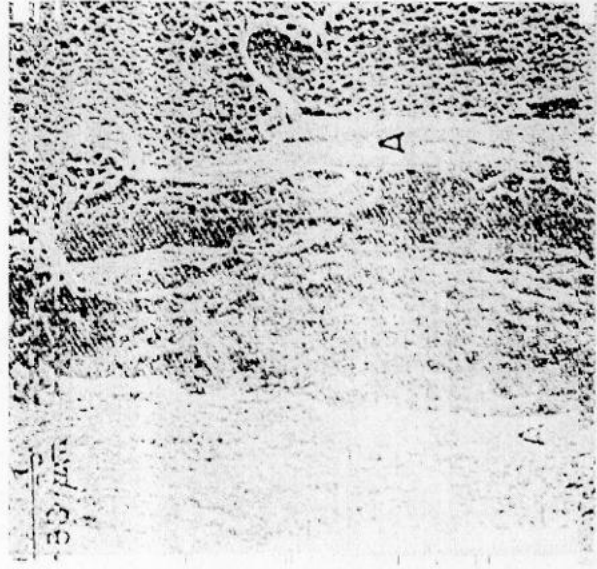


Рис. 24. Микропоры в сочетании с гребнями отрыва.

Поверхность образца сплава Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al после закалки с 900°C и старения в течение 144 ч при 350°C.

а) Увеличение – x260, б) Увеличение – x1 300.

3.8.6. Сочетание ямок с межзерненным разрушением

Сочетание ямок с межзерненным разрушением встречается реже, чем гребни отрыва в сочетании с межзерненным разрушением. В металлах, где межзерненное разрушение является предпочтительным, но не единственным путем развития трещины, остальной материал может разрушаться путем слияния микропор и образовывать ямочный рельеф. (См. рис.25.)

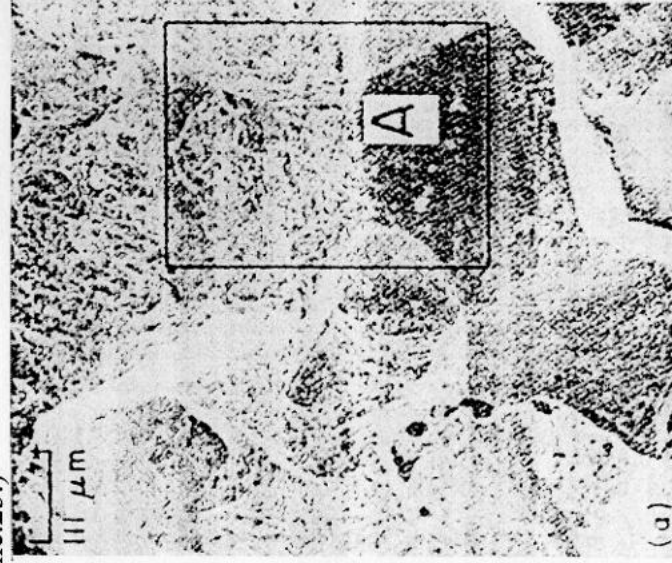


Рис. 25. Перемежающиеся участки ямочного рельефа и межзерненного разрушения
Сталь 3340, подвергнутая не полностью обратному отпускному охрупчиванию

Видны две области разрушения, характеризующиеся ямочным рельефом (B и C) и межзерненным разрушением (D, E, F) а) Увеличение – x90, б) Увеличение – x225.

причем на противоположных поверхностях разрушения ямки развернуты в противоположных направлениях. Ямки отрыва наблюдаются в материалах подвергшихся расклиниванию. Такие ямки имеют удлиненную форму, а на противоположных поверхностях разрушения ориентированы одинаково.

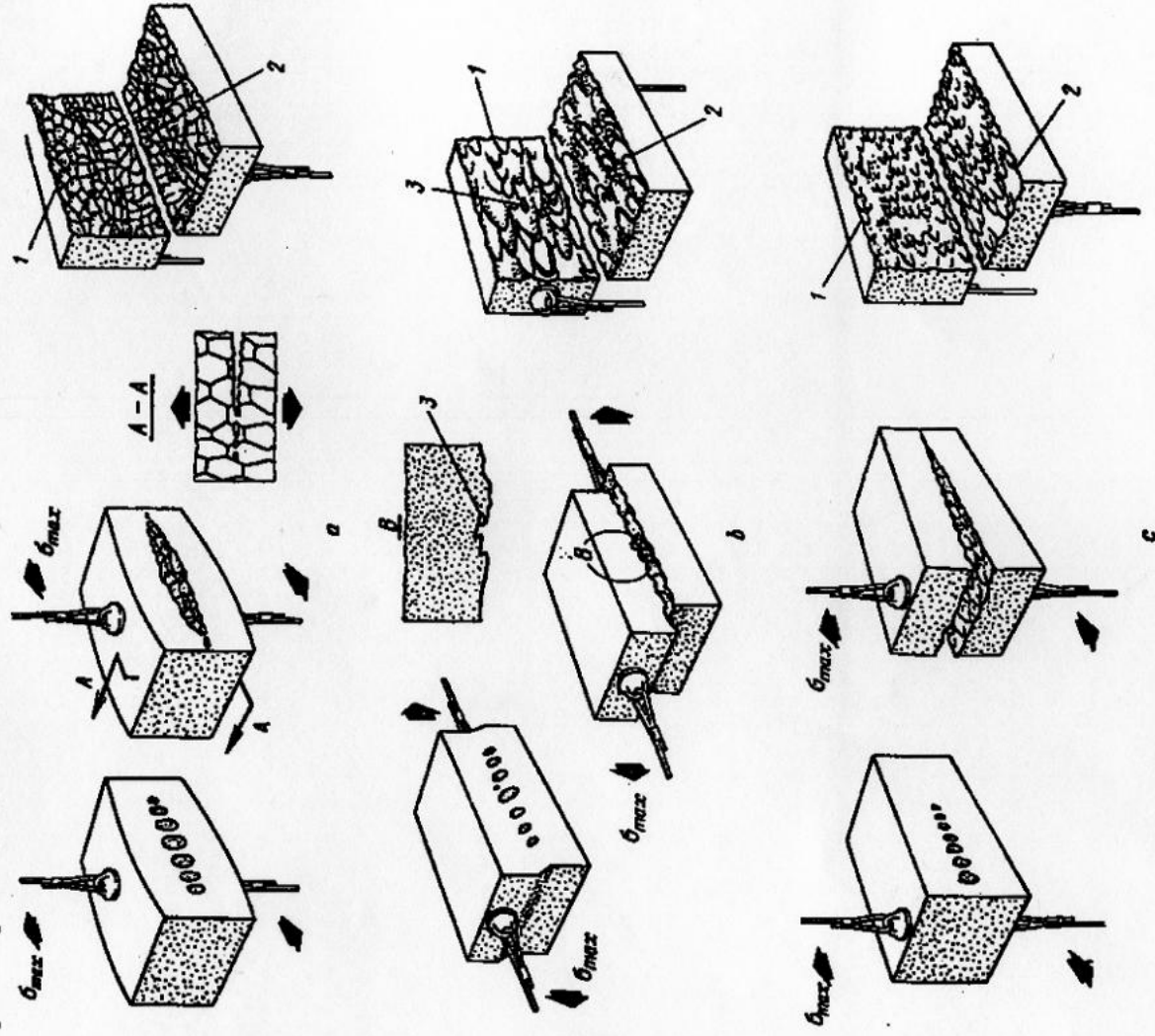


Рис. 10. Влияние направления максимального напряжения (σ_{\max}) на форму ямок: а) равноосные ямки (растяжение); б) ямки сдвига (сдвиг); в) ямки отрыва (расклинивающий отрыв)

При малом увеличении на поверхности разрушения можно наблюдать отдельные участки вязкого разрушения, которое часто называют волокнистым и участки разрушения расклевыванием. Волокнистые участки обычно наблюдаются вблизи свободной поверхности или в очаге зарождения разрушения. Участки скола — на поверхностях плоских изломов, в зонах высокой скорости распространения трещины.

При большом увеличении можно увидеть, что зона волокнистого излома, состоит из ямок, а в зоне расклевывания обнаруживаются либо плоскости скола (скол), либо плоскости скола и фасетки скола (квазискол).

На рис. 11 показан излом, содержащий одновременно ямки и фасетки скола. На верхней части фраттограммы, показанной на рис. 11а, отображен участок образования разрушенного расклевыванием, а на нижней — участок, разрушенный путем слияния микроразрушений.

Следует обратить внимание на участок А, рис. 11с, представляющий собой увеличенную центральную часть рис. 11а. Участок А, находящийся в ямочной зоне, может быть отнесен к сколу, но его можно интерпретировать также как результат разрушения вдоль

границы зерна, или представить, что он представляет собой сильно вытянутую поверхность микропоры. Однозначная идентификация участка А возможна только в случае обнаружения вторичных признаков, например, ручьиного узора (тогда скол) или гребней отрыва (см. п.3.4) (тогда это дно вытянутой поры).

На рис. 12 показана поверхность стали 1040, разрушенной при комнатной температуре. Хорошо видно как от ямки к ямке различаются очаги зарождения пор. Ямки, видимые в поле зрения, зарождались на сферических выделениях или включениях, обозначенных буквой А. Над ними на участке В зарождалось разрушение вследствие разрушения небольшой колонии перлита, которая хорошо видна на рис. 12b. Три ямки на рис. 12b имеют по существу одну и ту же форму; на их внутренних стенках видно очень немного деталей. Вблизи этих ямок можно различить тонкие волосные линии скольжения, отмеченные буквой С. Это свидетельствует о том, что рост ямок происходил путем скольжения по многим действующим системам скольжения.

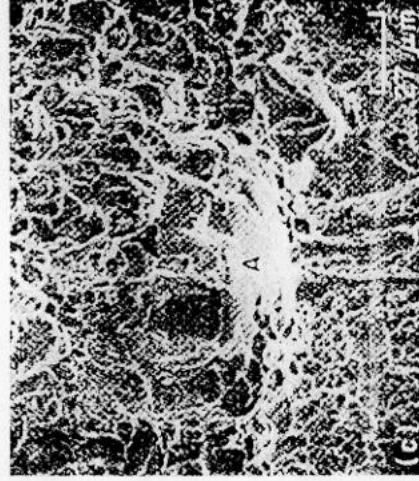
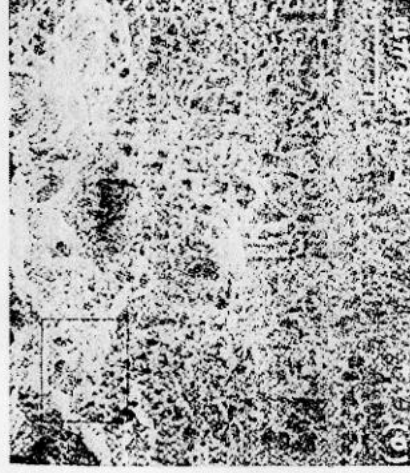


Рис. 11. Сталь 1040, разрушенная при комнатной температуре:

- а) $\times 147$. Направление разрушения вызвано слиянием равноосных ямок, в верхнем – раскалыванием.
- б) $\times 750$. Увеличенная верхняя часть рисунка а).
- Скол.
- с) $\times 370$. Центральная часть рис. а). Гладкая поверхность А не обнаруживает признаков скола, например, ручьиного узора, и потому не может быть однозначно отнесена к сколу

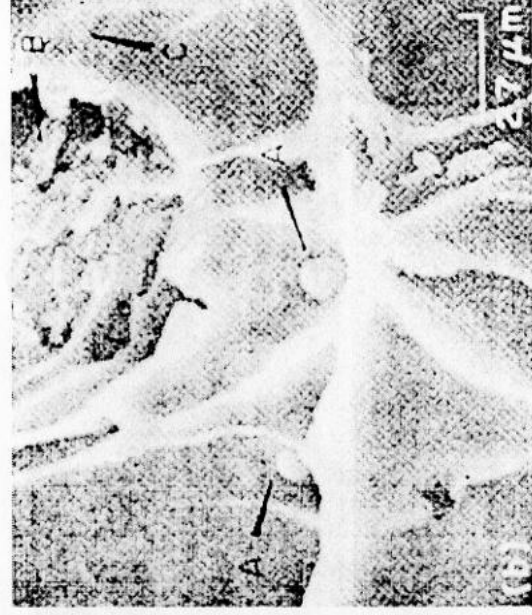


Рис. 12. Два различных типа мест зарождения ямок:

Ямки в центре зародились на границе раздела между матрицей и глобулярными включениями (А), которые могут представлять собой частицы сульфидов, оксидов или перлита. Видимые на рисунке ямки – равноосные, из-за наклона образца выглядят удлиненными. Вблизи ямок, в С, наблюдаются волнистые, тонкие линии скольжения.

а) $\times 1\ 500$, б) $\times 3\ 720$.

На рис. 13 показана поверхность образца разрушенного сдвигом. Ямки имеют овальную форму и параллельны направлению сдвига (на сопряженной поверхности излома ямки развернуты в противоположном направлении). Для ямок сдвига достаточно трудно идентифицировать место зарождения микропоры, так как карбидные частицы или включения часто прячутся под поверхностью.

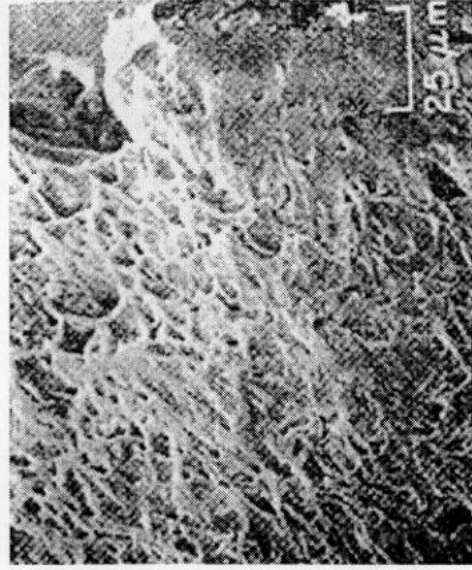


Рис. 13. Ямки сдвига. $\times 400$.

Ямки отрыва похожие на вытянутые параболы и развернутые к месту зарождения трещины показаны на рис. 14. Ямки отрыва по внешнему легко можно спутать с ямками сдвига. Характерным их отличием является то обстоятельство, что на сопряженной поверхности (поверхность на другой половине разрушенного образца), ямки отрыва будут развернуты в том же направлении.

Размеры и форма ямок редко бывают одинаковыми. В технических материалах с характерными для них заметными колебаниями размеров и распределений дисперсных частиц может наблюдаться и широкий диапазон размеров ямок. На рис. 15 представлена фрактограмма алюминиевого сплава 2024-T5 после испытания на вязкость разрушения. Ямки среднего размера, содержащие разрушенные включения, оконтурены гребнями отрыва и резко отличаются от чрезвычайно мелких ямок (участки, отмеченные буквой А), расположенных на некоторых пологих склонах еще более крупных ямок.

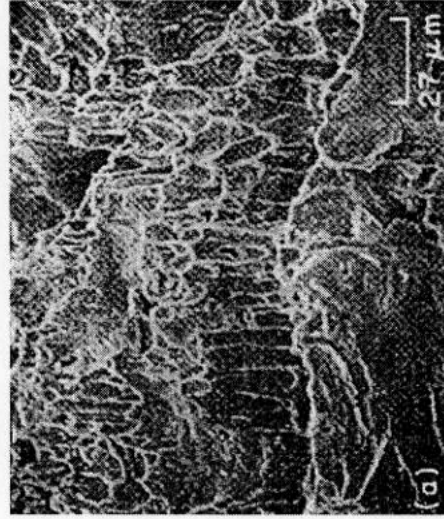


Рис. 14 Ямки отрыва. $\times 375$

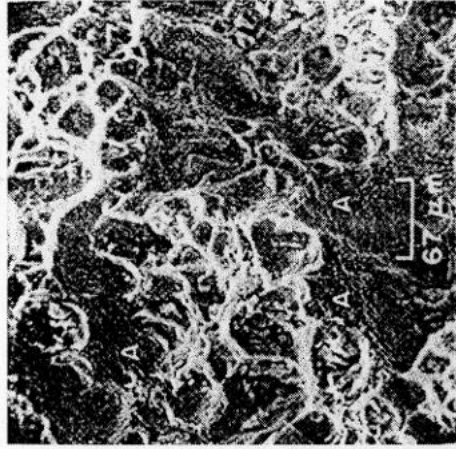


Рис. 16 Ямки в широком диапазоне размеров.

(Поверхность излома образца алюминиевого сплава 2024-T5) На стенках крупных ямок видно множество мелких. Эти места помечены буквой А. x150

3.4. Гребни отрыва

Гребни отрыва имеют острый край и возникают в тех случаях когда позади главного фронта трещины остались небольшие неразрушенные области. Их можно наблюдать как на фрактограммах квазискола (там они разделяют фасетки скола), так и на фрактограммах с ямками (разделяют группы ямок). Фрактограмм, содержащих только гребни отрыва, не существует. Наиболее часто гребни отрыва встречаются в зоне образования шейки (рис. 21 и 24).

3.5. Фасетки межзеренного разрушения

Фасетки межзеренного разрушения представляют собой результат расщепления материала по границам зерен. Такое разрушение, в основном, происходит путем катастрофического хрупкого расщепления по границам (рис.16). Межзеренное разрушение идентифицируют по наличию зернограничных фасеток, на которых никогда не бывает ручьистых узоров, по наличию точек стыка трех (и более) зерен, и рассматривают как основной механизм разрушения, если такие фасетки составляют статистически значимую часть поверхности разрушения.

3.6. Высокотемпературный межзеренный рельеф

Высокотемпературный межзеренный рельеф характеризуется вытянутыми зернами со скругленными краями. Здесь нет плоских гладких фасеток, которые наблюдаются при низкотемпературном межзеренном разрушении. Мелкие детали на поверхности свидетельствуют об окислении поверхности в процессе разрушения. В качестве примера высокотемпературного рельефа на рис. 17 приведена поверхность излома трубы из алюминия-вого сплава, разрушившейся при температуре близкой к плавлению

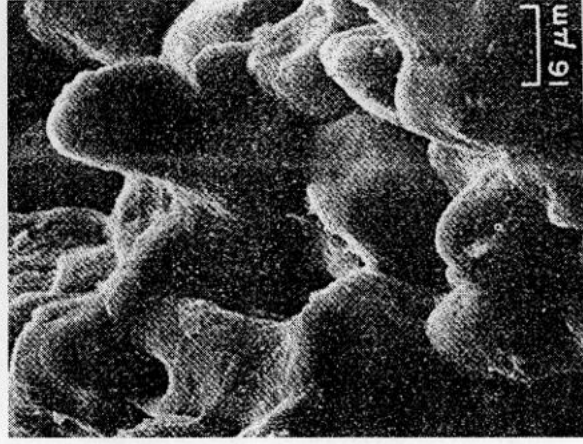
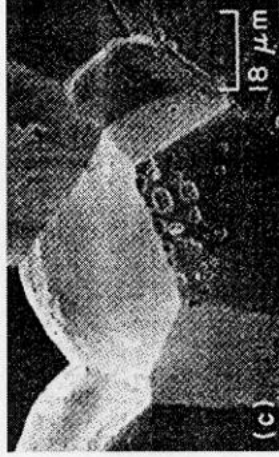


Рис.16. Межзеренное хрупкое разрушение в вольфраме (а) иридии (b) и сплаве W-3%

Re(c):

- a) x 700.
- d) x 220,
- c) x 560.

Рис. 17. Межзеренное разрушение при высокой температуре. x640.

В некоторых случаях на фрактограммах можно обнаружить углубления, напоминающие поры и возвышения с характерными наглядывающимися друг на друга фасетками. На рис. 18 показан рельеф границ зерен вблизи боковой поверхности образца меди, разрушенной в процессе испытаний на ползучесть при температуре 540 °С.

3.7. Усталостные бороздки

Усталостные бороздки образуются при распространении трещины по плоскостям скопления в случае усталостного разрушения материалов. На рис. 19 изображены детали усталостных бороздок. Линии бороздок указывают направление разрушения. На рис. 19 слева – к нижнему правому углу фрактограммы, на рис. 19 справа – к верхнему правому углу. Скорость распространения трещины на рис. 19 справа значительно превышает скорость распространения на рис. 19 слева.

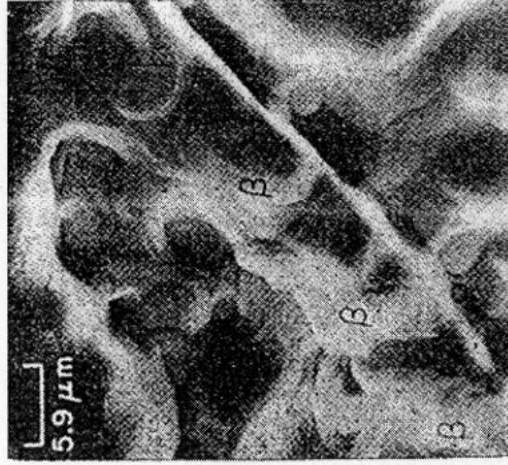


Рис. 18. Высокотемпературный рельеф границ зерен.

Поверхность разрушения содержит много пор и возвышенностей, имеющих геометрический рисунок в виде ступенчатых фасеток. Буквой β обозначены три возвышенности. $\times 1700$



Рис. 19. Усталостные бороздки в алюминиевом сплаве 2024-Т3

На рис. слева показано очень слабое взаимодействие усталостного разрушения с включением в центре снимка. $\times 2600$.

На рис справа, полученном при высоких скоростях распространения трещины, можно обнаружить, что вблизи фронта распространения трещины (вблизи ее вершины) образуется значительная по протяженности пластическая зона, которая может обуславливать интенсивное вторичное растрескивание. Каждая вторичная трещина распространяется как усталостная. Вторичные трещины могут распространяться по кристаллографическим плоскостям отличным от плоскости распространения основной трещины. Создается сложная, как на этом рисунке, сетка вторичных усталостных бороздок. Увеличение – $\times 600$

3.8. Смешанный рельеф разрушения

Фрактограммы смешанного рельефа представляют собой перемешанные¹ (не последовательные) сочетания: а) скола, б) ямочного рельефа, в) гребней отрыва, г) усталостных бороздок, д) межзеренного разрушения. Особенности фрактограмм каждого из упомянутых типов уже рассмотрены выше, поэтому сейчас рассмотрим наиболее часто встречающиеся комбинации.

3.8.1. Скол в сочетании с ямками

Скол в сочетании с ямками наблюдают в α и $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавах, в низколегированных сталях в диапазоне температур хрупко-вязкого перехода. Перебегающие фасетки скола и ямки показаны на рис. 20. Фасетки скола возникли при разрушении α -фазы титана, а нечетко очерченные ямки возникли в β -фазе, отмеченной стрелками.

¹ Фрактограммы смешанного типа не следует путать с фрактограммами полученными на образцах разрушающихся в результате последовательной смены механизмов разрушения. При последовательной смене механизмов разрушения на фрактограммах видны довольно обширные, последовательно сменяющие друг друга, участки, которые можно рассматривать по отдельности (см., например, рис. 11).

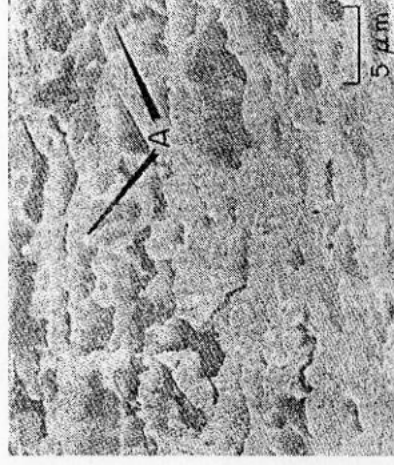
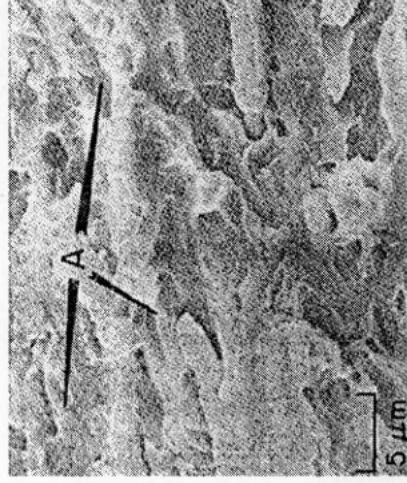


Рис. 20. Перебегающие фасетки скола и ямки на двух участках излома Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo. Увеличение – $\times 2\ 000$.

3.8.2. Скол в сочетании с гребнями отрыва

Скол в сочетании с гребнями отрыва (рис. 21) наблюдается в анизотропных однофазных металлах отличающихся высокой пластичностью и умеренной прочностью, а также в двухфазных системах, в которых фазы характеризуются различными механическими свойствами или различной симметрией кристаллических решеток.

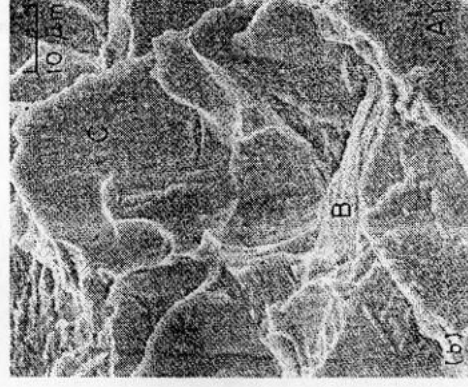
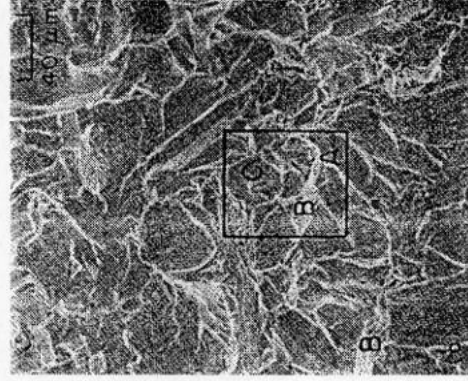


Рис. 21. Скол в сочетании с гребнями отрыва в нелегированном титане (Область, выделенная на рис. а, показана на рис. б.) Фасетки скола А и С разделены гребнями отрыва В. а) Увеличение – $\times 250$, б) Увеличение – $\times 1000$.

3.8.3. Скол в сочетании с усталостными бороздками

Скол в сочетании с усталостными бороздками наблюдается в высокопрочных металлах, отличающихся низкой пластичностью, а также в металлах с пониженной кристаллографической симметрией (рис. 22). Зерна благоприятно ориентированные к действию циклических напряжений, разрушаются внезапным раскалыванием, а благоприятно ориентированные к циклической нагрузке – в результате роста усталостной трещины.

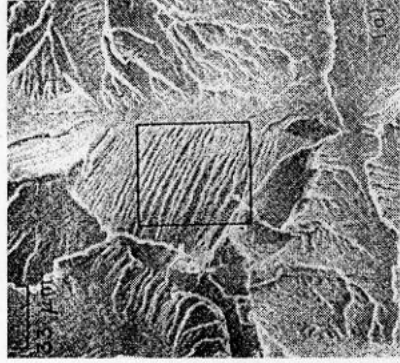


Рис. 22. Скол в сочетании с усталостными бороздками. Между ступеньками скола можно обнаружить тонкие усталостные бороздки А и В, показанные стрелками. а) Увеличение – $\times 300$, с) Увеличение – $\times 3\ 000$.

3.8.4. Скол в сочетании с фасетками межзеренного разрушения

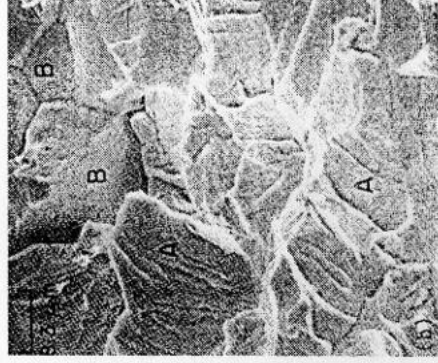
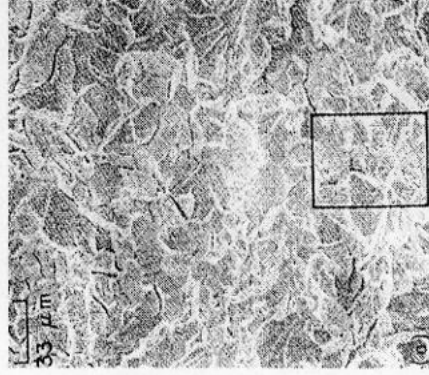


Рис. 23. Скол в сочетании с фасетками межзеренного разрушения

Поверхность разрушения состоит в основном из фасеток скола таких как в местах, обозначенных буквой А и перемежаются с участками межзеренного разрушения, обозначенных буквой В.

а) Увеличение – $\times 300$,

б) Увеличение – $\times 1\ 200$.

Скол в сочетании с фасетками межзеренного разрушения наблюдается в тех случаях, когда эффективные напряжения по границам зерен и в зернах приблизительно равны. При этом, если предпочтительный путь разрушения по границам зерен не является непрерывным и если напряжение скола относительно мало, то те участки, которые не разрушились с образованием фасеток межзеренного разрушения, могут разрушиться внутризеренным сколом. Пример такого разрушения приведен на рис. 23.

3.8.5. Сочетание ямочного рельефа и гребней отрыва

Сочетание ямочного рельефа и гребней отрыва часто наблюдается в высокопрочных конструкционных материалах с высокой вязкостью, таких как титан и сталь. Пример сочетания микропор и гребней отрыва приведен на рис. 24. Фрактограмма 24а содержит обширные области ямок, соединенные двумя гребнями отрыва, отмеченными буквой А. При большем увеличении можно наблюдать детали гребней отрыва, помеченные буквой В, прилегающие к области ямочного рельефа.

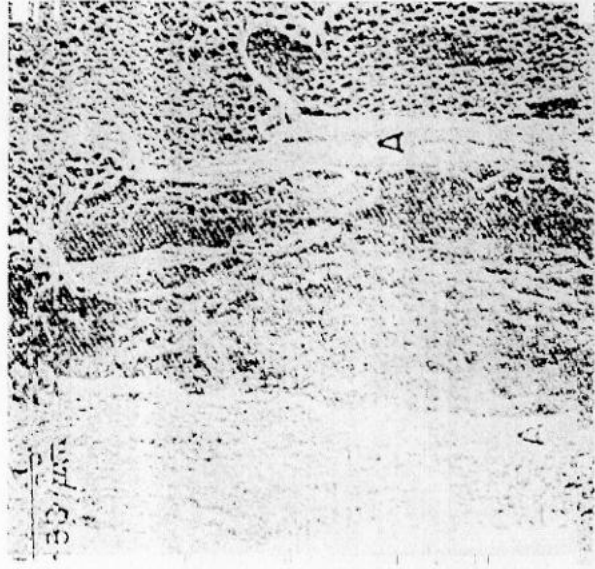


Рис. 24. Микропоры в сочетании с гребнями отрыва.

Поверхность образца сплава Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al после закалки с 900°C и старения в течение 144 ч при 350°C.

а) Увеличение – x260, б) Увеличение – x1 300.

3.8.6. Сочетание ямок с межзерненным разрушением

Сочетание ямок с межзерненным разрушением встречается реже, чем гребни отрыва в сочетании с межзерненным разрушением. В металлах, где межзерненное разрушение является предпочтительным, но не единственным путем развития трещины, остатальной материал может разрушаться путем слияния микропор и образовывать ямочный рельеф. (См. рис.25.)

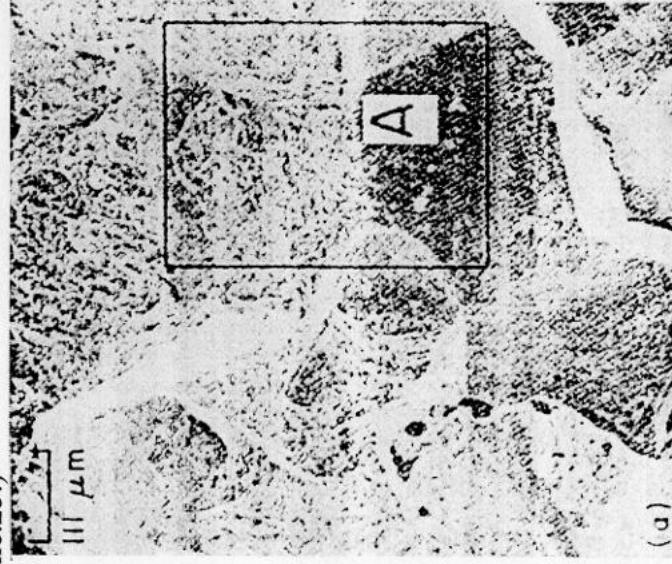


Рис. 25. Переменяющиеся участки ямочного рельефа и межзерненного разрушения

Сталь 3340, подвергнутая не полностью обратному отпускному охрупчиванию

Видны две области разрушения, характеризующиеся ямочным рельефом (B и C) и межзерненным разрушением (D, E, F) а) Увеличение – x90, б) Увеличение – x225.