

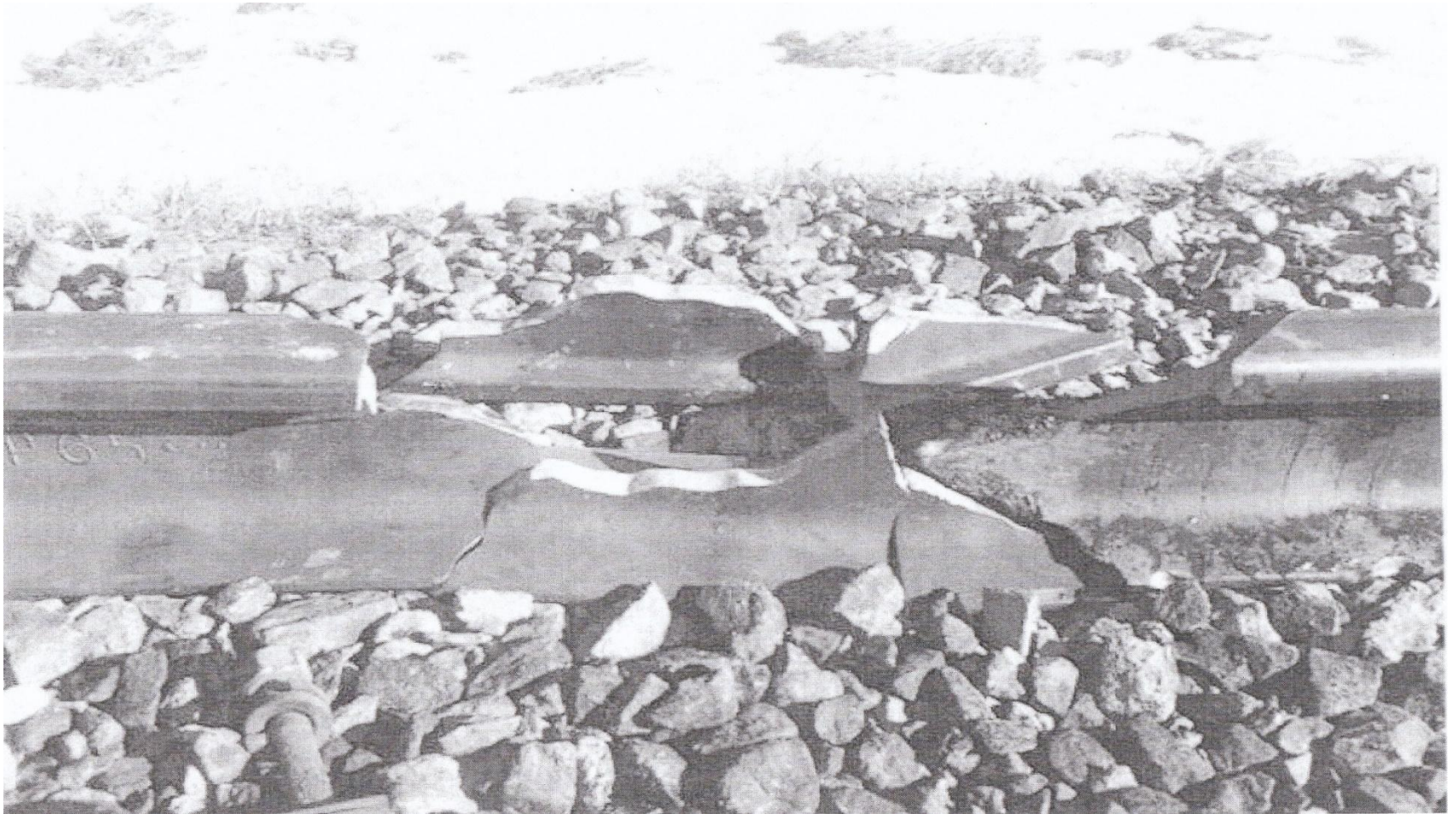
## Лекция 5.

# Разрушение материалов

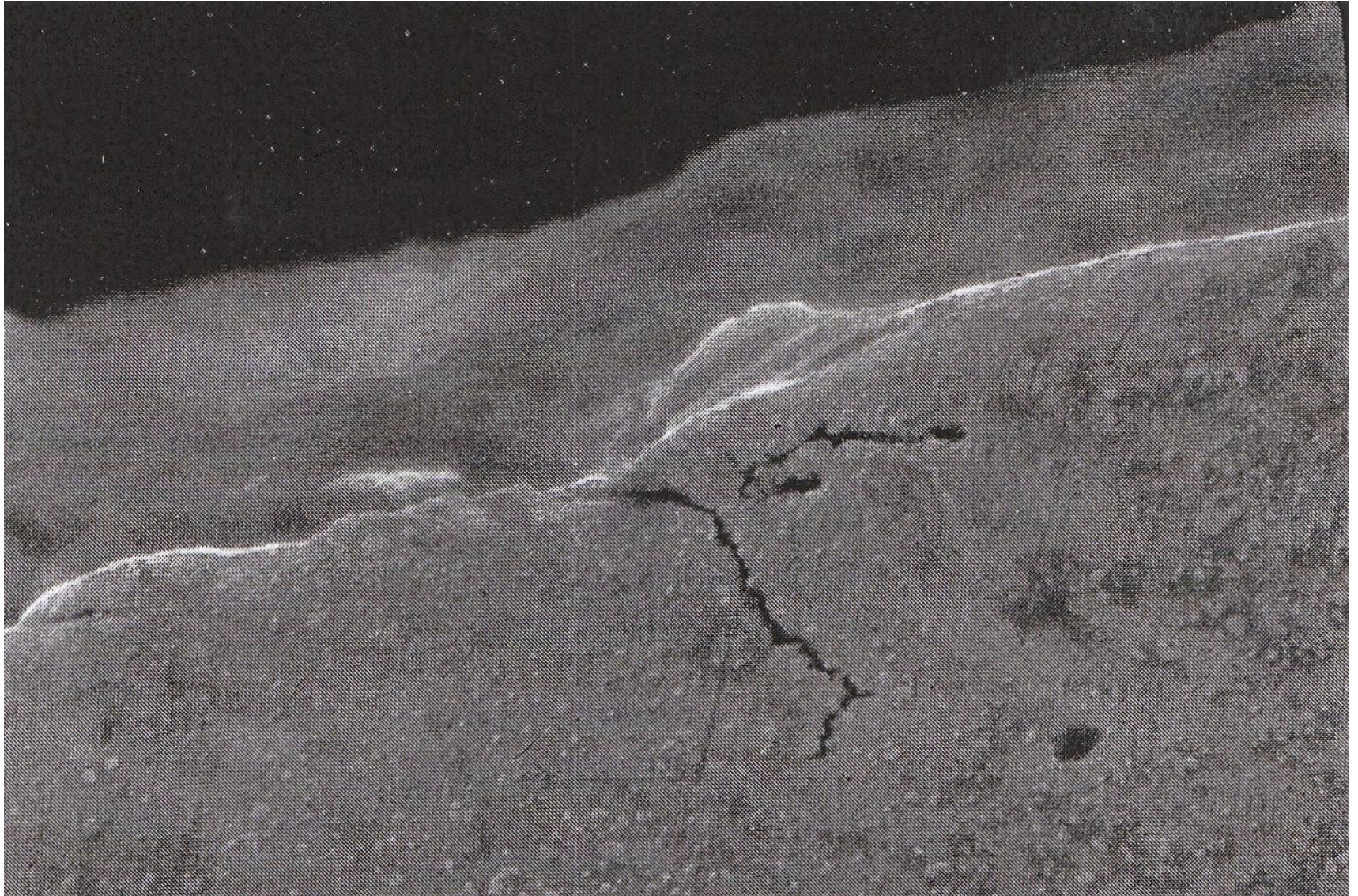
# Введение

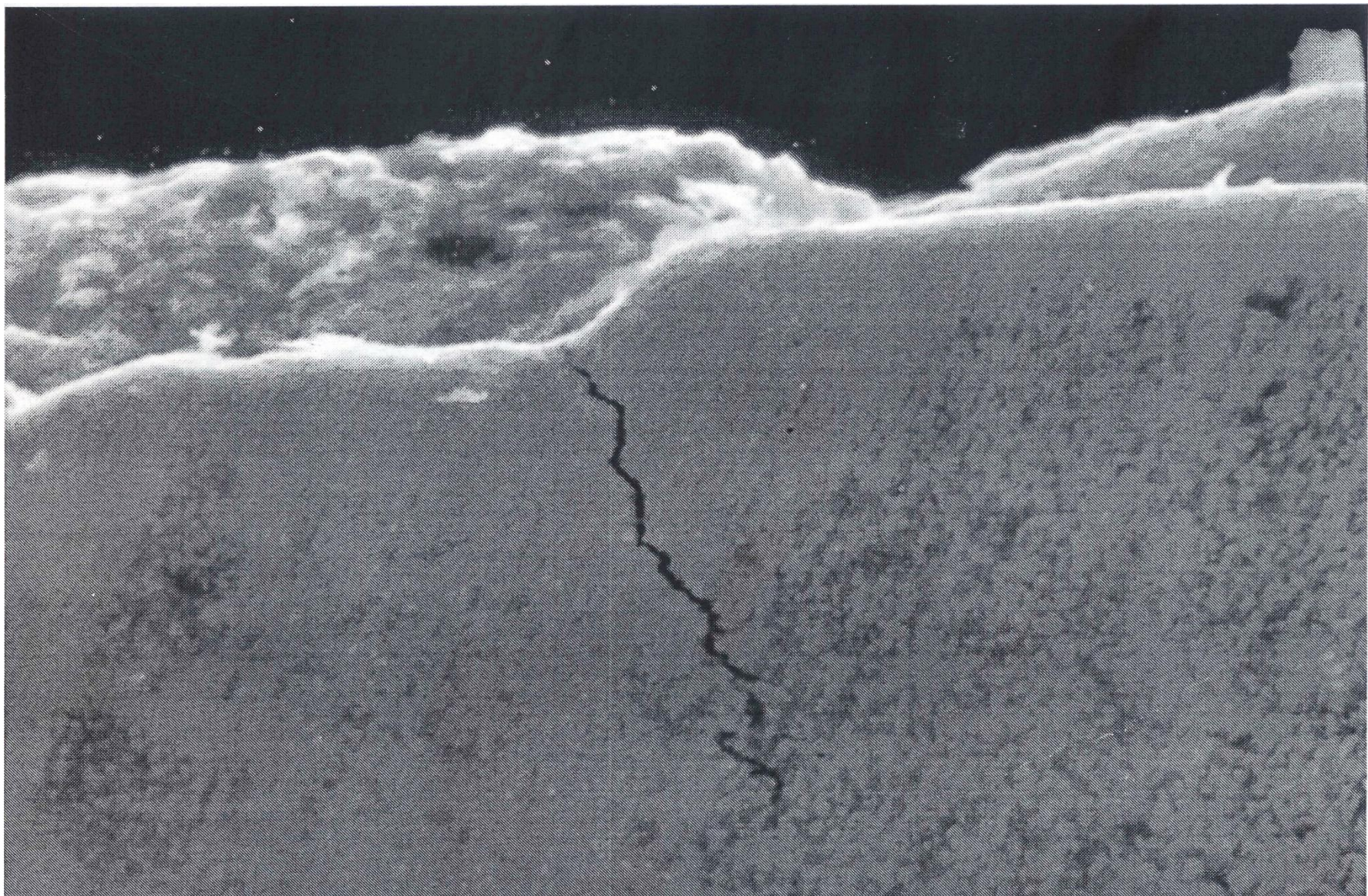
- Разрушение представляет собой чрезвычайно сложный, многостадийный процесс, управляемый большим количеством факторов. В зависимости от изменяющихся условий можно получить весьма различные характеристики процесса разрушения. О сложности и неоднозначности явления свидетельствует тот факт, что нет общепринятого определения разрушения и общепринятой классификации видов разрушения.
- В общем случае механическое разрушение может быть определено как любое изменение размера, формы или свойств материала конструкции, машины или отдельной детали, в результате которого она утрачивает способность удовлетворительно выполнять свои функции. Основываясь на этом, *вид разрушения* можно определить как физический процесс или несколько взаимосвязанных между собой процессов, приводящих к разрушению.

# Разрушение рельса

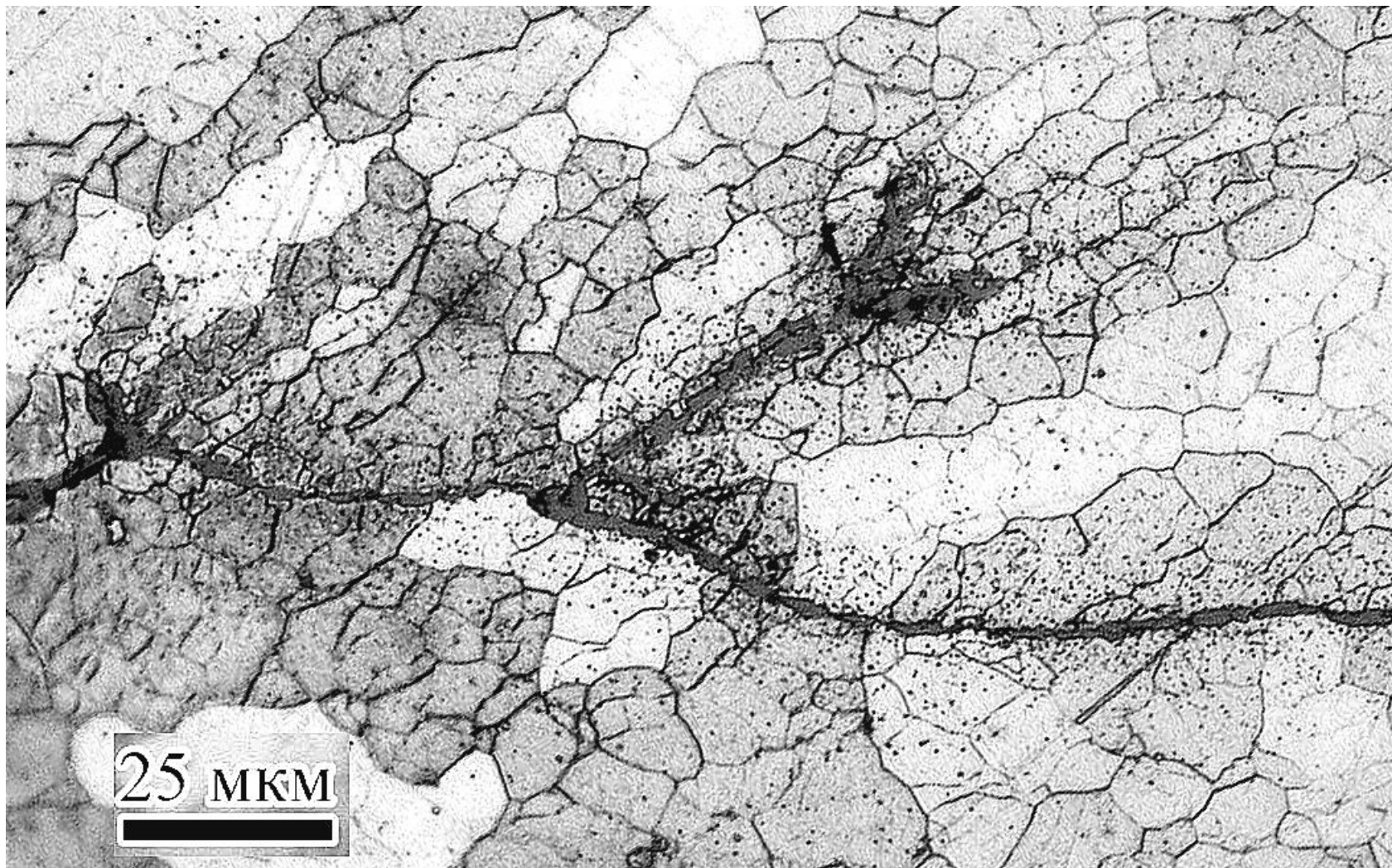


# Усталостная трещина





# Трещины в железе, образовавшиеся при горячей деформации сжатием



# Трещины, возникающие при горячей деформации в титане ВТ1-0



## Хрупкое и вязкое (пластическое) разрушение

**Хрупкое разрушение (ХР)** происходит при минимальном рассеянии энергии и малой предшествующей пластической деформации. ХР происходит путем скола по определенным атомным плоскостям, а также путем излома по границам. Можно выделить две особенности ХЗ: разрушающее напряжение часто ниже рассчитанной прочности, во-вторых, разрушающие напряжения имеют значительный разброс. Экспериментально установлено, что ХР возникает из-за множества трещин, имеющих на поверхности материала, иногда называемых трещинами Гриффитса.

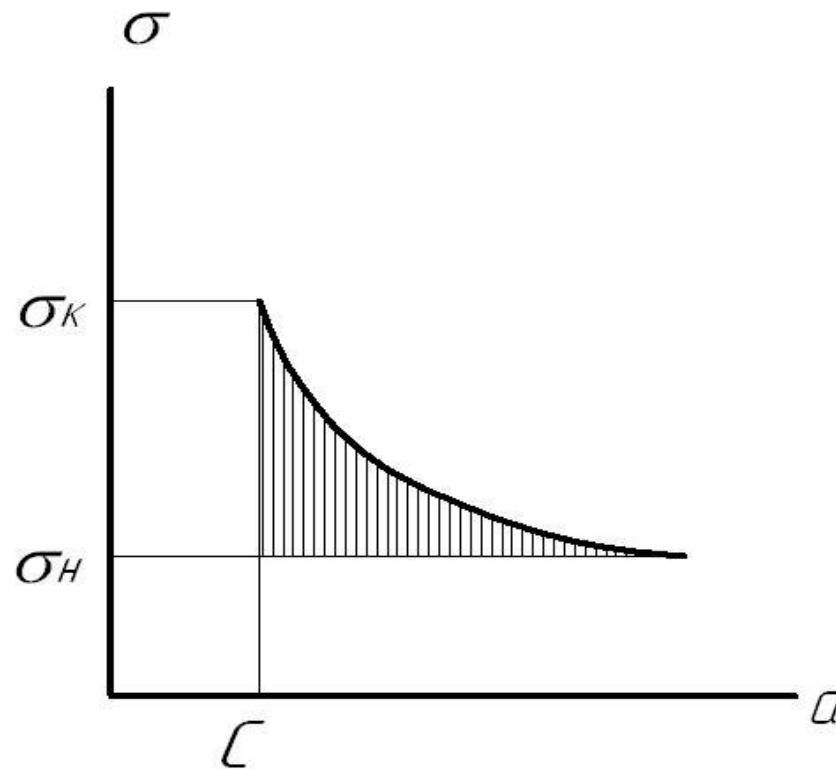
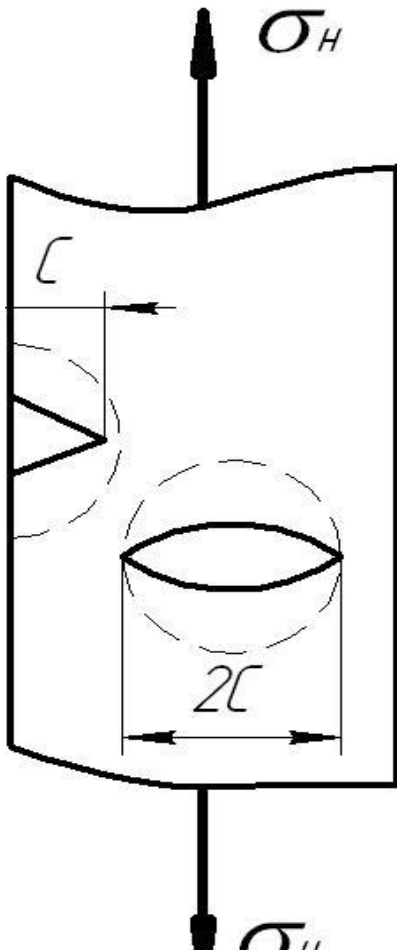
**Вязкое разрушение (ВР)** сопровождается значительной пластической деформацией. Эволюцию ВР можно представить в виде следующих событий.

- Накопление дефектов решетки, увеличение внутренней энергии, локализация пластической деформации.
- Образование микротрещин ( $c < 0,1$  мкм) из крупных (200-300 шт.) скоплений дислокаций.
- Скачкообразный рост микротрещин до  $c > c_{кр}$  при активной пластической деформации в вершине трещины.
- Быстрый рост микротрещин, разрушение материала



# Концентрация напряжений в материале с трещиной

$$\sigma_K = \sigma_H \sqrt{c/r}$$



# Энергетический критерий хрупкого разрушения

Материалу содержащему трещину присуще определенное *критическое напряжение*, при котором инициируется хрупкое разрушение. Такое поведение материалов является причиной возможных аварий.

Если в пластине толщиной  $t$  длина трещины увеличилась от  $s$  до  $s+\delta s$ , то в этом случае, работа совершённая внешней силой  $\delta W$ , должна превышать изменение упругой энергии  $dU$  и энергии, поглощенной в вершине трещины:

$$\delta W > dU + G t \delta s,$$

Где  $G$  – энергия образования единицы площади трещины,  $t \delta s$  – увеличение площади трещины.  **$G$  называют вязкостью разрушения.**

При высокой вязкости разрушения распространение трещины затруднено. Так вязкость разрушения меди составляет  $10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, а стекла  $\sim 10$  Дж/м<sup>2</sup>.

## Устойчивость пластины с трещиной.

Рассмотрим растяжение пластины, которое зафиксировано. Внешняя сила не совершает работы ( $\delta W=0$ ). Тогда -  $dU = Gtdc$ . Пусть растягивающее напряжение в пластине равно  $\sigma$ , а деформация  $\varepsilon$ . Тогда удельная энергия упругой деформации  $U = \sigma\varepsilon/2 = \sigma^2/2E$ . Если в растягиваемой пластине появляется трещина длиной  $c$ , то реально вблизи трещины произойдет изменение упругой энергии:

$$U = - (\sigma^2/E) / (\pi c^2 t/2).$$

При увеличении длины трещины на  $\delta c$  изменение энергии

$$\delta U = (dU/dc)\delta c = - (\sigma^2/E)(2\pi c t/2)\delta c.$$

$$G = \sigma^2 \pi c / E$$

$$\sigma \sqrt{\pi c} = \sqrt{EG}$$

# Критерий хрупкого разрушения

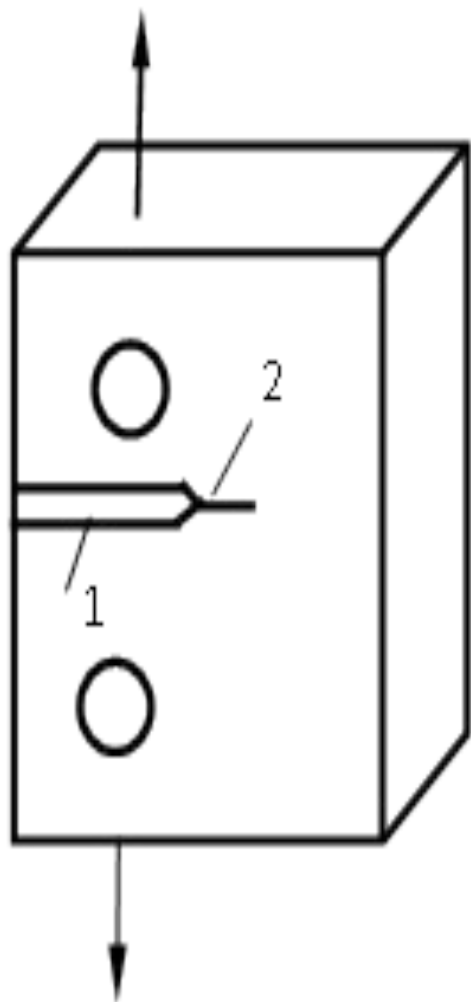
Смысл левой части полученного уравнения состоит в том, что хрупкое разрушение наступает когда при фиксированном напряжении  $\sigma$  трещина в материале достигает некоторой **критической длины  $s$** . Другими словами, разрушение происходит, когда в материале, содержащем трещину длиной  $s$  достигается **критическое напряжение  $\sigma$** . Правая часть уравнения зависит только от свойств материала, а именно, модуля упругости  $E$  и вязкости разрушения  $G$ . **Таким образом, критическая комбинация внешнего напряжения и длины трещины, при которой происходит хрупкое разрушение, является характеристикой материала.**

Параметр  $\sigma\sqrt{\pi s}$  обозначают  $K$  (размерность  $\text{МН}/\text{м}^{3/2}$ ) и называют **коэффициентом интенсивности напряжений**. Хрупкое разрушение наступает при выполнении критерия:

$$K = K_c,$$

где  $K_c = \sqrt{EG}$  - Критический коэффициент интенсивности напряжений.

## Испытания для определения $K_{1C}$



Для расчета коэффициента интенсивности напряжений проводят испытания специальных образца. У образца со стороны одностороннего надреза (1) создается трещина (2) заданной длины. При испытании на растяжение записывается диаграмма распространения трещины по отношению к растягивающему усилию. При использовании данного метода определения коэффициента интенсивности напряжений его обозначают  $K_{1C}$  и рассчитывают по формуле:

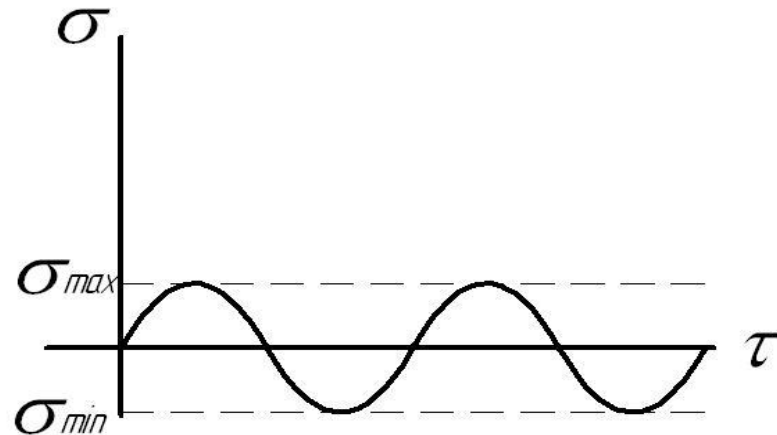
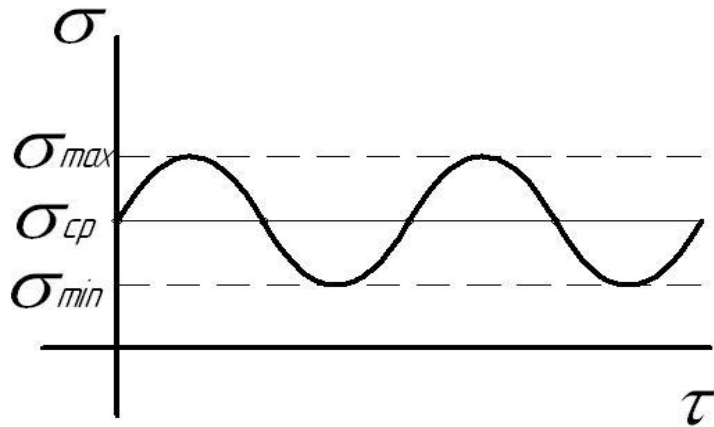
$$K_{1C} = Y\sigma\sqrt{t\pi c},$$

где  $Y$  – коэффициент, учитывающий форму и расположение трещины.

## Величины G и K<sub>c</sub>

Материал	G, кДж/м <sup>2</sup>	K <sub>c</sub> , МН/м <sup>3/2</sup>
Металлы (Cu Ni Al)	100 - 1000	100 - 350
Низкоуглеродистая сталь	100	140
Высокопрочная сталь	30 - 80	50 - 150
Титановые сплавы	20 - 114	55 - 115
Алюминиевые сплавы	8 - 30	23 - 45
Композиты	10 - 30	30 - 45
Полимеры	6 - 7	1 - 4
Керамика	0,02 - 0,1	0,5 - 3
Стекло	0,01	0,7 - 0,8

# Усталостное разрушение

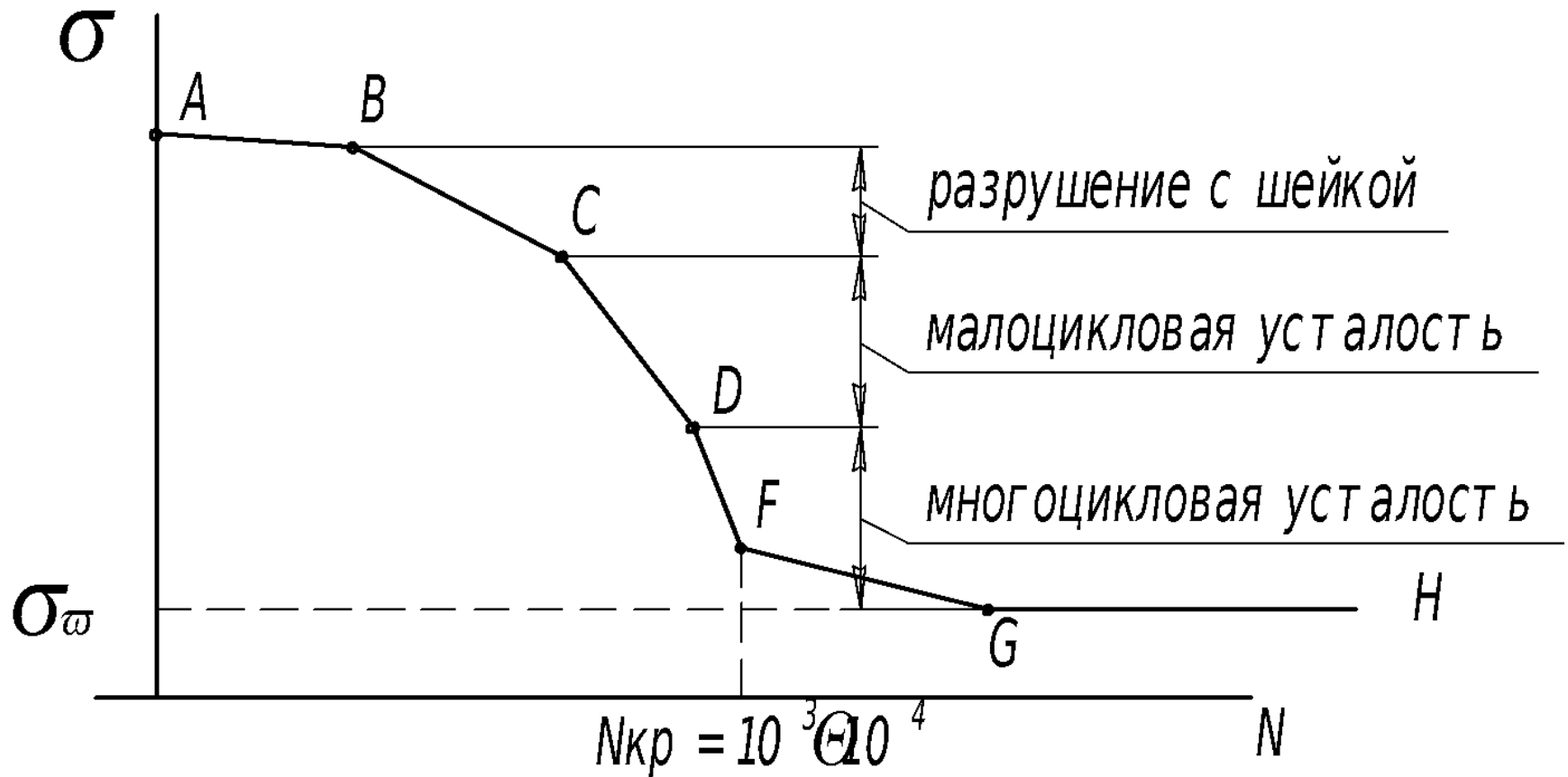


$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Термином «усталость» обозначают повреждения, возникающие под действием циклических напряжений. Обычно эти напряжения являются знакопеременными, т.е. растяжение сменяется сжатием, как в случае вращающегося вала. Усталость также может возникать в результате циклических изменений напряжения одного знака.

# Схема полной кривой усталости

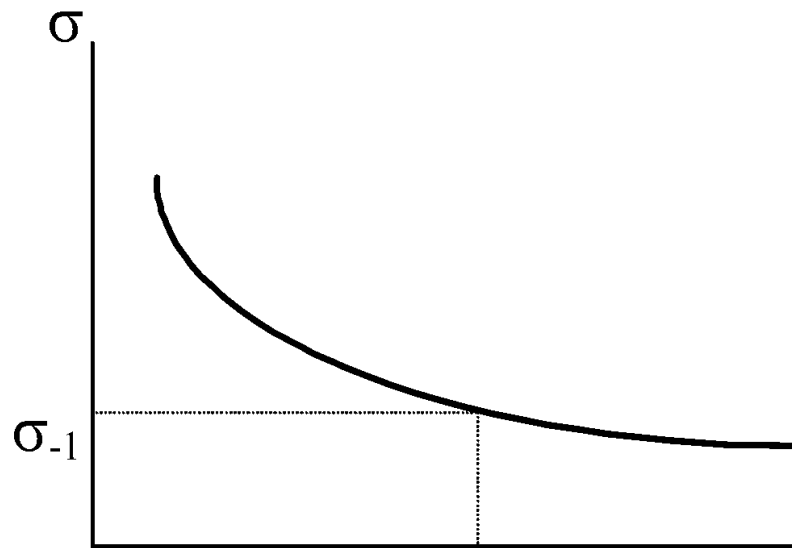
$\sigma_{\omega} \approx 0,5\sigma_T$  - предел выносливости (усталости).





# Зависимость напряжения разрушения $\sigma$ от числа циклов $N$

Практически горизонтальный участок зависимости  $\sigma = f(N)$  соответствует напряжению, которое не вызывает усталостного разрушения после неограниченно большого или заданного (базового) числа циклов. За базу испытаний обычно принимают  $10^7 - 10^8$  циклов.  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости.



# Усталость деталей

## Низкоцикловое поведение

Количество циклов до разрушения  $< 10^4$ . Разрушение происходит при напряжении выше предела текучести. Разрушение деталей не содержащих исходных трещин, когда  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  выше  $\sigma_{0,2}$  подчиняется закону:

$$\Delta \varepsilon N^b = C_1,$$

где  $\Delta \varepsilon$  - пластическая деформация до разрушения,  $N$  - число циклов до разрушения,  $C_1$  и  $b$  ( $b = 0,5 - 0,6$ ) - постоянные.

Примеры: детали время от времени испытывающих перегрузки,

## Высокоцикловое поведение

Разрушение происходит при напряжении ниже предела текучести. Количество циклов до разрушения  $> 10^4$ . Разрушение деталей не содержащих трещин, когда ни  $\sigma_{\max}$ , ни  $\sigma_{\min}$  не превышают предел текучести описываются уравнением:

$$\Delta \sigma N^a = C_2,$$

где  $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ,  $N$  - число циклов до разрушения,  $a$  ( $a = 1/8 - 1/15$ ) и  $C_2$  - постоянные.

Примеры: детали двигателей, колеса, оси, рельсы.

# Усталостное разрушение деталей, содержащих трещины

Крупные сварные конструкции (мосты, корпуса судов, сосуды высокого давления) всегда содержат трещины. Чтобы оценить срок службы конструкции, нужно знать, сколько циклов она может выдержать до того, как одна из трещин достигнет критической длины, при которой начнется ее катастрофическое распространение.

$$K = \sigma \sqrt{\pi c}, \quad K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi c}, \quad K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi c},$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi c}.$$

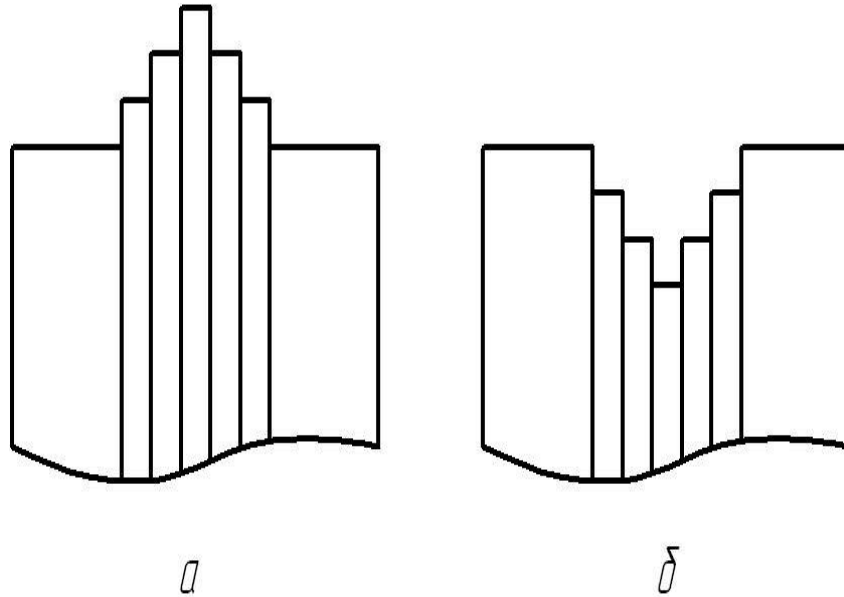
Медленный рост трещины описывается уравнением:

$$dc/dN = A(\Delta K)^m$$

где  $A$  и  $m$  – константы. Если длина исходной трещины задана  $c_0$ , а окончательная длина трещины  $c_f$ , то допустимое количество циклов до разрушения можно определить по формуле:

$$N_f = (c_f - c_0) / A(\Delta K)^m$$

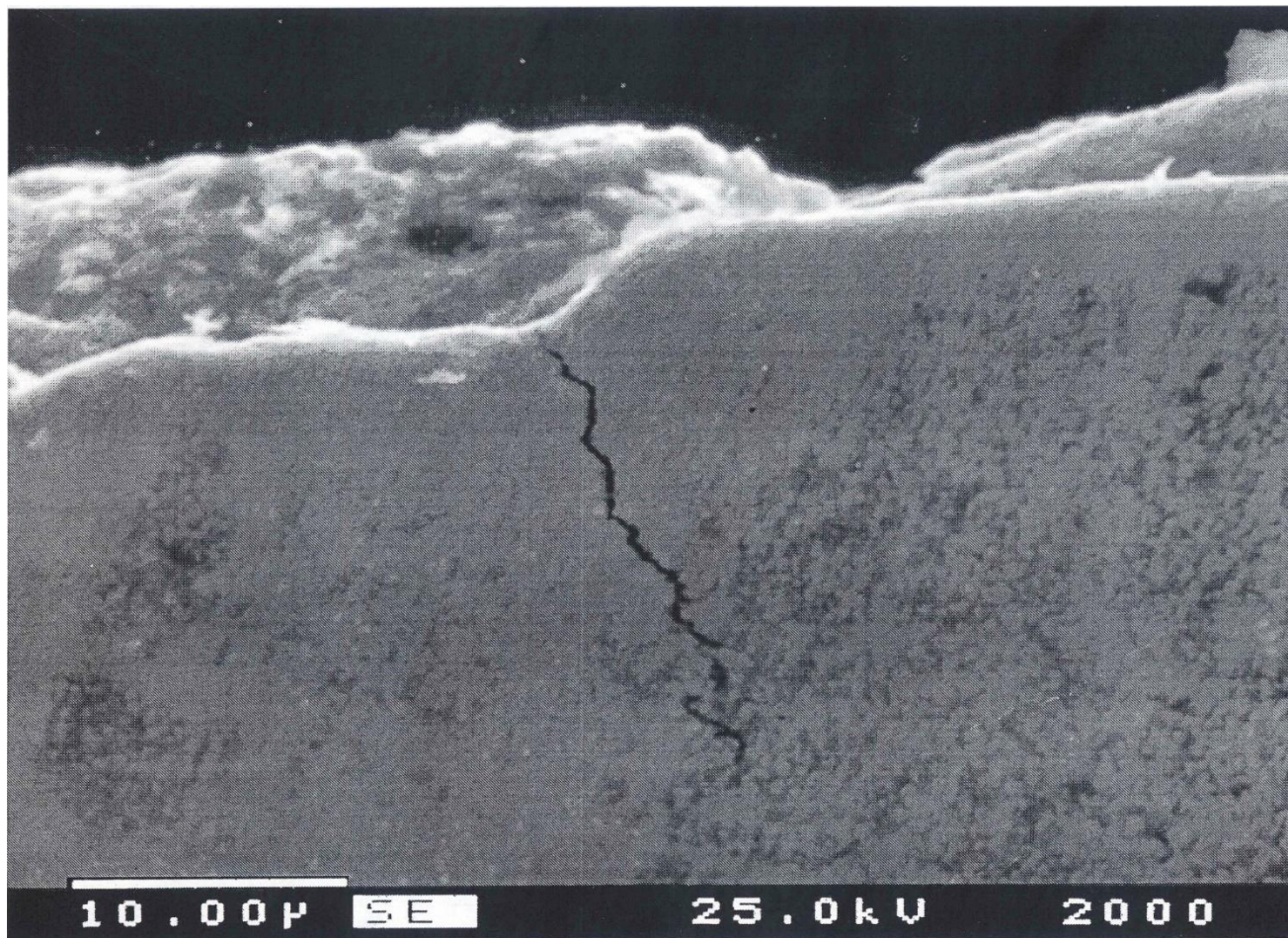
# Механизм усталостного разрушения



Пластическая деформация и разрушение при циклическом нагружении имеет ряд особенностей. При каждом цикле нагружения дислокации совершают возвратно поступательное движение. Дислокационные структуры при усталости качественно отличаются от структур, образующихся при статическом нагружении. Это отличие внешне проявляется в том, что на поверхности материала из-за локализации деформации образуются экструзии (а) и энтрुзии (б). В местах экструзий и интрузий зарождаются микротрещины, которые растут со скоростью:

$$d\ell/dN = C \sigma^m \ell^n$$

# Усталостная трещина



# Поверхность усталостного разрушения



# Разрушение колеса из стали 65Г

Толщина отслоившегося фрагмента составляет 15 – 25 мм. Поверхность, по которой произошло отслоение, имеет характерный для усталостного разрушения вид. На ней присутствуют 4 очага усталостного разрушения в виде площадок ориентированных параллельно поверхности колеса. Очаги разрушения представляют собой флокены. На поверхности разрушения видны бороздки усталостного разрушения в виде концентрических линий.

# Поверхность разрушения детали





# Трение и изнашивание

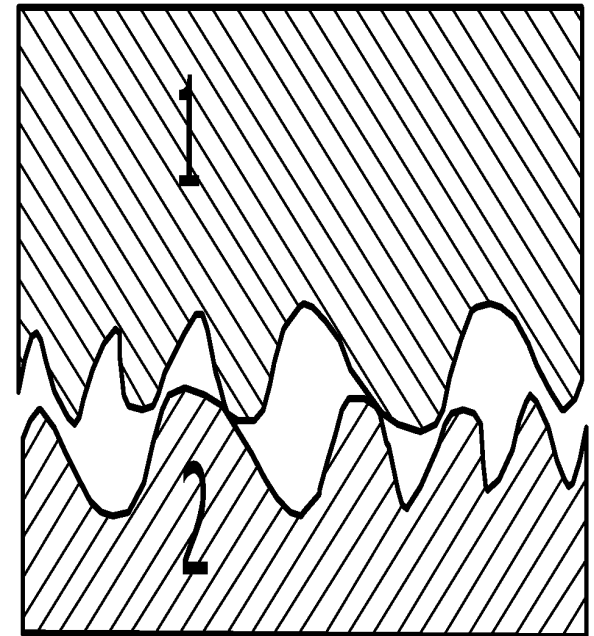
При соприкосновении двух материалов и скольжении их относительно друг друга появляется сила трения, которая пропорциональна силе, действующей перпендикулярно поверхности :  $F = \mu P$ ,

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения. Учитывая шероховатость поверхностей, они будут контактировать только в тех местах, где неровности одной поверхности встречаются с неровностями другой. Фактическая площадь контакта весьма мала, и поэтому величина напряжения на каждую неровность велика. Высокие напряжения в контакте приводят к пластической деформации неровностей и возникновению межатомного взаимодействия. Неровности обеспечивают скольжение если:

$$F/a > k \sim \sigma T/2$$

где  $a$  – фактическая площадь контакта,  $k$  – предел текучести при сдвиге.

Контакт шероховатых поверхностей деталей 1 и 2.

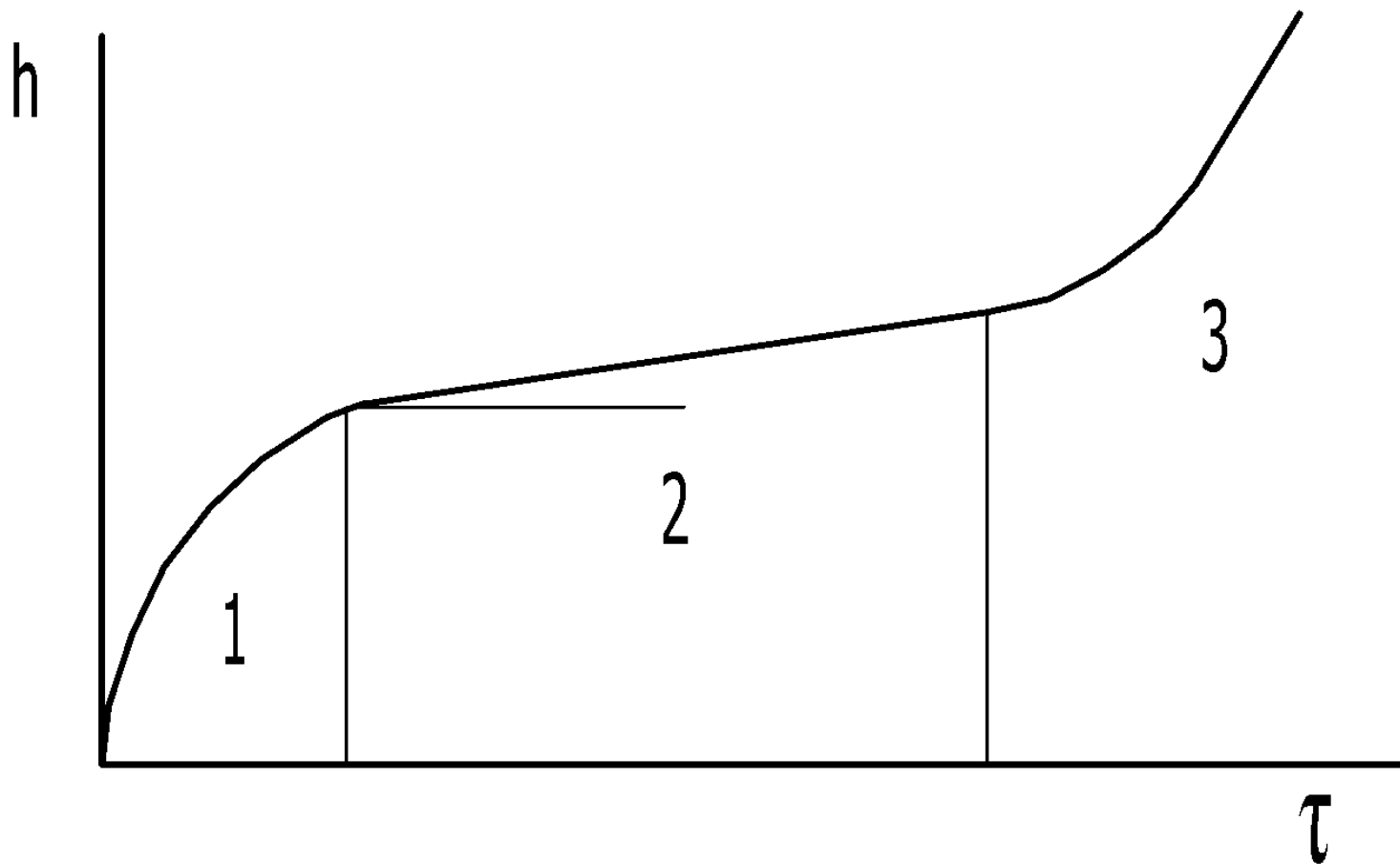


# Коэффициент трения для различных сочетаниях материалов

$\mu$	металлы	Керамика	Полимеры	композиты
1	Al – Al	$Al_2O_3 - Al_2O_3$		Кауч. - сталь
0,1	Fe – Fe	WC – Сталь	ПС – ПС	ПТФЭ/бронза- Сталь
	Сталь-Сталь		ПВХ – Сталь	
	Сталь-Бронза	Алмаз – Сталь	ПС – Сталь	ПТФЭ/БР/Рb - Сталь
	Сталь- In		ПЭ – Сталь	
		Графит - Сталь	ПТФЭ –Сталь	
0,01			ПТФЭ - ПТФЭ	

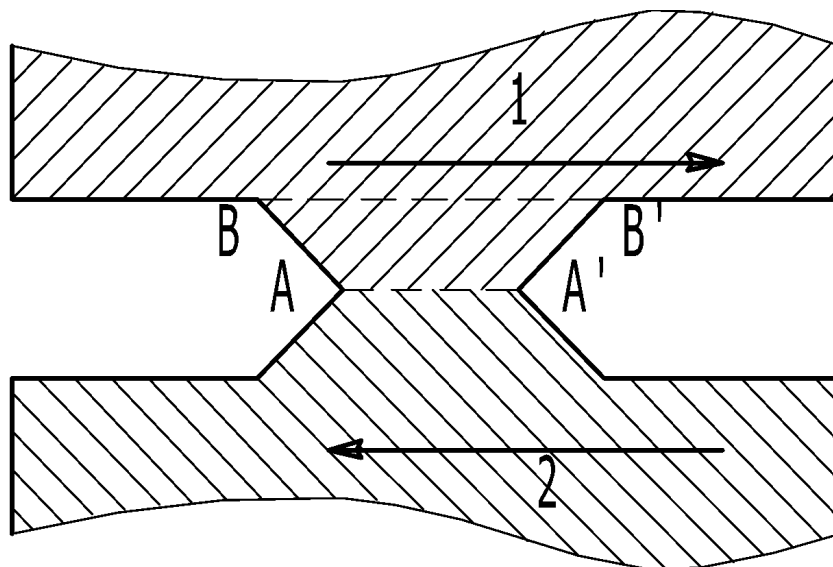
# Изнашивание

$dh/dt$  – скорость изнашивания. 1 – участок приработки, 2 – установившееся изнашивание 3 – ускоряющееся изнашивание.



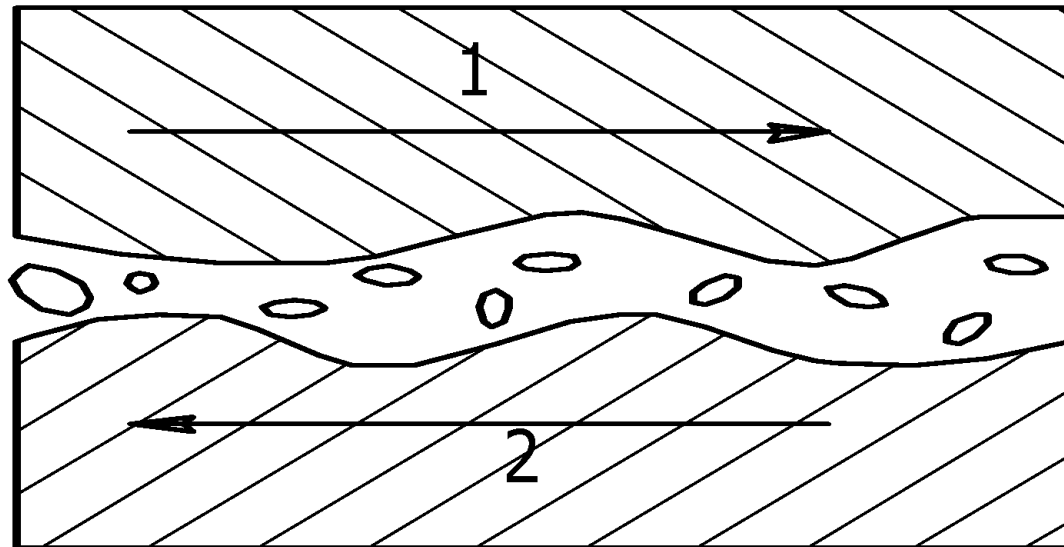
# Адгезионное изнашивание

Трение двух поверхностей под нагрузкой происходит в условиях пластической деформации металла в точках контакта и сопровождается сближением поверхностей вплоть до возникновения адгезии на отдельных участках. В случае деформационного упрочнения материала и возникновения достаточно прочного сцепления (схватывания), разрушение сдвигом происходит на менее прочном участке, например, на В – В'. Многократное повторение этого процесса сопровождается истиранием менее твердого материала.



# Абразивное изнашивание

Абразивное изнашивание происходит в случае, если между поверхностями пары трения попадают частицы твердого вещества, вызывающие истирание этих поверхностей резанием и царапанием. Абразивные частицы образуются из-за окисления металла и отделения твердых частиц от поверхности скольжения. Если при трении металлических поверхностей низкой твердости абразивные частицы вдавливаются в поверхность, то при высокой твердости металла они оставляют царапины на трущихся поверхностях.



# Заключение

Таким образом разрушение - это кинетический процесс зарождения и (или) развития трещин в результате действия внешних или внутренних напряжений, завершающееся разделением изделия на части. Разрушение классифицируют по разным признакам: по характеру силового воздействия на статическое кратковременное, статическое длительное, усталостное и динамическое; по ориентировке макроскопической поверхности разрушения путем отрыва или среза; по величине пластической деформации, предшествующей разрушению — на хрупкое и вязкое.; по расположению поверхности разрушения. относительно, структуры — на транскристаллитное, интеркристаллитное и смешанное.

Различают три способа взаимного смещения поверхностей трещины : I — отрыв; II — поперечный и III — продольный (чистый) сдвиг. Если трещина распространяется без заметных, следов пластической деформации, как и ее зарождение, то разрушение называется хрупким. Когда распространение трещины значительно более энергоемкий (на несколько порядков), чем ее зарождение, процесс, сопровождается значительной пластической деформацией не только вблизи поверхности разрушения, но и в объеме тела, то разрушение вязкое. Энергетические затраты на распространение трещины определяют ее трещиностойкость.