

# Физика технологических процессов в машиностроении

Проф., д.т.н. *Скотникова Маргарита Александровна*  
Skotnikova@mail.ru

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

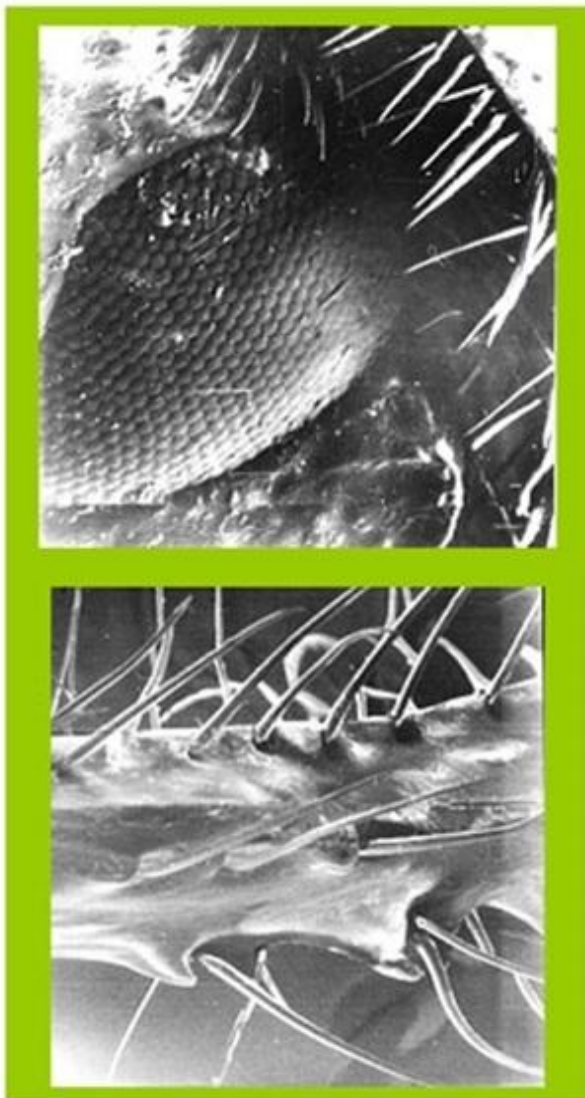
Кафедра "Машиноведение и  
основы конструирования"  
ИММиТ САБПУ



x 1



x 100



x 10000

- **Тема 3. Деформация и разрушение. Содержание:**
- **Раздел 2.1. Классификация видов деформации.**  
Механизмы пластической деформации.
- Деформация по механизму скольжения
- Деформация по механизму двойникования
- Деформация по механизму мартенситного превращения
- Выбор механизма деформации
- Эволюция дислокационной структуры с увеличением степени деформации и плотности дислокаций. Формирование критической структуры.
- **Раздел 2.2. Классификация трещин и видов разрушения**
- Зарождение трещин
- Межзёренное распространение трещины
- - хрупкое зернограничное разрушение
- - вязкое зернограничное разрушение
- Внутризёренное распространение трещины
- –Скол; –Микроскол; –Квазискол - Чашечный.
- Фрактографический анализ изломов сплавов с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).
- Испытания на выносливость. Усталостный механизм разрушения.
- Коррозионное разрушение
- Классификация видов ударного разрушения. Критерий разрушения.
- Фрактографический анализ поверхности при каплеударной эрозии и механической обработке.

## 3.1. Классификация видов деформации

- **Деформация** ( $\varepsilon$ ) – это изменение формы и размеров тела под действием внешних сил.
- **Упругая деформация** – это деформация, полностью устраняющаяся после снятия нагрузки. Такая деформация пропорциональна приложенному напряжению. Упругие свойства металлов определяются силами взаимодействия атомов в кристаллической решетке (притяжения и отталкивания).
- **Пластическая деформация** – это деформация, остающаяся в металле после снятия нагрузки ( $\sigma_{ост} \neq 0$ ).
- **Остаточные напряжения** – это напряжения, не исчезающие после снятия внешней нагрузки.

# Механизмы пластической деформации

- 1. **Скольжение** – это ламинарное движение дислокаций вдоль наиболее плотноупакованных плоскостей в кристалле (вдоль плоскостей скольжения)
- $\{110\}$  в ОЦК;  $\{111\}$  в ГЦК;  $\{0001\}$  в ГПУ.
- 2. **Двойникование** – это симметричная переориентация областей кристаллической решетки.
- 3. **Мартенситное превращение** – характерно для сплавов с “памятью формы”.



**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С УВЕЛИЧЕНИЕМ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ**  
( $ds / dt = 10^{-3} \dots 10^{+7} 1/\text{сек}$ )



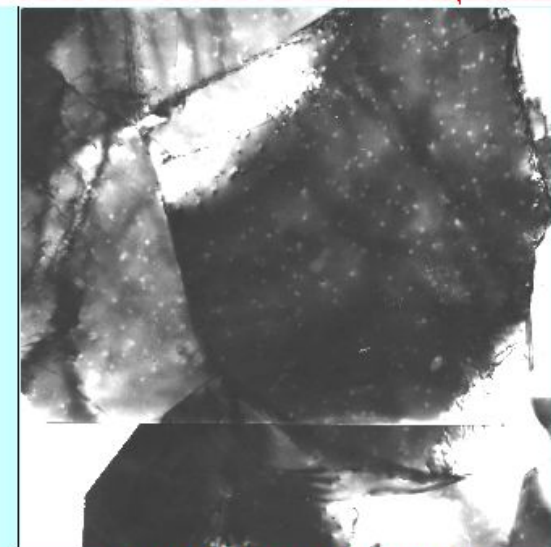
**СКОЛЬЖЕНИЕ**



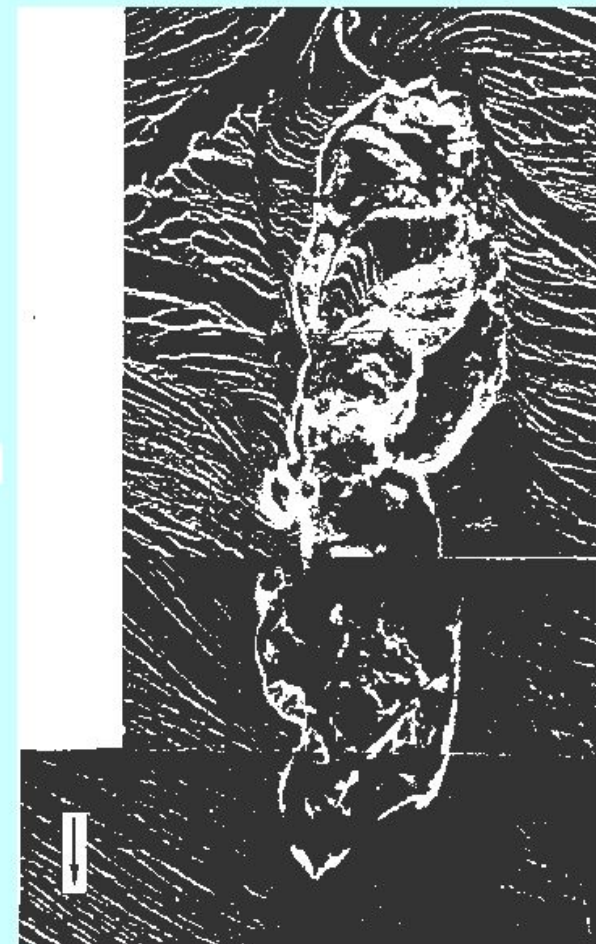
**МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ**



**ДВОЙНИКОВАНИЕ**



**ПОРООБРАЗОВАНИЕ**

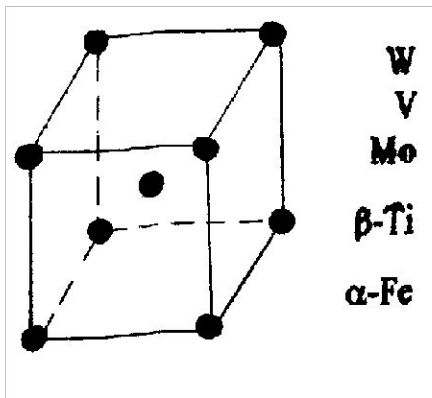


**ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕЙ**

# Деформация по механизму скольжения

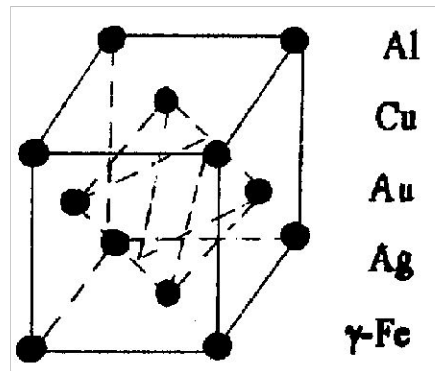
	ОЦК	ГЦК	ГПУ
Наиболее плотноупакованные плоскости $\{hkl\}$ и направления $\langle pqr \rangle$ сдвига.	$\{110\}, \langle 111 \rangle$	$\{111\}, \langle 110 \rangle$	$\{0001\}, \langle 11-20 \rangle$
число плоскостей $\{hkl\}$ сдвига	6	4	1
число направлений $\langle pqr \rangle$ сдвига	2	3	3
общее количество элементов сдвига	12	12	3
относительное удлинение, %	12...20%	45%	10%

ОЦК



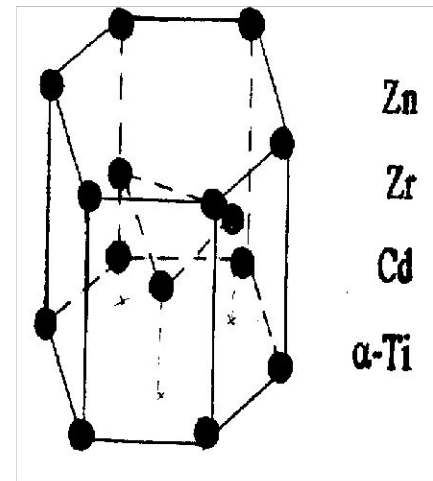
$\{110\}, \langle 111 \rangle$

ГЦК



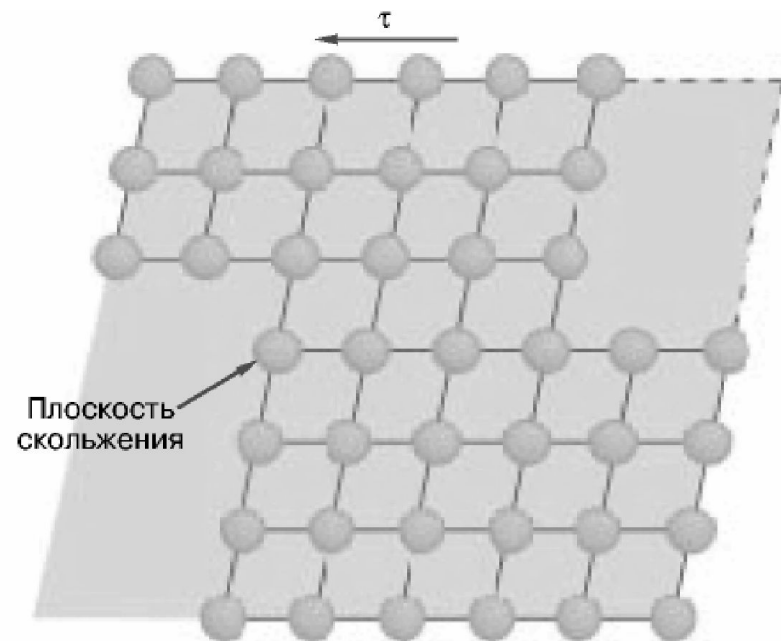
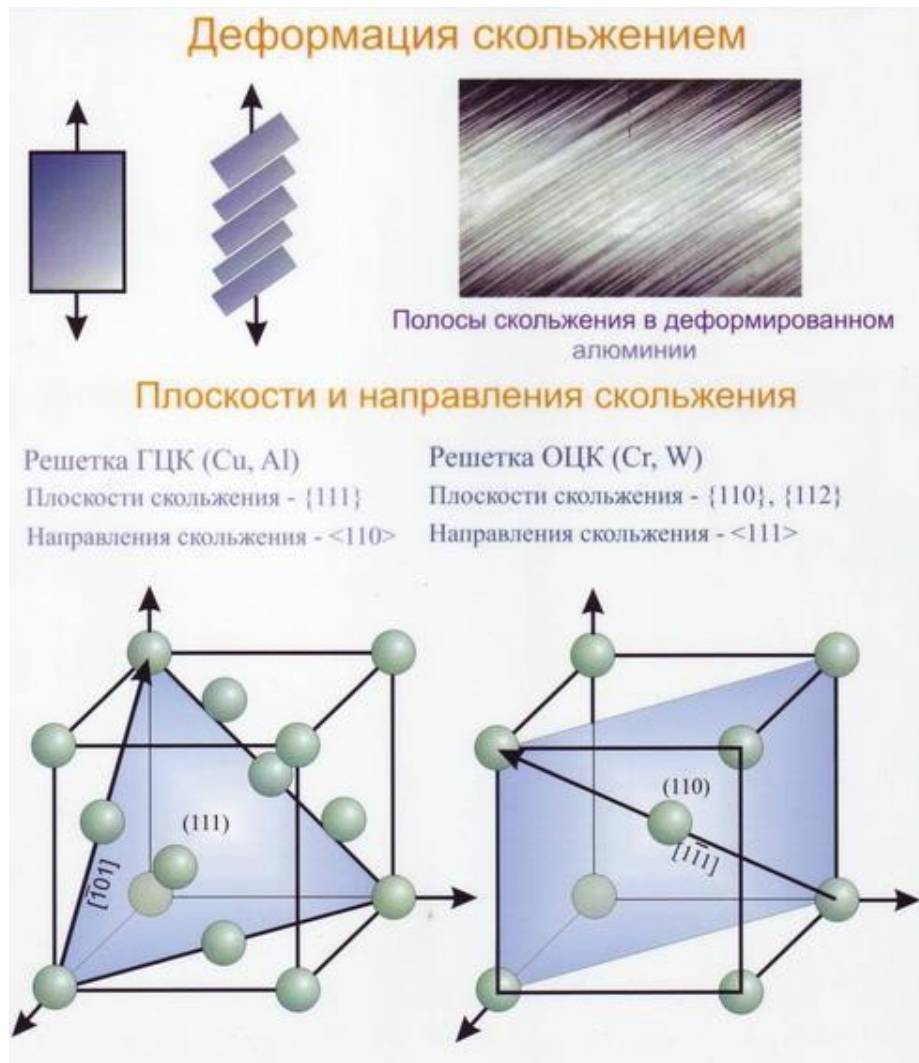
$\{111\}, \langle 110 \rangle$

ГПУ



$\{0001\}, \langle 11-20 \rangle$

# Деформация по механизму скольжения

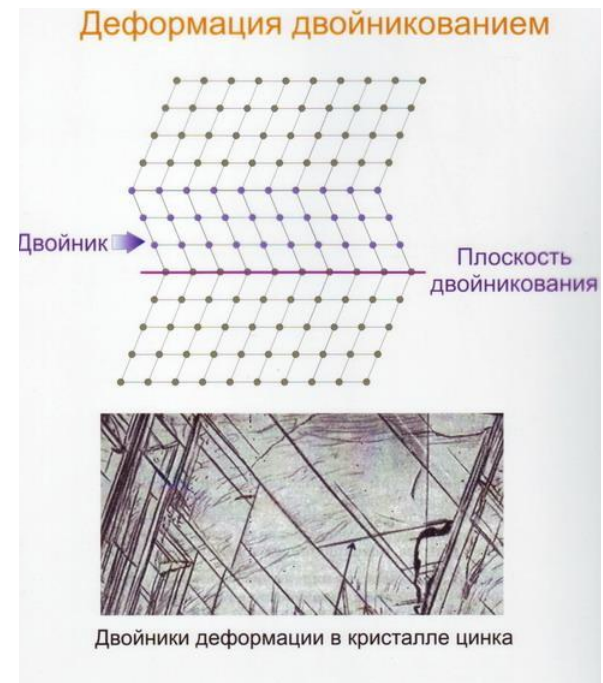
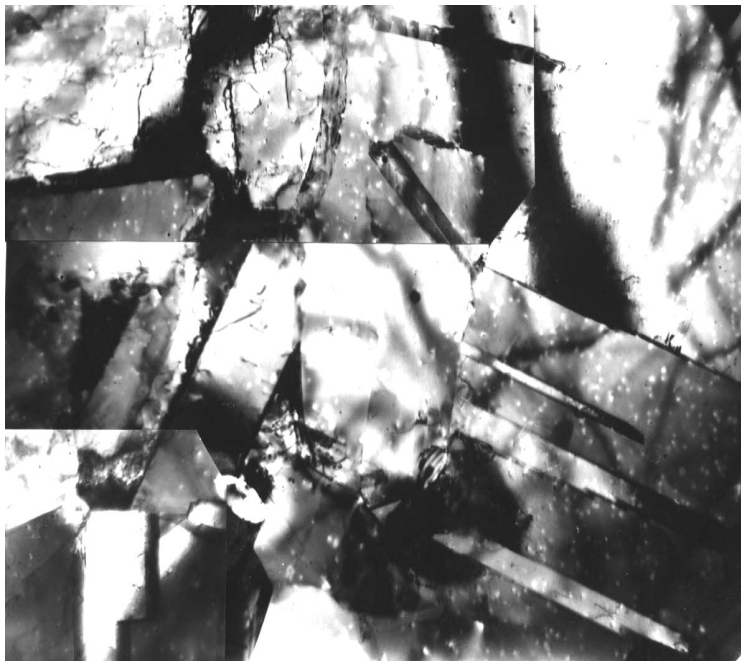


- Схема деформации кристалла при скольжении.  $\tau$  - напряжение сдвига.



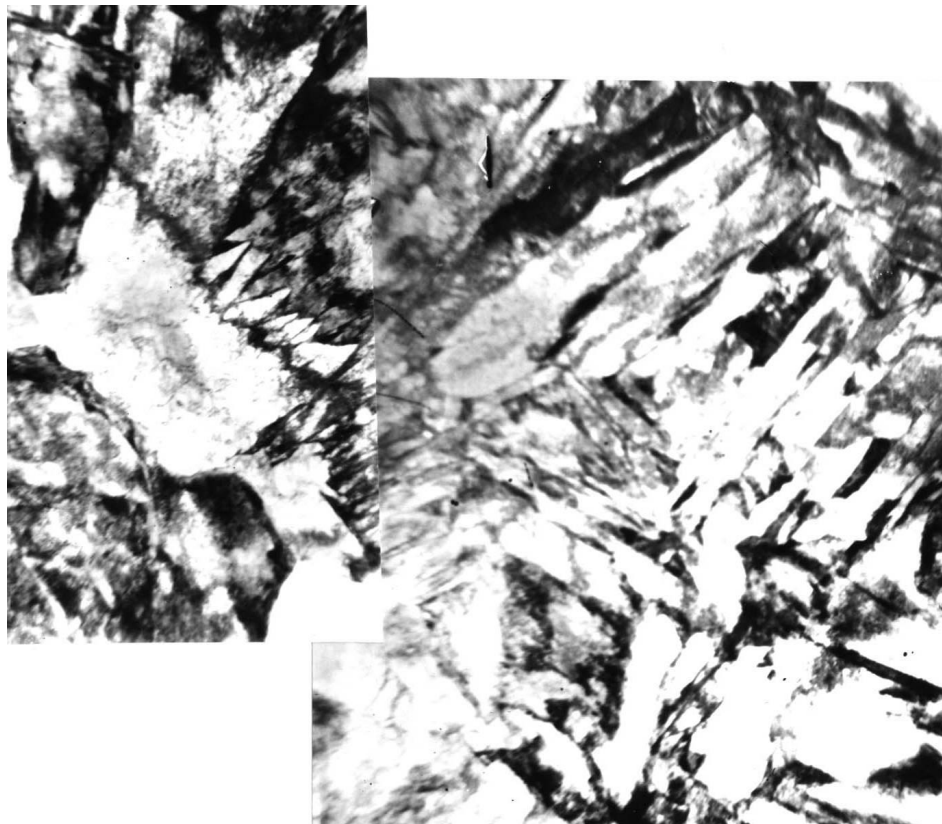
# Деформация по механизму двойникования

	ОЦК	ГЦК	ГПУ
Плоскости $\{hkl\}$ и направления сдвига $\langle prq \rangle$ при двойникования.	$\{112\}, \langle 111 \rangle$	$\{111\}, \langle 112 \rangle$	$\{10-12\}, \langle -1011 \rangle$
число плоскостей двойникования	6	4	1
число направлений двойникования	2	3	3
общее количество элементов двойникования	12	12	3
относительное удлинение, %	12...20%	45%	10%

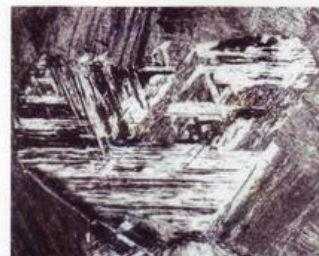




# Деформация по механизму мартенситного превращения



Структура мартенсита



Пакетный (реечный) мартенсит

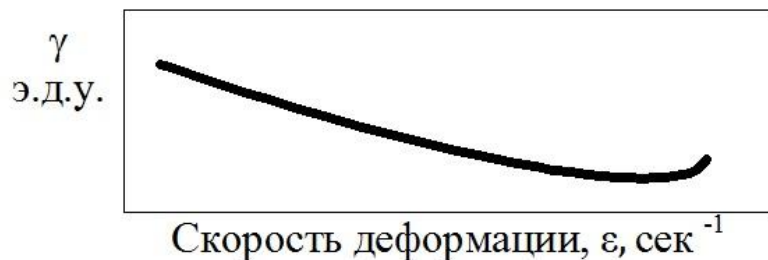
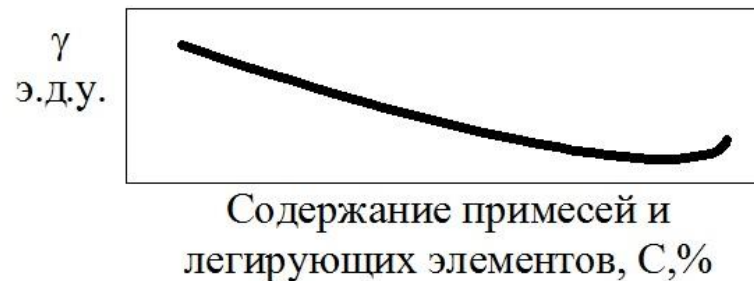


Пластинчатый (двойникованный) мартенсит

# Выбор механизма деформации

- **Дефектом упаковки** – называется нарушение нормальной для данного кристалла последовательности в расположении атомов.
- **Энергией дефекта упаковки** – называется энергия, которую надо затратить, для формирования дефекта упаковки.

Me	Mo	Al	Ni	Fe	Mg	W	Au	Cu	V	Co	Nb	Ag	Ti
Э.Д.У. эрг/с м <sup>2</sup>	300	280	200	140	110	90	50	40	30	26	20	17	10



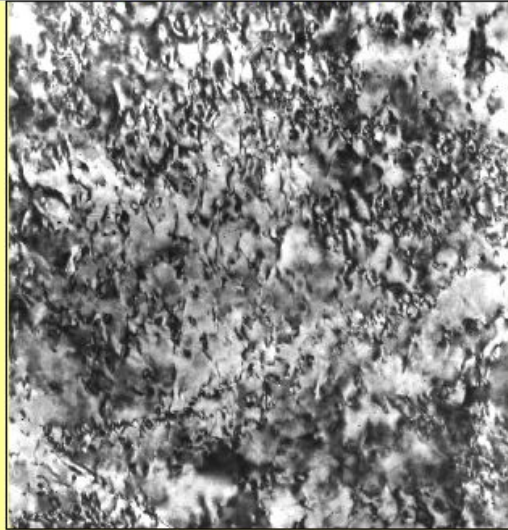
**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С УВЕЛИЧЕНИЕМ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ( $de / dt = \text{const} = 10^{-3}, 1/\text{сек}$ ) ( $\rho_L < 2 \cdot 10^{11}, 1/\text{см}^2$ )**

$\rho_L = 2 \dots 5 \cdot 10^9, 1/\text{см}^2$

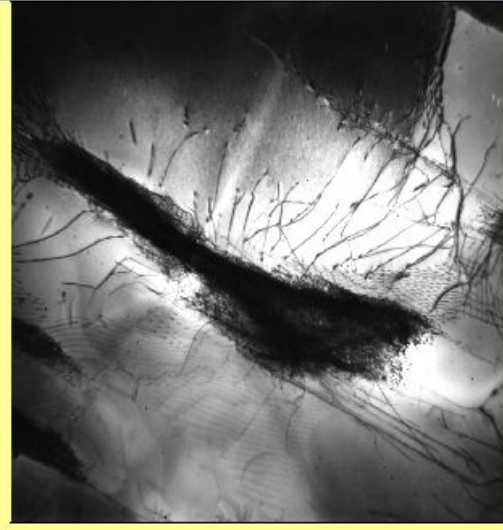
$\rho_L = 5 \dots 10 \cdot 10^9, 1/\text{см}^2$

$\rho_L = 1 \dots 20 \cdot 10^{10}, 1/\text{см}^2$

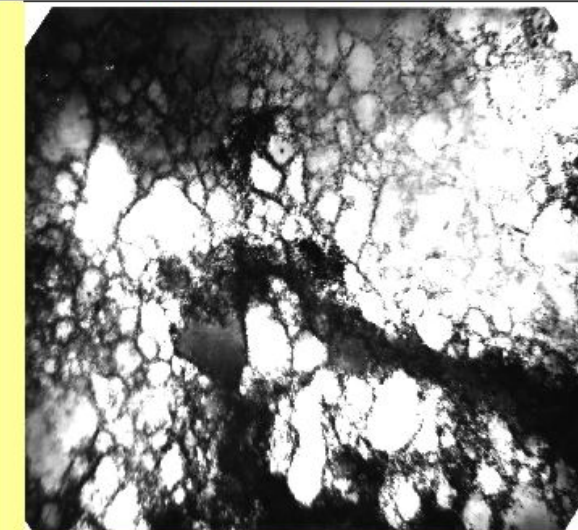
**ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ  
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ**



**ХАОТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ**

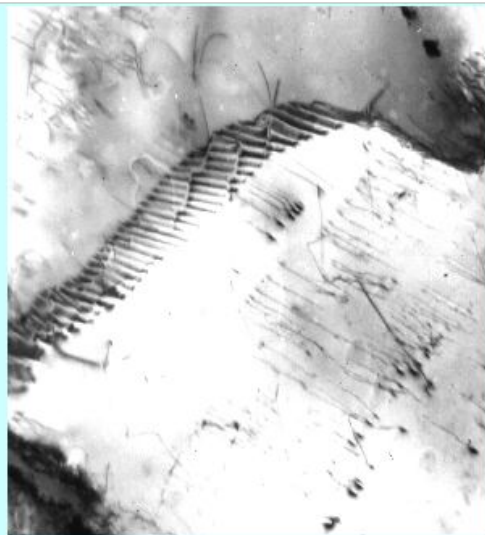


**КЛУБКИ ДИСЛОКАЦИЙ**



**ЯЧЕЙСТАЯ СТРУКТУРА**

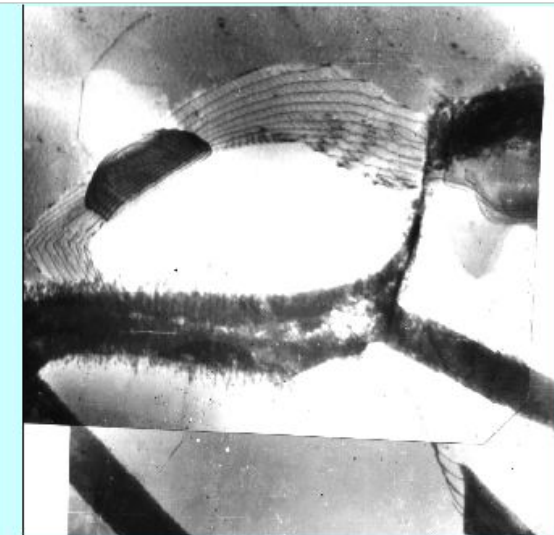
**НИЗКАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФЕКТА  
УПАКОВКИ**



**ПЛОСКИЕ СКОПЛЕНИЯ**



**ПЛОСКАЯ СЕТЧАТАЯ**



**ЯЧЕЙСТО-СЕТЧАТАЯ**

**←....СДВИГОВАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (НОСИТЕЛИ – ДИСЛОКАЦИИ)....→**



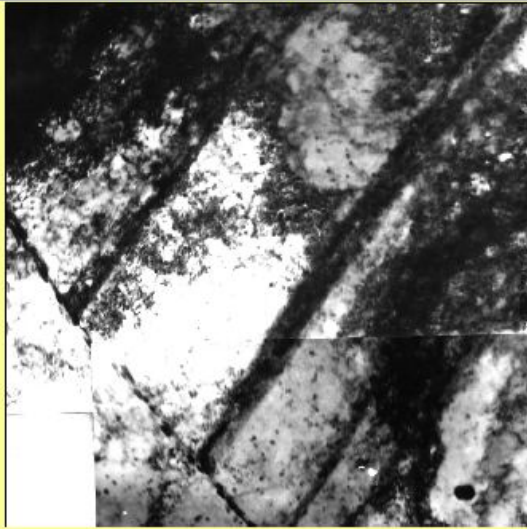
**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ**

$(d\varepsilon / dt = \text{const} = 10^{-3}, 1/\text{сек}) \quad (\rho_{\perp} > 2 \cdot 10^{11}, 1/\text{см}^2)$

$\rho_{\perp} = 20 \dots 40 \cdot 10^{10}, 1/\text{см}^2$

$\rho_{\perp} = 40 \dots 60 \cdot 10^{10}, 1/\text{см}^2$

**ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ  
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ**



**ПОЛОСОВАЯ СТРУКТУРА**

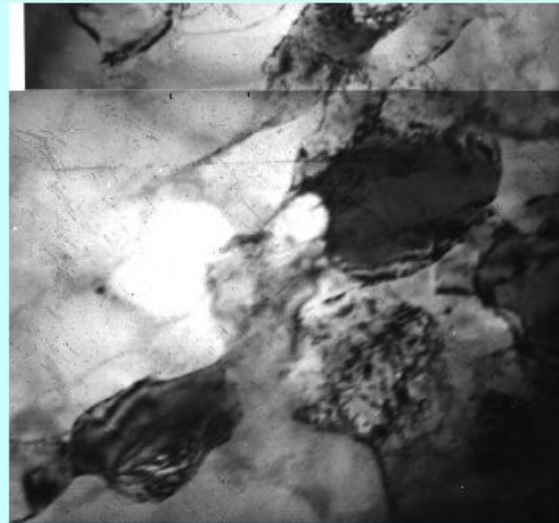


**ФРАГМЕНТИРОВАННАЯ СТРУКТУРА**

**НИЗКАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФЕКТА  
УПАКОВКИ**



**ДВОЙНИКОВАЯ СТРУКТУРА**



**СТРУКТУРА С ДИСКРЕТНЫМИ РАЗОРИЕНТИР**



## **3.2. Классификация трещин и видов разрушения.**

# Зарождение трещин

## Разрушение металлов

Схема зарождения микротрещины при слиянии дислокаций у препятствия.

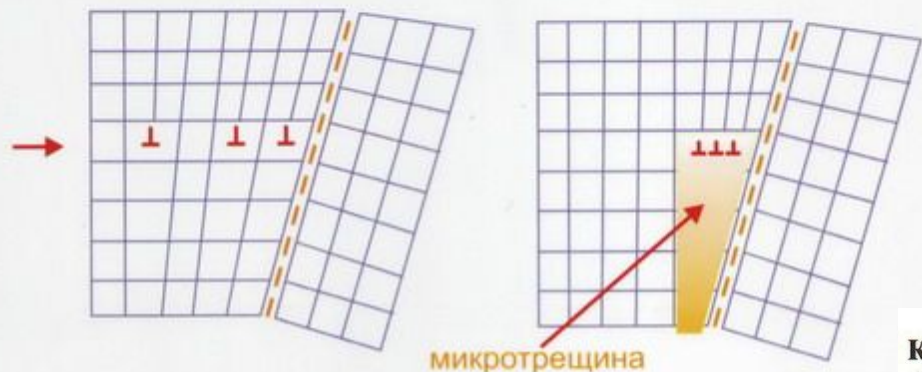
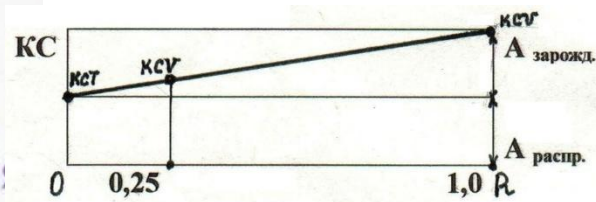
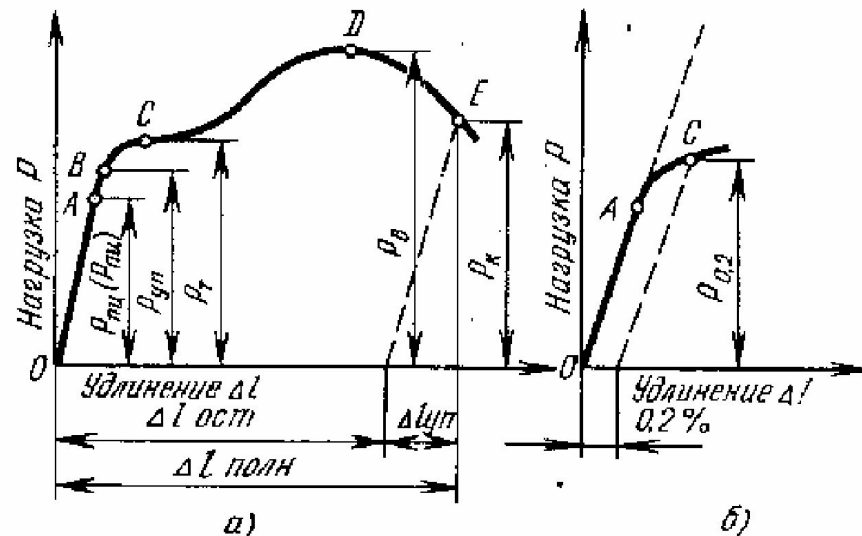


Схема зарождения микротрещины при пересечении двух плоскостей скольжения:



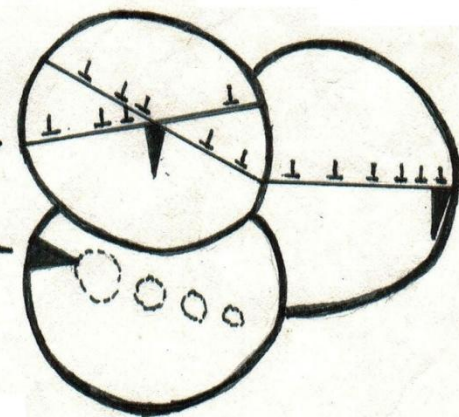
Методика Гуляева:

$$A_{\text{разр.}} = A_{\text{зар.}} + A_{\text{распр.}}$$

Fe :  $A_{\text{зар.}} > A_{\text{распр.}}$   
 Ti :  $A_{\text{зар.}} < A_{\text{распр.}}$

Модель Стро:

- пересечение кристаллографических плоскостей;
- пересечение двойников;
- порообразование;
- химическая неоднородность (коррозия);
- концентрация напряжений и деформаций (усталость)



# Классификация видов разрушения

- **Изломом** – называют поверхности раздела в результате разрушения нагруженных деталей машин и образцов с разделением их на две части.
- **Фрактографией** – называют исследование строения изломов.
- **Интеркристаллитное:**
  - вязкое зернограничное;
  - хрупкое зернограничное
- **Транскристаллитное:**
  - вязкое чашечное;
  - квазискольное;
  - микроскольное;
  - Скол
- **Разрушение в особых условиях**
  - микрорасслоение;
  - коррозионное;
  - усталостное

где,  $E$  – модуль нормальной упругости,  
 $\gamma$  – плотность материала.

## Интеркристаллитное:

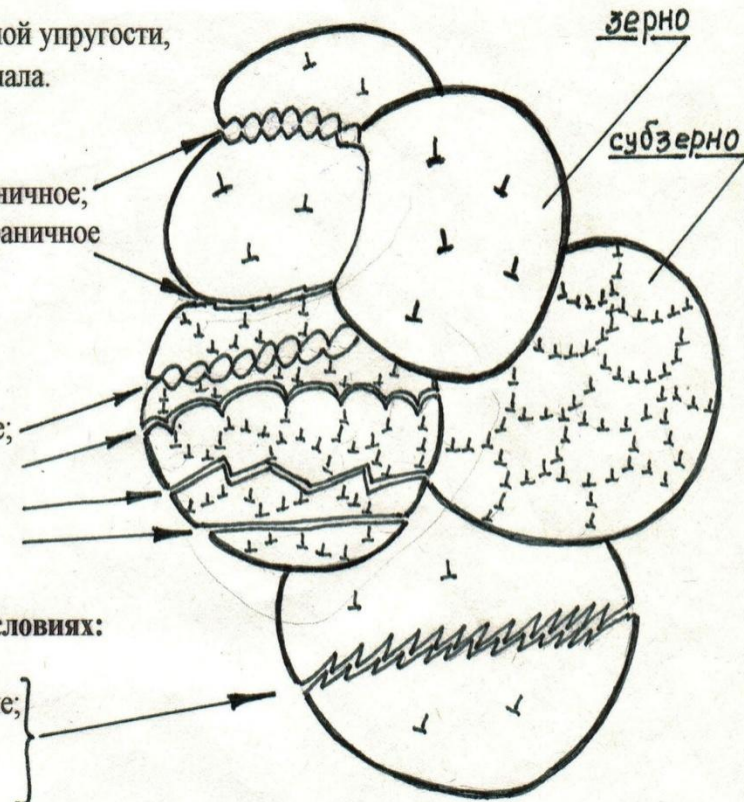
- вязкое зернограничное;
- хрупкое зернограничное

## Транскристаллитное:

- вязкое чашечное;
- квазискольное;
- микроскольное;
- скол

## Разрушение в особых условиях:

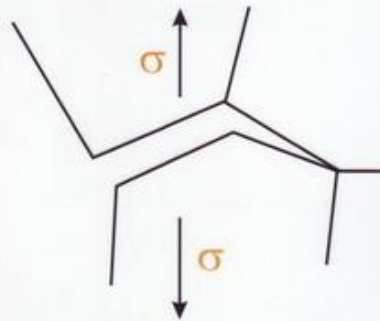
- микрорасслоение;
- коррозионное;
- усталостное



# Межзёрное Распространение трещины

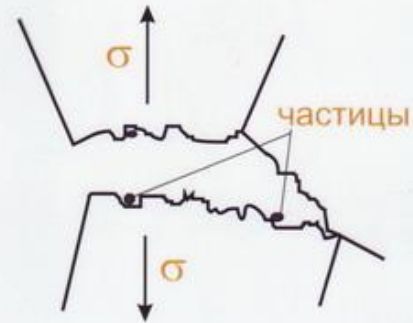
## Межзеренное разрушение

Хрупкое разрушение

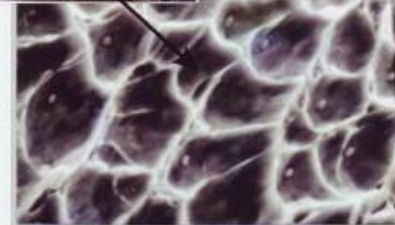


РЭМ x 300

Вязкое разрушение



РЭМ x 100

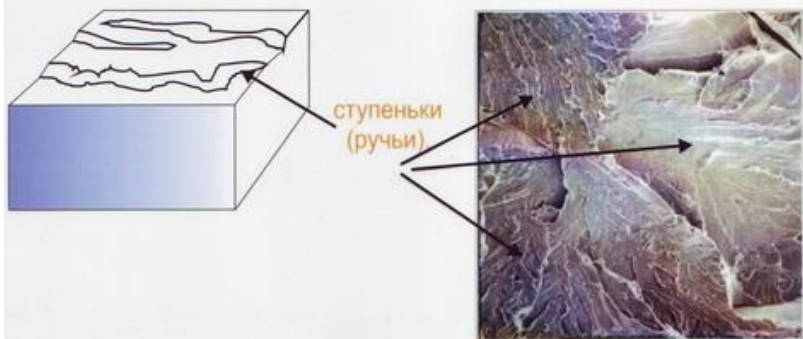


РЭМ x 500



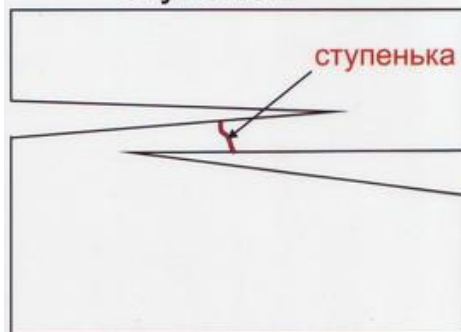
# Внутризеренное Распространение трещины

Хрупкое внутризеренное разрушение  
(скол)



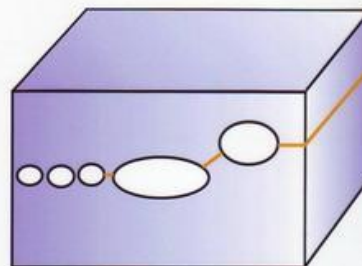
РЭМ x 300

Образование  
ступенек.

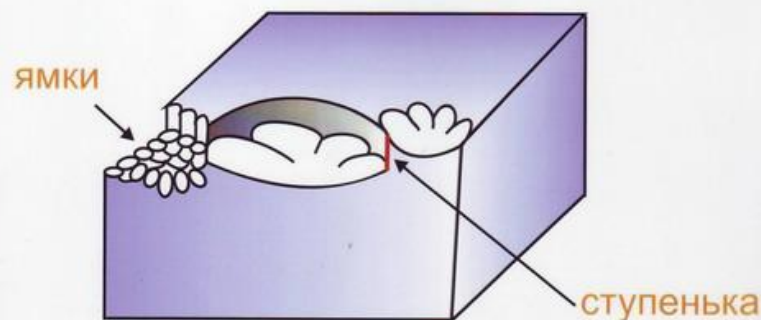


Хрупкое разруше-  
ние  $Fe_{\alpha}$  происхо-  
дит по плоскостям  
{100}.

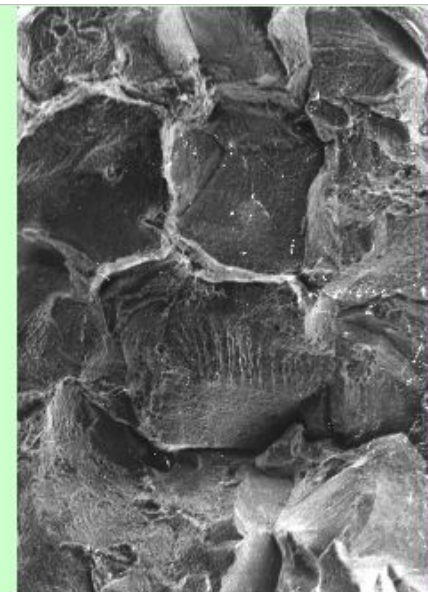
Внутризеренное разрушение  
квазисколом



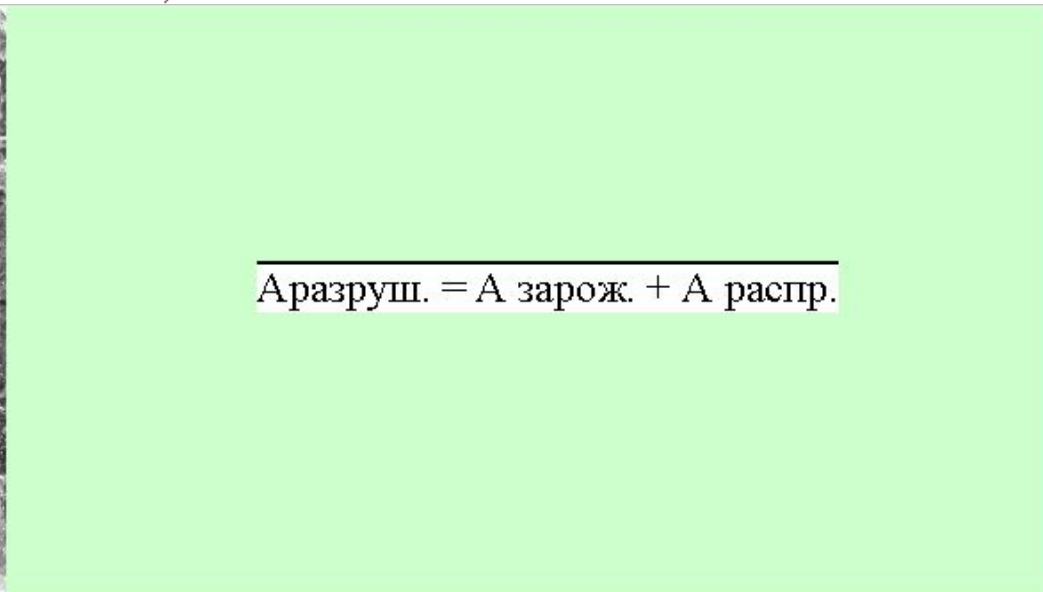
РЭМ x300



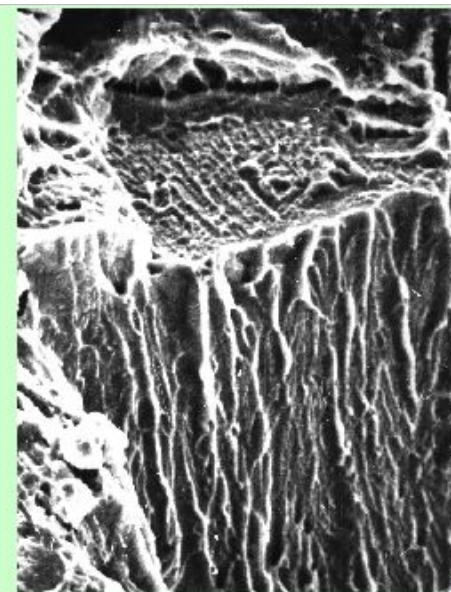
## МЕЖЗЕРЕННОЕ, ИНТЕРКРИСТАЛЛИТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ



Хрупкий зернограничный

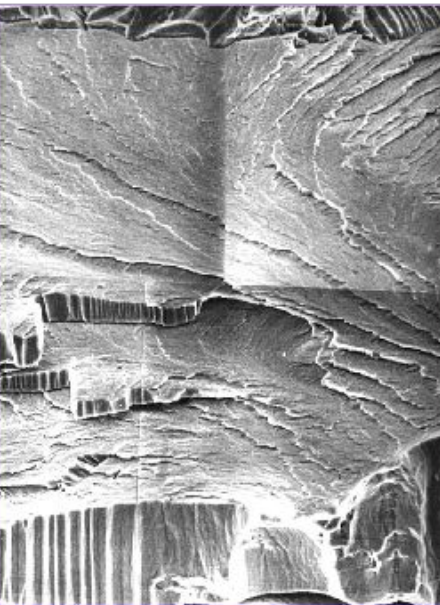


$$A_{\text{разруш.}} = A_{\text{зарож.}} + A_{\text{распр.}}$$

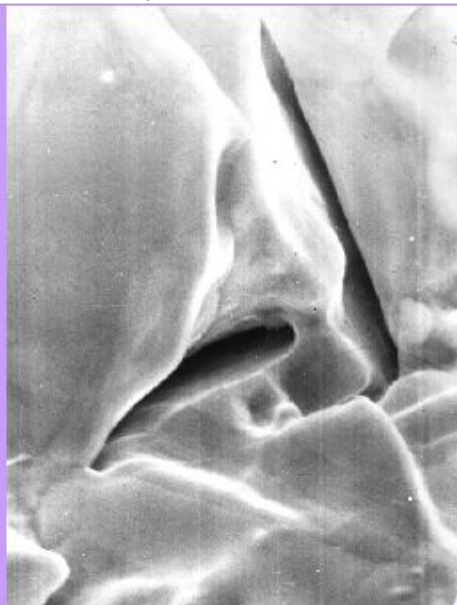


Вязкий зернограничный

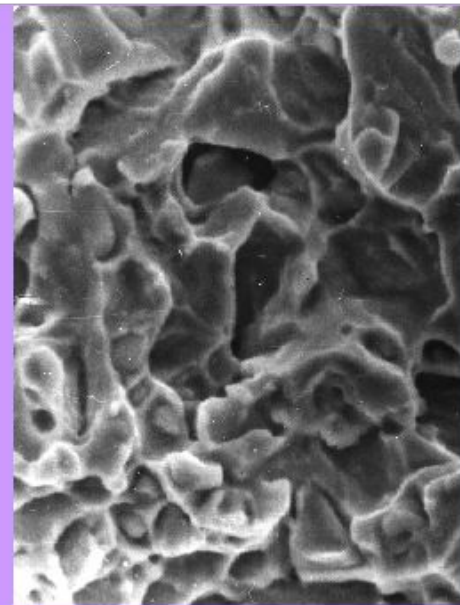
## ВНУТРИЗЕРЕННОЕ, ТРАНСКРИСТАЛЛИТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ



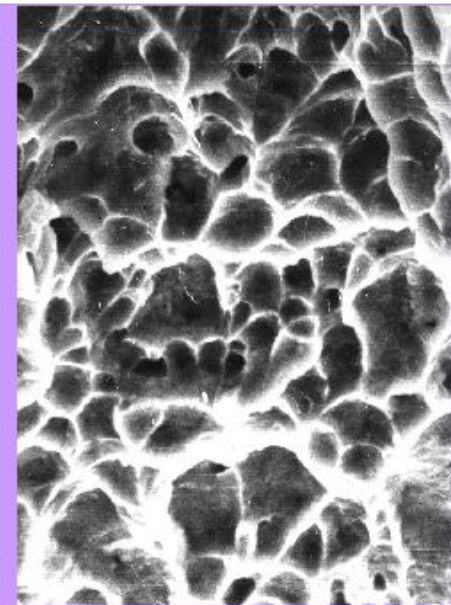
СКОЛ



МИКРОСКОЛ



КВАЗИСКОЛ

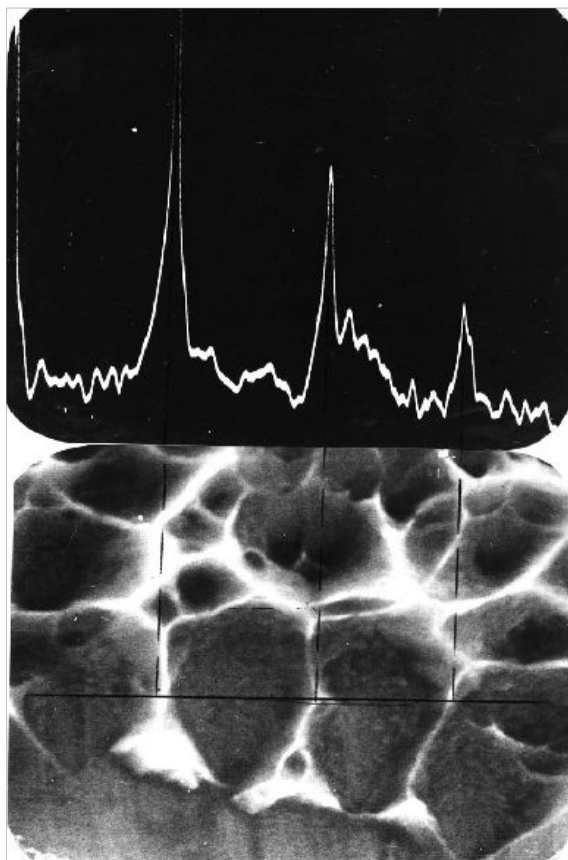


ЧАШЕЧНЫЙ

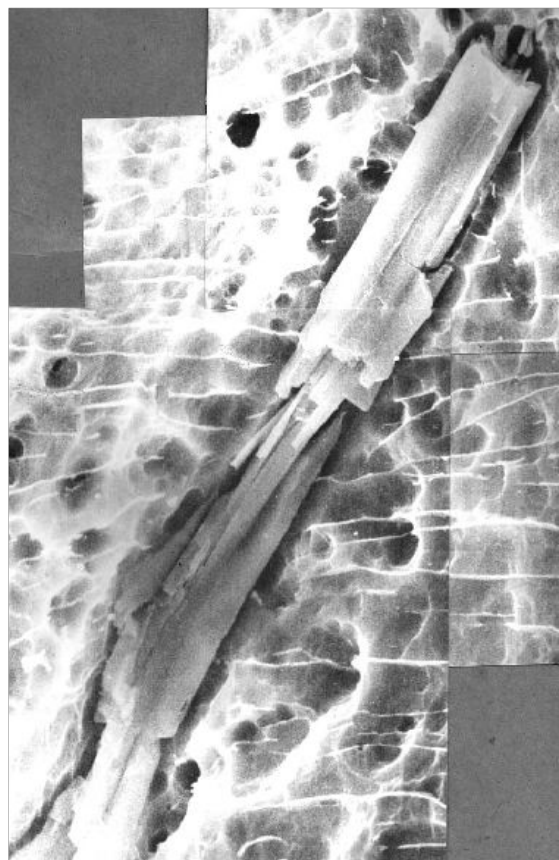


# ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗЛОМОВ

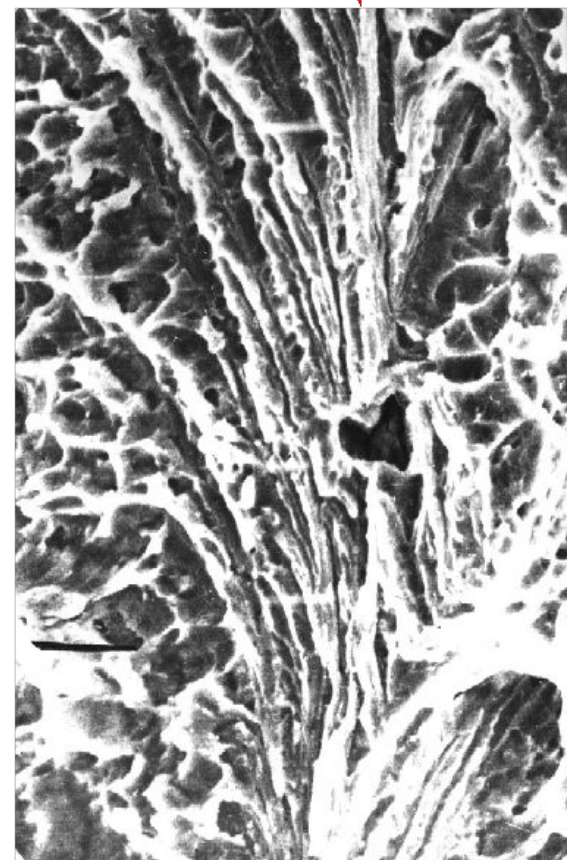
**ШЕРОХОВАТОСТЬ**



**ФАЗА**



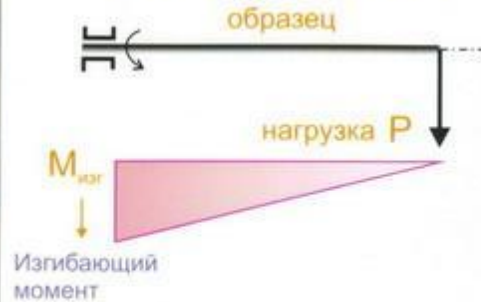
**ЛИКВАЦИЯ**



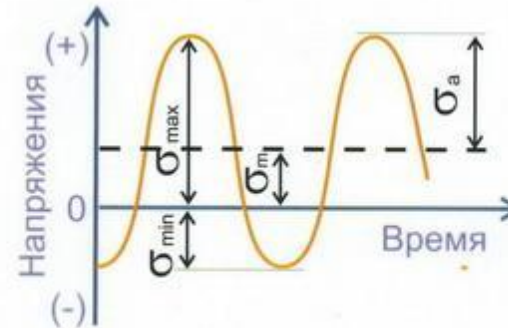
# Испытания на выносливость

## Испытания на выносливость

Схема нагружения - изгиб с вращением



Цикл напряжений



$\sigma_a$  - амплитуда напряжений;  
 $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$  - среднее напряжение цикла;  
 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  - асимметрия цикла

Кривые усталости



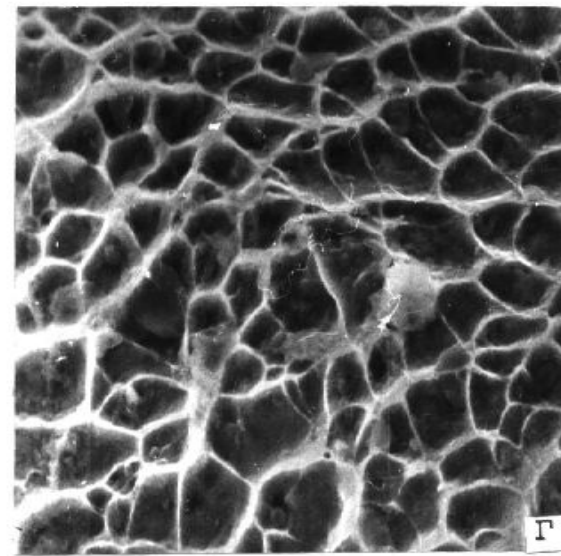
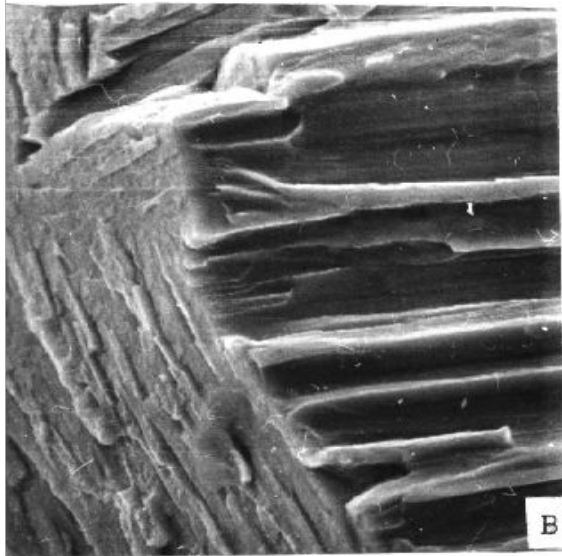
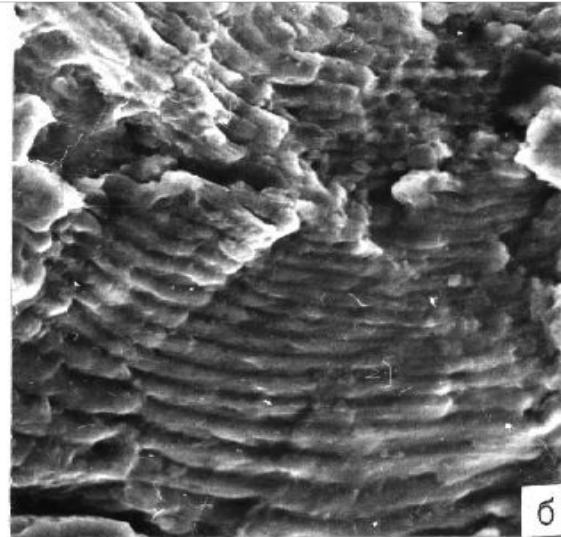
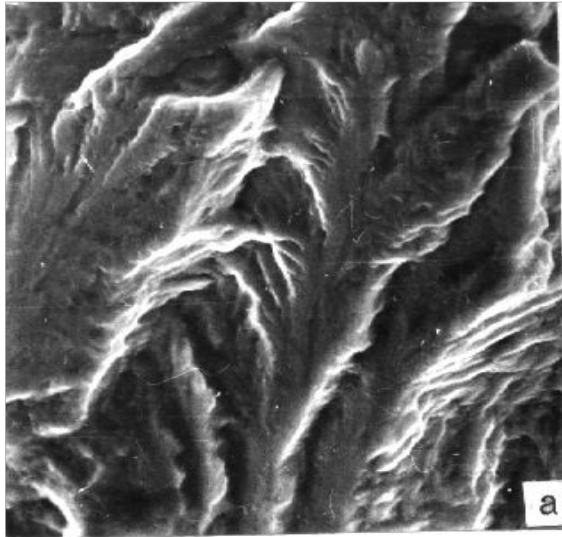
$\sigma_R$  - физический предел выносливости  
 $\sigma_K$  - ограниченный предел выносливости при заданном количестве циклов  $N_K$ .

Разрушение при усталости (схема).





# УСТАЛОСТНЫЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ



# Коррозионное разрушение

Электродные потенциалы, E, В , 20°С.

Zi	K	Na	Mg	Ti	Al	Mn	Zn	Cr	Fe	Ni	Sn	H	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	Ag	Pt	Au
- 2,96	- 2,92	- 2,71	- 2,37	- 1,75	- 1,66	- 1,18	- 0,76	- 0,74	- 0,44	- 0,23	- 0,14	0	+ 0,1	+ 0,34	+ 0,8	+ 1,19	+ 1,42

низкая коррозионная стойкость

высокая коррозионная стойкость

- **Анодные процессы** - заключаются в том, что металлы с более отрицательным потенциалом в результате взаимодействия с токопроводящей средой (электролитом), содержащей атомы кислорода, водорода, хлора и др., будут окисляться (растворяться), переходя в раствор в виде ионов при соответствующих таблице разностях потенциалов по реакциям:
  - $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$                        $Cr \rightarrow Cr^{3+} + 3e^-$
  - $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$                        $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
- **Катодные процессы** - заключаются в том, что ионы металлов с более положительным потенциалом в результате взаимодействия с электролитом будут восстанавливаться (электролитически осаждаться) с участием электронов по реакции:
  - $Me^{2+} + 2e^- \rightarrow 2 Me$     например:  $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$

# Коррозионное разрушение

## Коррозионностойкие стали

Коррозионностойкими (нержавеющими) называют стали, которые способны сопротивляться коррозионному воздействию агрессивной среды. Различают химическую и электрохимическую коррозию.

Межкристаллитная коррозия аустенитных сталей.



Одним из видов электрохимической коррозии является **межкристаллитная коррозия**. Она распространяется по границам зерен от поверхности вглубь металла и резко снижает механические свойства.

Основной легирующий элемент коррозионностойких сталей - **хром**. При его содержании более 12 % возникает высокая устойчивость против коррозии. Коррозионностойкие стали подразделяются на **хромистые** и **хромоникелевые**.

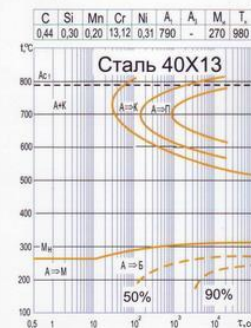
## Хромистые коррозионностойкие стали

В зависимости от структуры, образующейся при охлаждении на воздухе, хромистые стали делятся на следующие классы: мартенситные, мартенситно-ферритные (содержат более 10 % феррита) и ферритные.

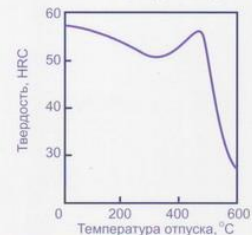
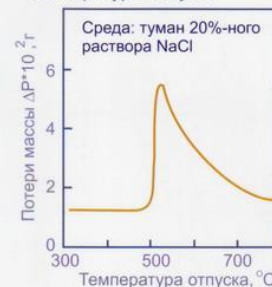
Марка стали	Содержание, %				Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{0,5}$ МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
	C	Cr	Ti						
<b>Стали мартенситного класса</b>									
20X13	0,16-0,25	12-14	-		Закалка от 1000-1050°C + отпуск 660-770°C	440	650	16	55
30X13	0,26-0,35	12-14	-		Закалка от 950-1020°C + отпуск 700-750°C	590	730	14	40
40X13	0,36-0,45	12-14	-		Закалка от 1000-1050°C + отпуск 600-650°C	890	1120	13	32
<b>Стали мартенситно-ферритного класса</b>									
12X13	0,09-0,15	12-14	-		Закалка от 1000-1050°C + отпуск 700-770°C	410	590	20	60
<b>Стали ферритного класса</b>									
12X17	менее 0,12	16-18	-		Отжиг 760-780°C	240	390	20	50
15X25T	менее 0,15	24-27	0,15-0,40		Отжиг 740-760°C	290	440	20	45

## Свойства хромистых коррозионностойких сталей

Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали 40X13



Зависимость коррозионной стойкости стали 10X13 от температуры отпуска

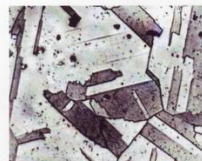


Зависимость твердости стали 40X13 от температуры отпуска продолжительностью один час.

## Хромоникелевые аустенитные коррозионностойкие стали

Марка стали	Содержание, %					Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{0,5}$ МПа	$\delta$ , %
	C	Cr	Ni	другие					
12X18H9	менее 0,12	17-19	8,0-9,5	-		Закалка от 1050 - 1100°C	190	520	45
04X18H10	менее 0,04	17-19	9-11	-		Закалка от 1000 - 1050°C	170	500	50
12X18H10T	менее 0,12	17-19	9-11	Ti		Закалка от 1050 - 1100°C	210	540	55
10X17H13M2T	менее 0,10	16-18	12-14	Mo 1,8-2,5		Закалка от 1050 - 1100°C	220	540	40

Структура стали 12X18H10T после закалки

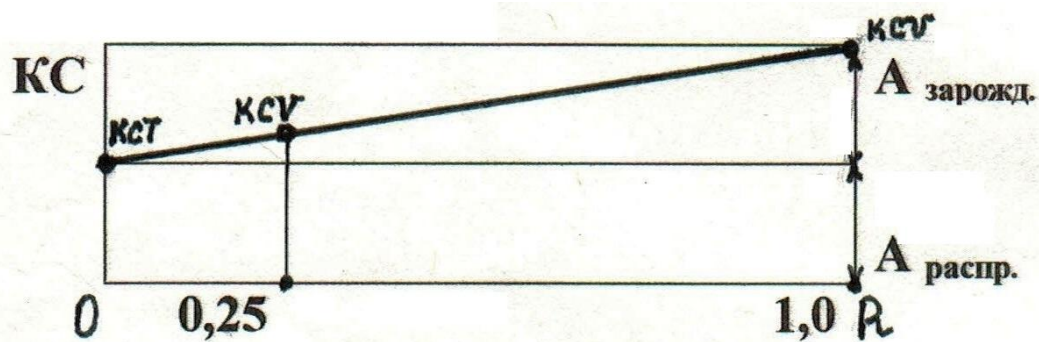
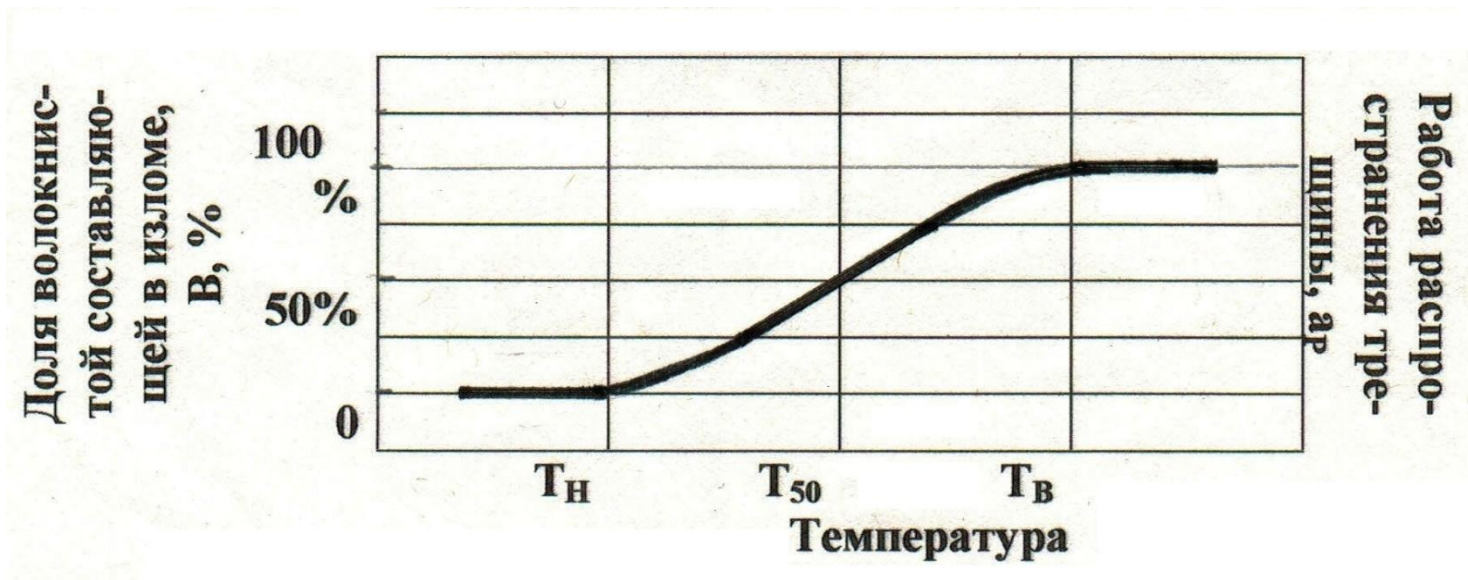


x1000



# Классификация видов ударного разрушения

- Изломом – вязкий (чашечный)
- – хрупкий (кристаллический)



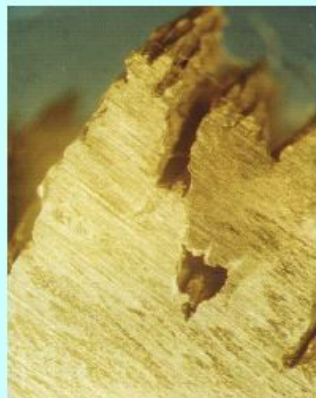
Методика Гуляева:

$$A_{\text{разр.}} = A_{\text{зар.}} + A_{\text{распр.}}$$

$$Fe: A_{\text{зар.}} > A_{\text{распр.}}$$

$$Ti: A_{\text{зар.}} < A_{\text{распр.}}$$

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ТС5, ПОДВЕРГНУТЫХ КАПЛЕУДАРНОЙ ЭРОЗИИ



а) x 40



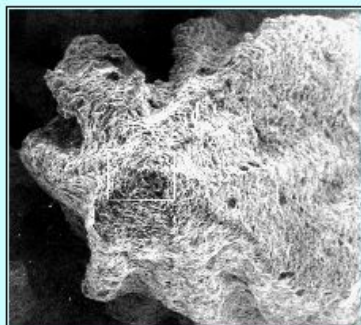
б) x 40



в) x 120



г) x 40



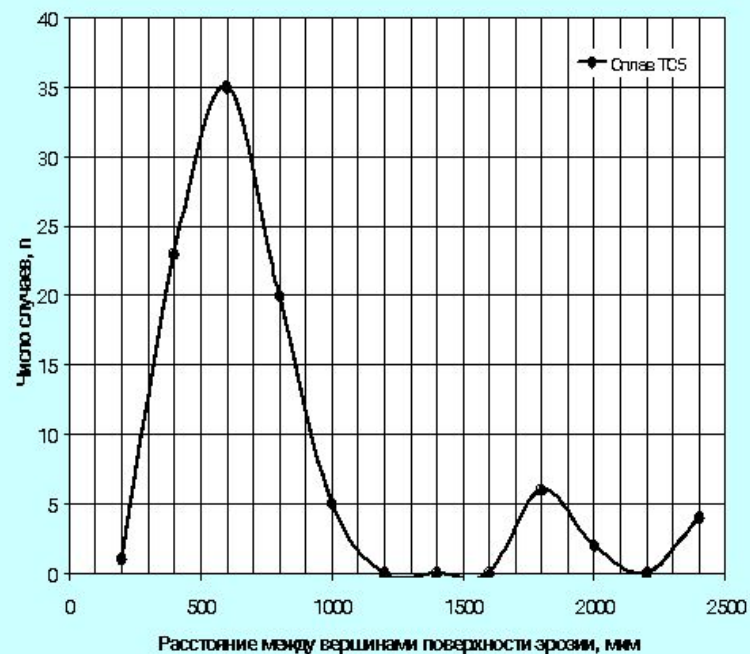
д) x 800



е) x 240



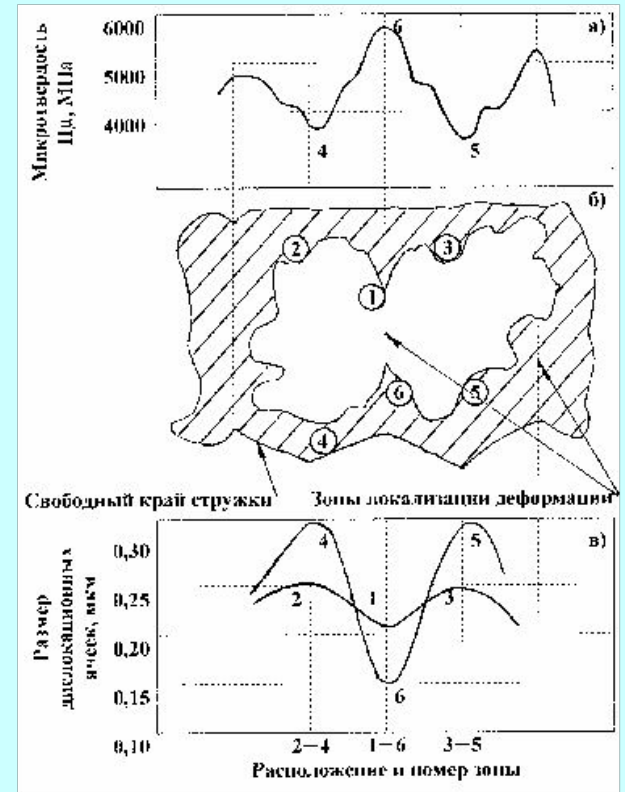
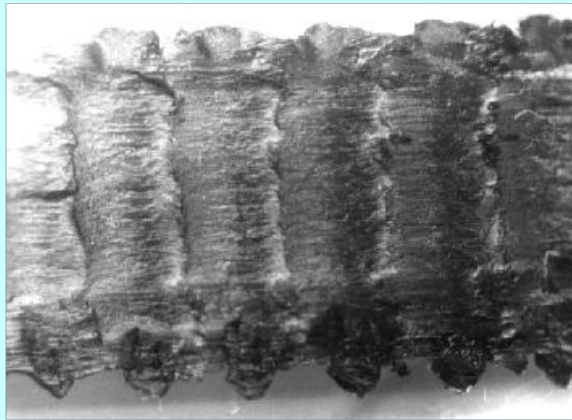
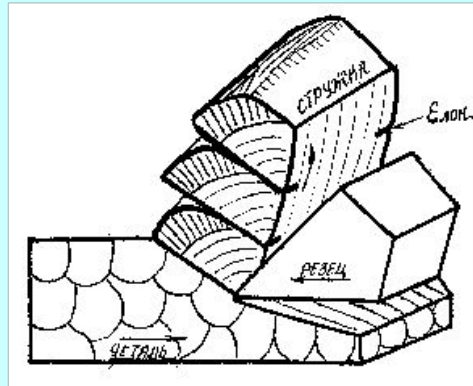
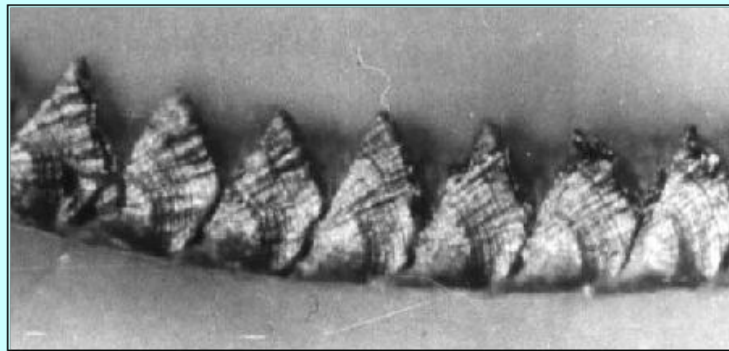
Отпечаток с поверхности лопатки, подвергнутой каплеударной эрозии, x 30



Гистограмма распределения расстояний между вершинами отдельных элементов эрозии,



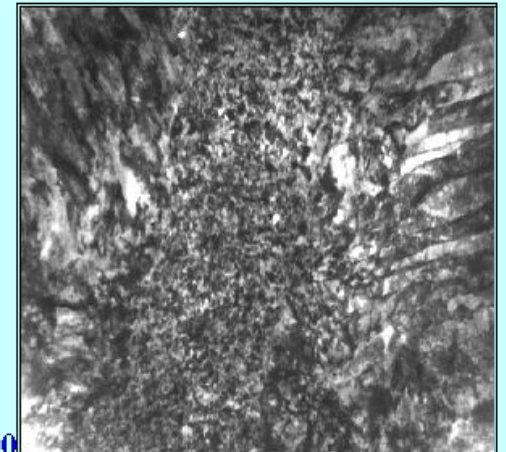
# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ



x 1600

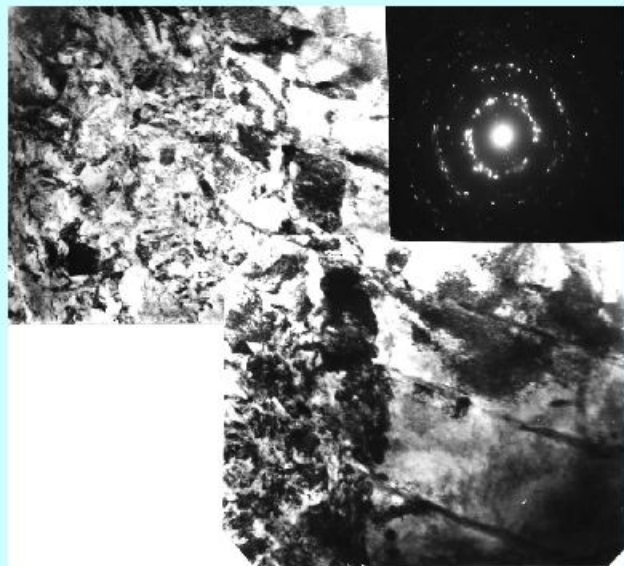


X24000

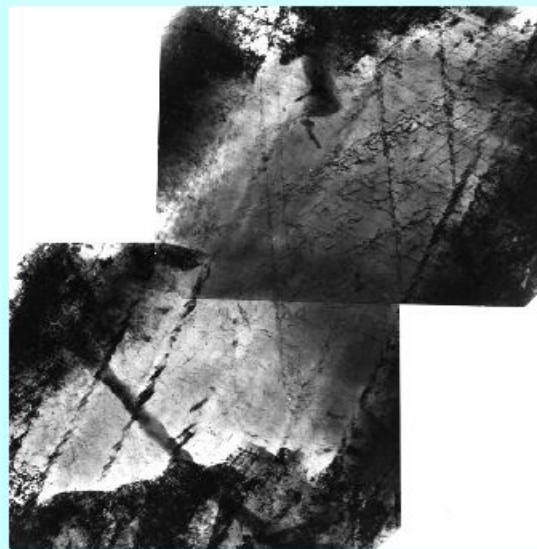




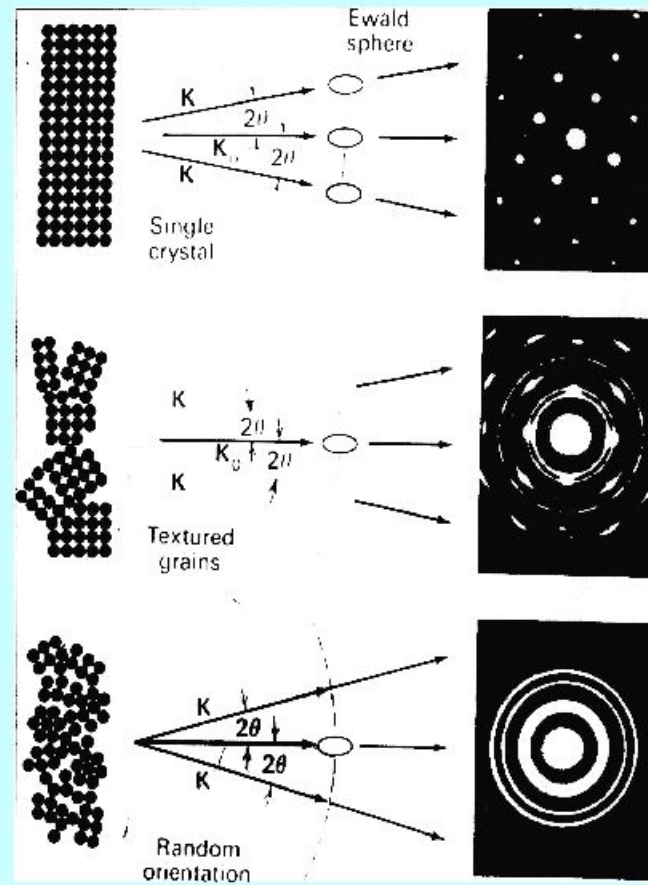
$(ds/dt = 10^{-5} \dots 10^{-7} \text{ 1/сек})$



x 24000



x 24000



# Контрольные

## **Классификация видов деформации.**

Механизмы пластической деформации.

Деформация по механизму скольжения

Деформация по механизму двойникования

Деформация по механизму мартенситного превращения

Выбор механизма деформации

Эволюция дислокационной структуры с увеличением степени деформации и плотности дислокаций. Формирование критической структуры.

## **Классификация трещин и видов разрушения**

Зарождение трещин

*Межзёренное распространение трещины*

- хрупкое зернограничное разрушение

- вязкое зернограничное разрушение

*Внутризёренное распространение трещины*

–Скол; –Микроскол; –Квазискол - Чашечный.

Способы оценки работы зарождения и распространения трещины по испытаниям на растяжение и ударный изгиб.

Фрактографический анализ изломов сплавов с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Испытания на выносливость. Усталостный механизм разрушения.

Коррозионное разрушение

**Спасибо  
за внимание**