

Физика технологических процессов в машиностроении

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

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

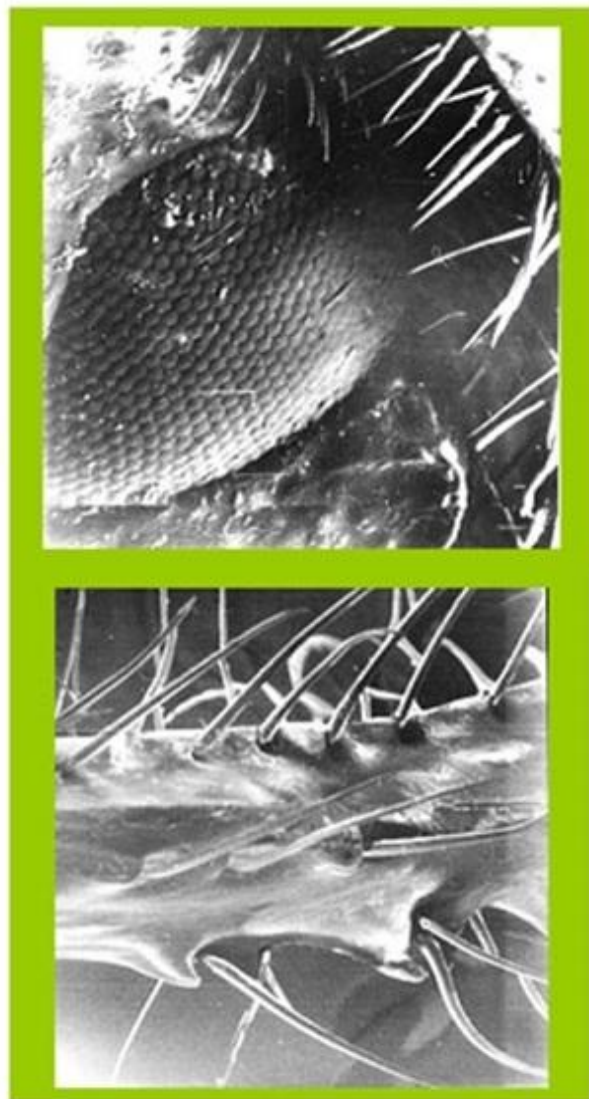
Кафедра "Машиноведение и
основы конструирования"
ИММиТ САБПУ



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** (ϵ) – 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/сек)



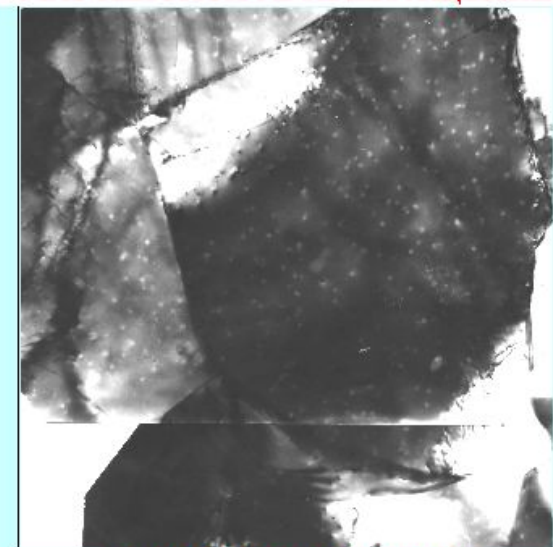
СКОЛЬЖЕНИЕ



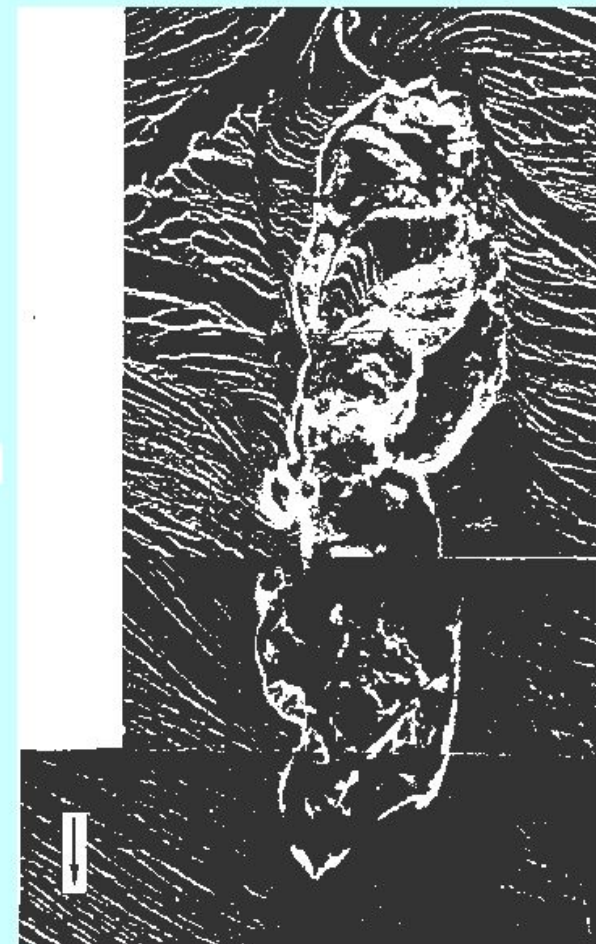
МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ



ДВОЙНИКОВАНИЕ



ПОРООБРАЗОВАНИЕ

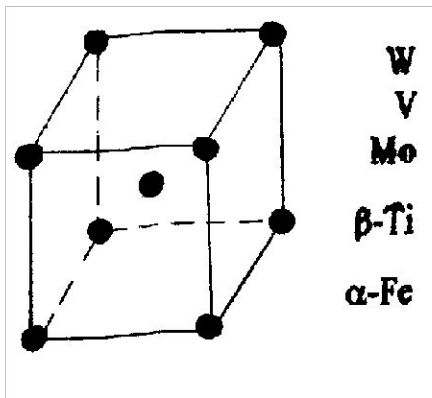


ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕЙ

Деформация по механизму скольжения

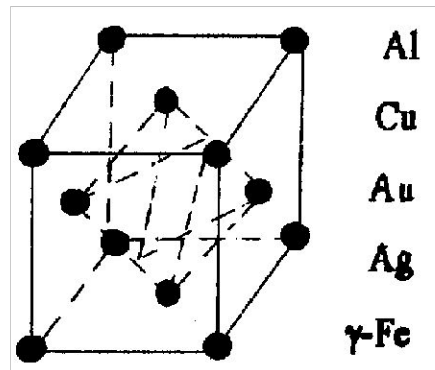
	ОЦК	ГЦК	ГПУ
Наиболее плотноупакованные плоскости $\{hkl\}$ и направления $\langle pqr \rangle$ сдвига.	$\{110\}, \langle 111 \rangle$	$\{111\}, \langle 110 \rangle$	$\{0001\}, \langle 11-20 \rangle$
число плоскостей $\{hkl\}$ сдвига	6	4	1
число направлений $\langle pqr \rangle$ сдвига	2	3	3
общее количество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

ОЦК



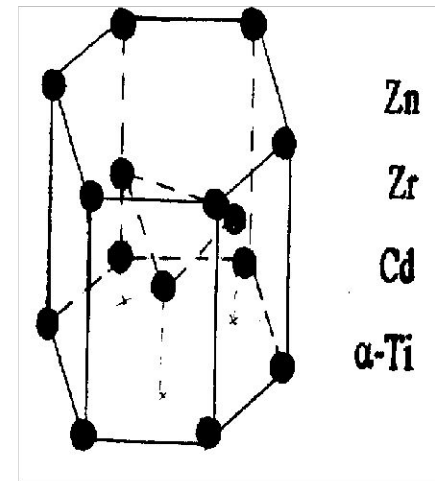
$\{110\}, \langle 111 \rangle$

ГЦК



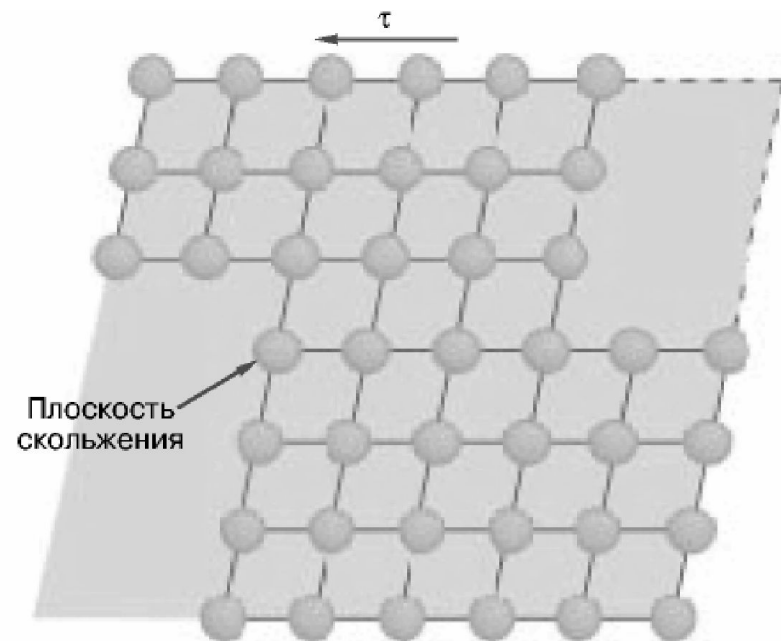
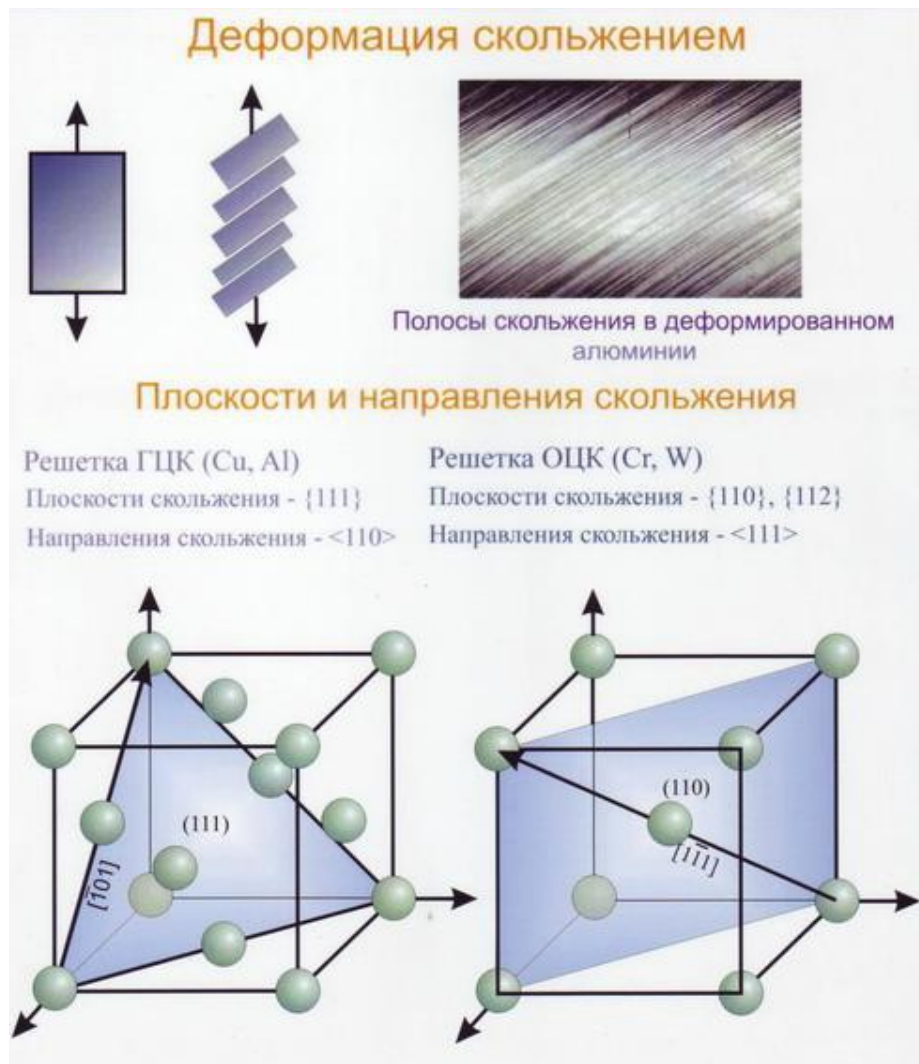
$\{111\}, \langle 110 \rangle$

ГПУ



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

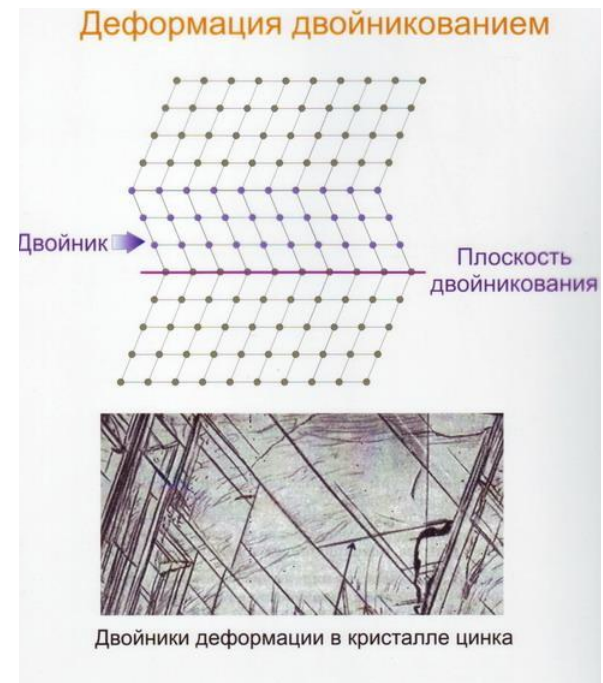
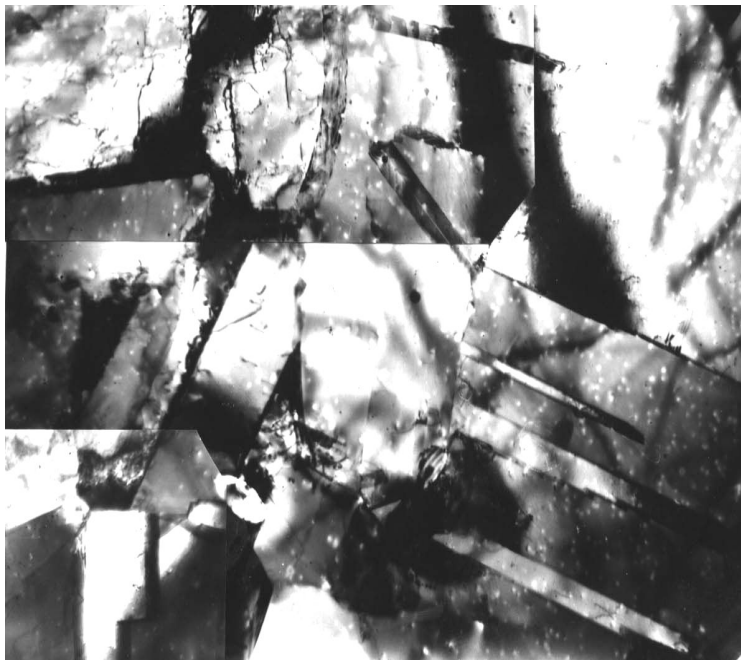
Деформация по механизму скольжения



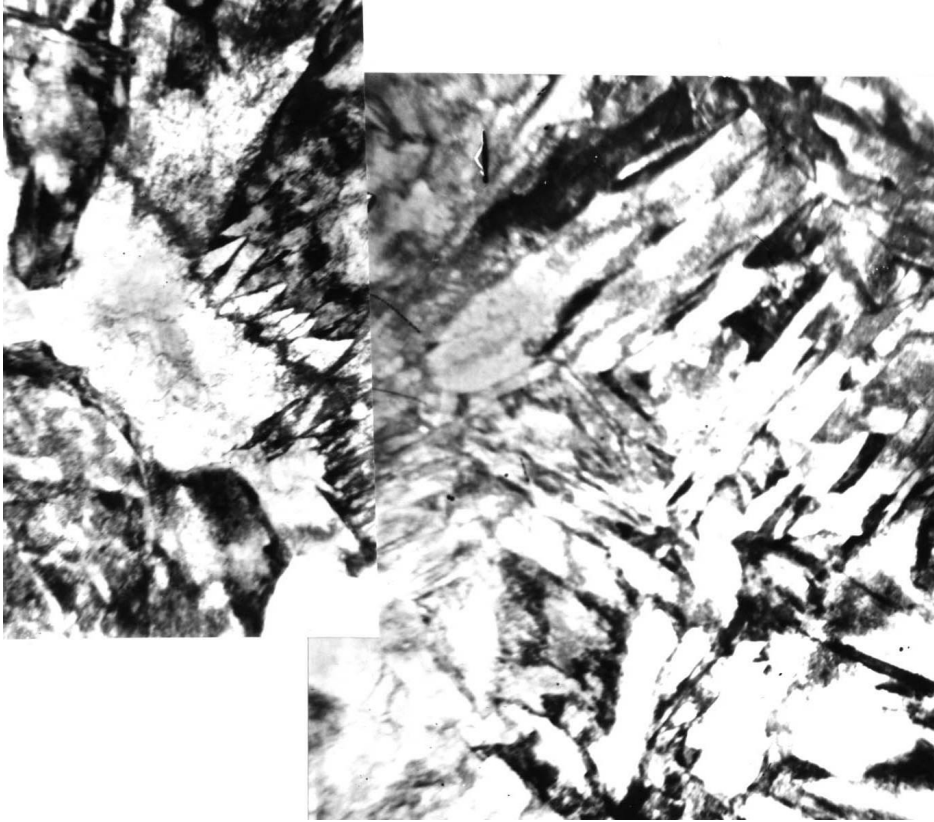
- Схема деформации кристалла при скольжении. τ - напряжение сдвига.

Деформация по механизму двойникования

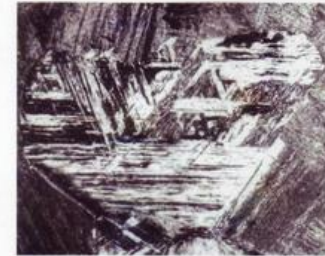
	ОЦК	ГЦК	ГПУ
Плоскости $\{hkl\}$ и направления сдвига $\langle rqr \rangle$ при двойникования.	$\{112\}, \langle 111 \rangle$	$\{111\}, \langle 112 \rangle$	$\{10\bar{1}2\}, \langle 1011 \rangle$
число плоскостей двойникования	6	4	1
число направлений двойникования	2	3	3
общее количество элементов двойникования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



Деформация по механизму мартенситного превращения



Структура мартенсита



Пакетный (реечный) мартенсит

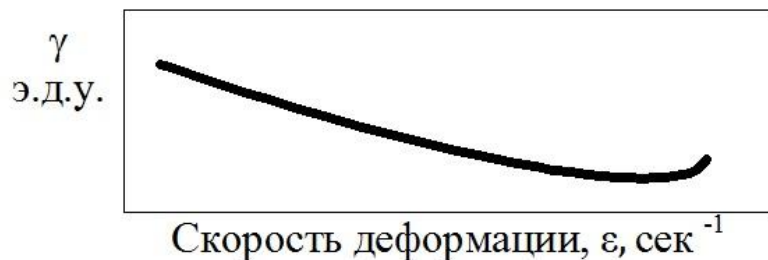
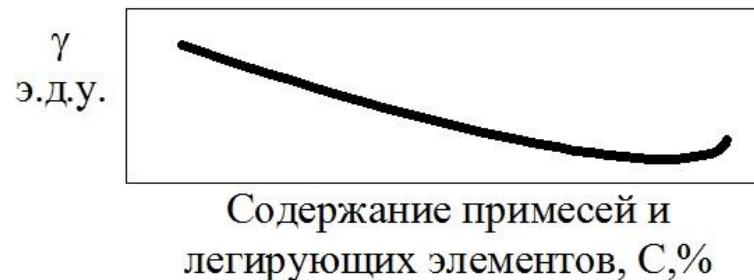


Пластинчатый (двойникованный) мартенсит

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 ²	300	280	200	140	110	90	50	40	30	26	20	17	10



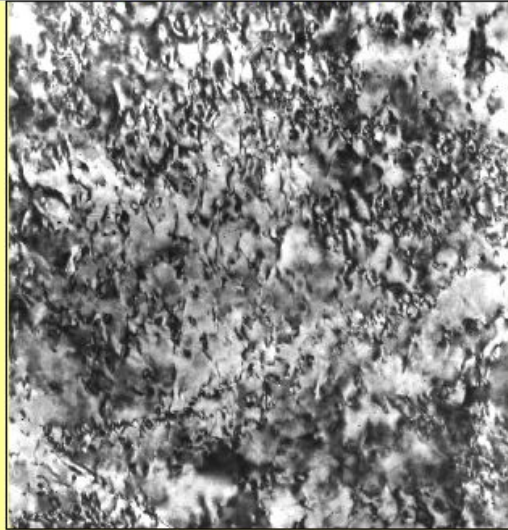
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С УВЕЛИЧЕНИЕМ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ($de / dt = \text{const} = 10^{-3}, 1/\text{сек}$) ($\rho_L < 2 \cdot 10^{11}, 1/\text{см}^2$)

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

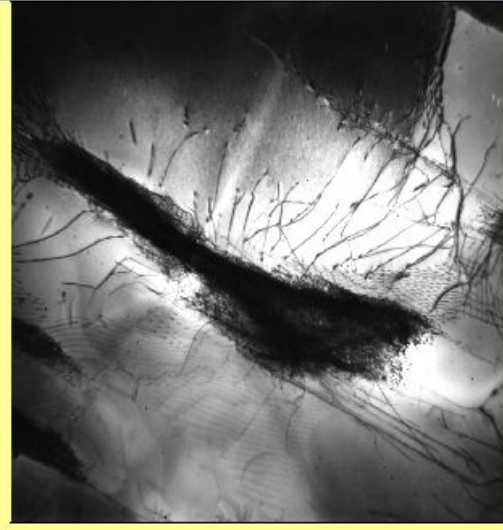
$\rho_L = 5 \dots 10 \cdot 10^9, 1/\text{см}^2$

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

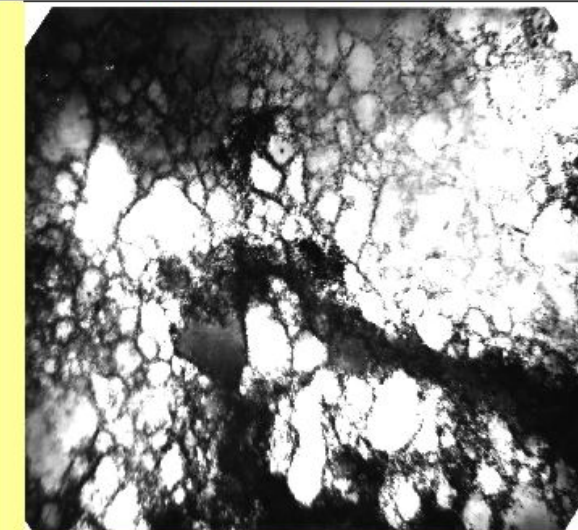
**ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ**



ХАОТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

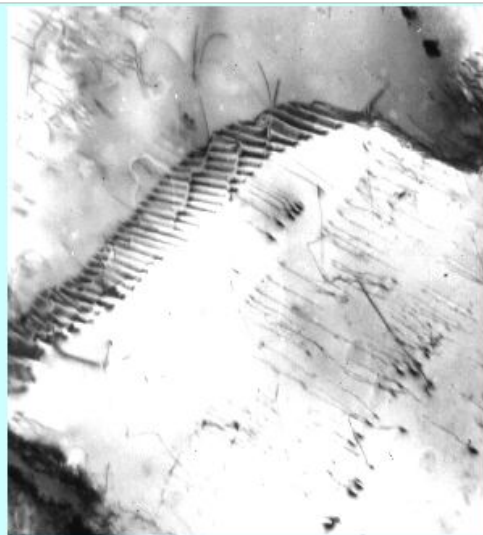


КЛУБКИ ДИСЛОКАЦИЙ



ЯЧЕЙСТАЯ СТРУКТУРА

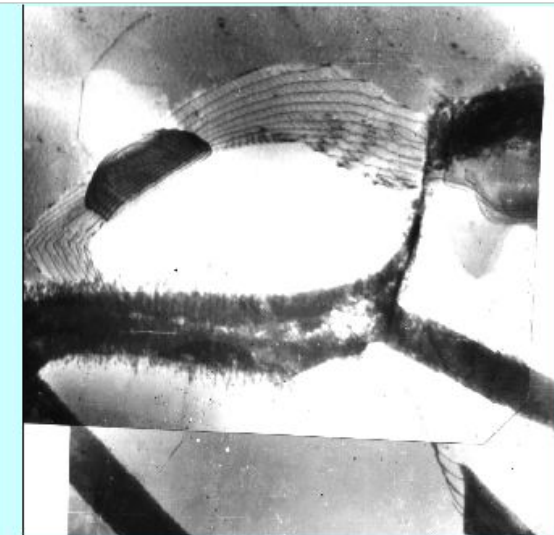
**НИЗКАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФЕКТА
УПАКОВКИ**



ПЛОСКИЕ СКОПЛЕНИЯ



ПЛОСКАЯ СЕТЧАТАЯ



ЯЧЕЙСТО-СЕТЧАТАЯ

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

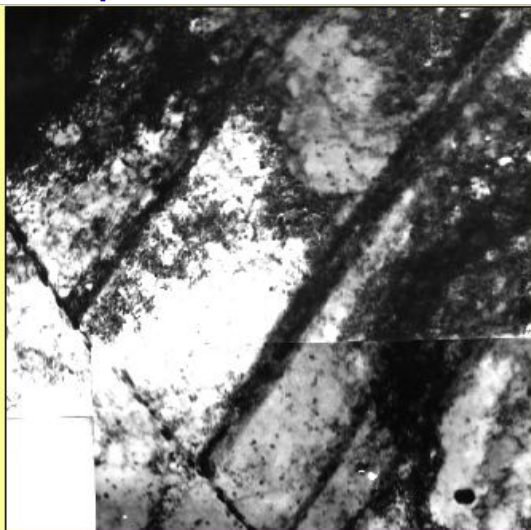
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

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

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

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

ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ

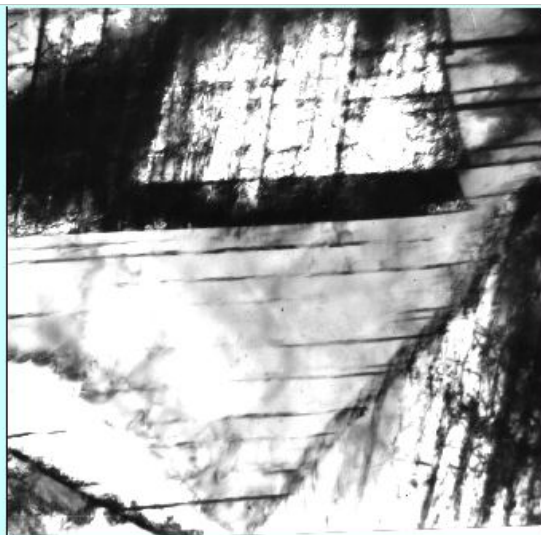


ПОЛОСОВАЯ СТРУКТУРА

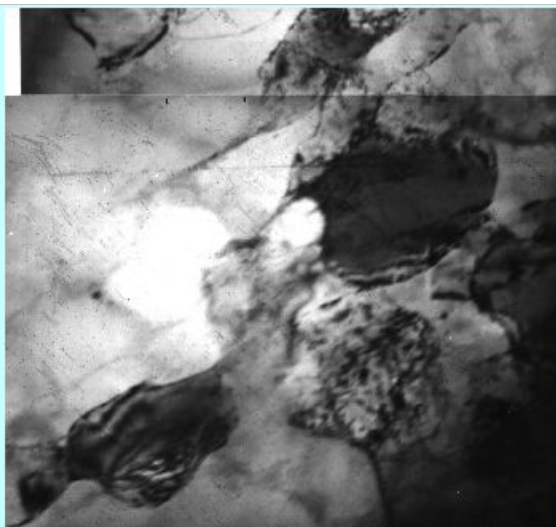


ФРАГМЕНТИРОВАННАЯ СТРУКТУРА

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.

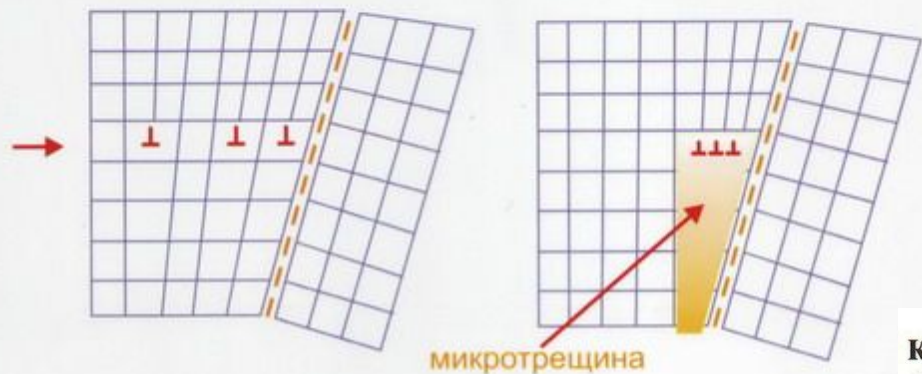
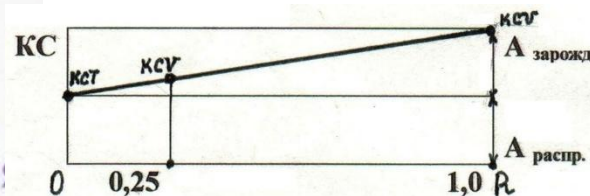
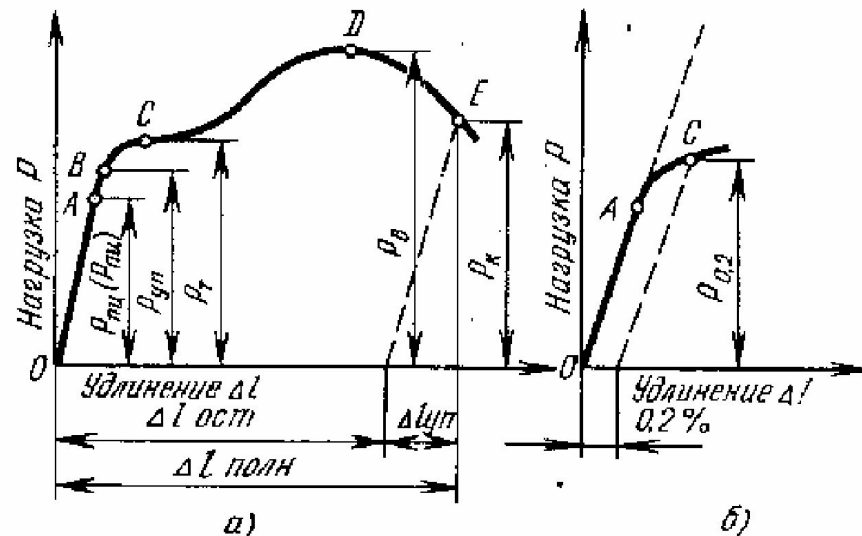


Схема зарождения микротрещины при пересечении двух плоскостей скольжения:



Методика Гуляева:

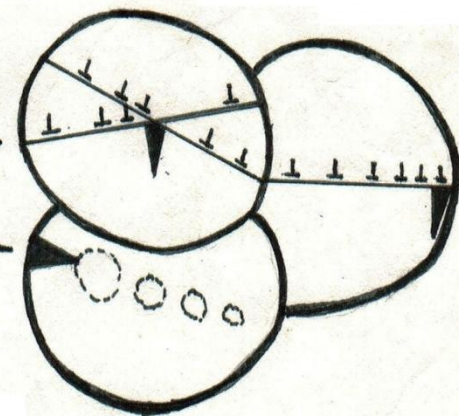
$$A_{распр.} = A_{зар.} + A_{распр.}$$

$$Fe: A_{зар} > A_{распр.}$$

$$Ti: A_{зар} < A_{распр.}$$

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,
 γ – плотность материала.

Интеркристаллитное:

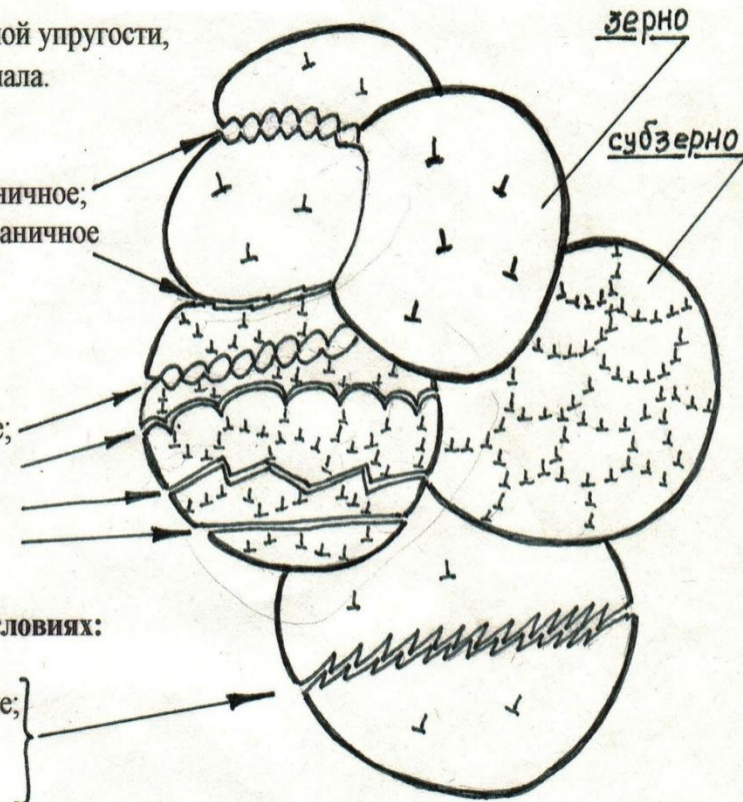
- вязкое зернограничное;
- хрупкое зернограничное

Транскристаллитное:

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

Разрушение в особых условиях:

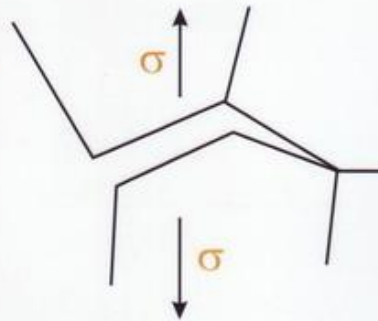
- микрорасслоение;
- коррозионное;
- усталостное



Межзёрное Распространение трещины

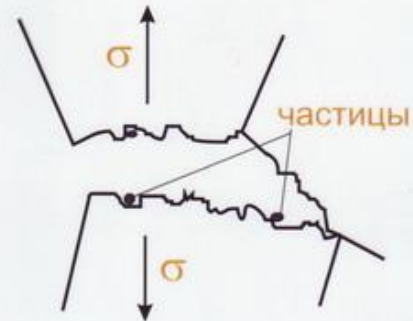
Межзеренное разрушение

Хрупкое разрушение

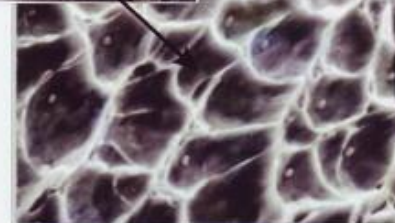


РЭМ x 300

Вязкое разрушение



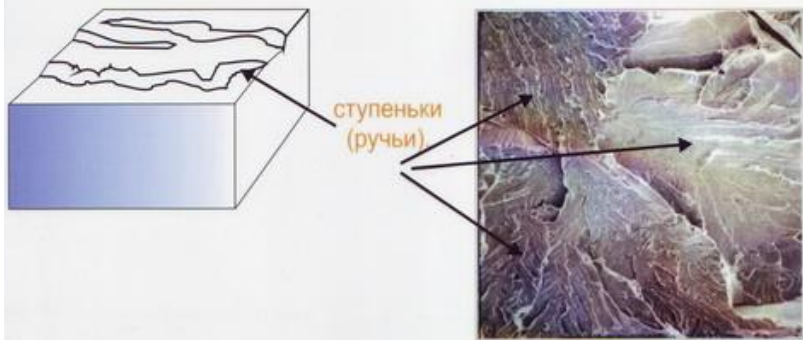
РЭМ x 100



РЭМ x 500

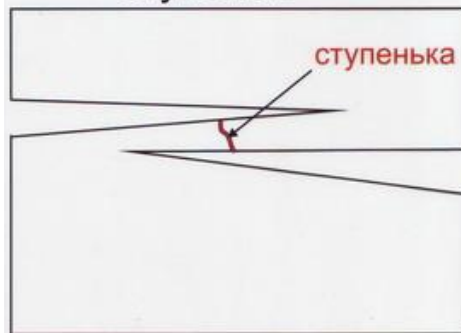
Внутризеренное Распространение трещины

Хрупкое внутризеренное разрушение
(скол)



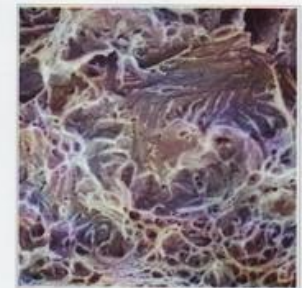
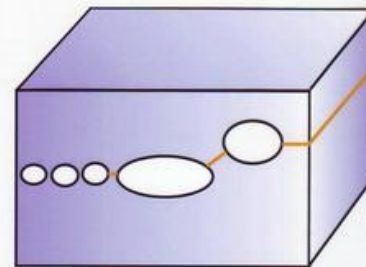
РЭМ x 300

Образование
ступенек.

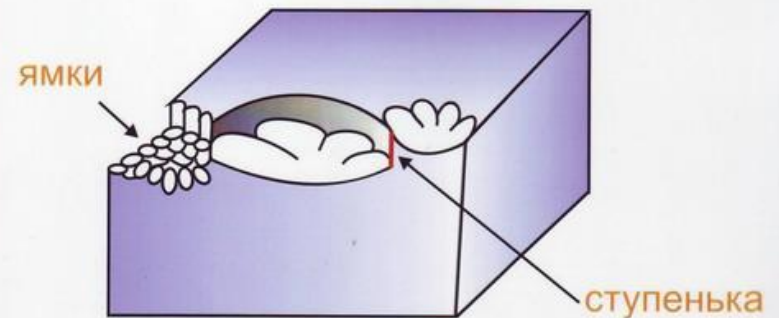


Хрупкое разруше-
ние Fe_{α} происхо-
дит по плоскостям
{100}.

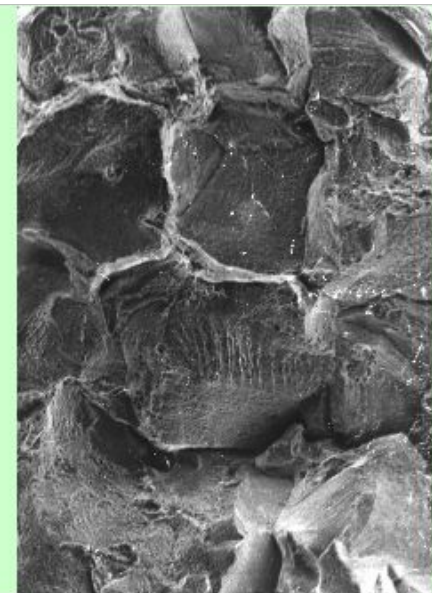
Внутризеренное разрушение
квазисколом



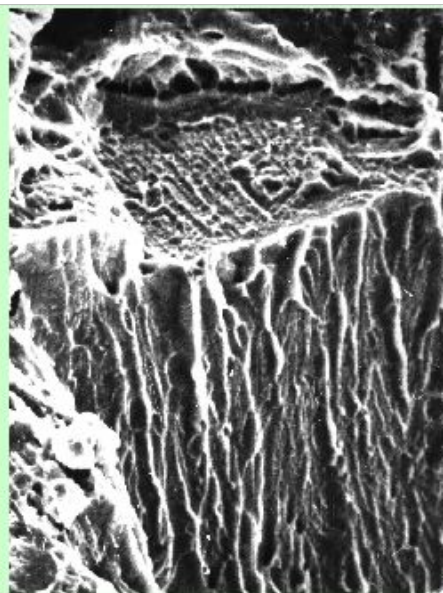
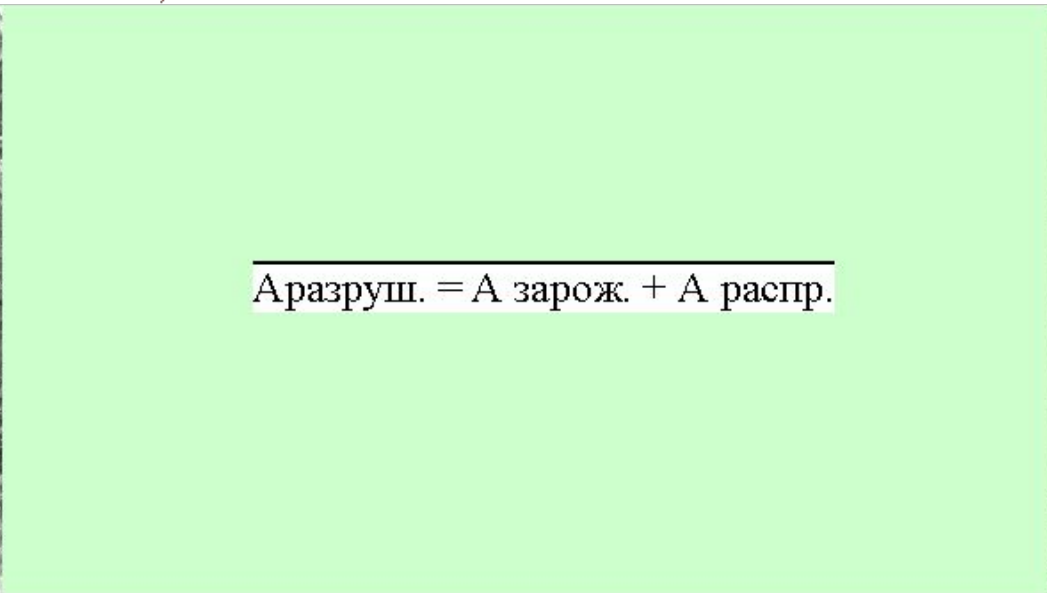
РЭМ x300



МЕЖЗЕРЕННОЕ, ИНТЕРКРИСТАЛЛИТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ

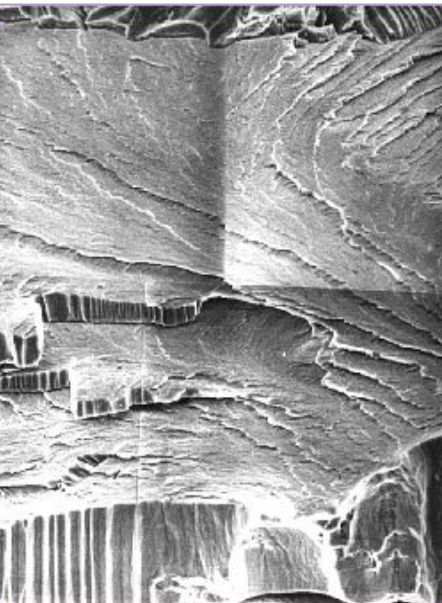


Хрупкий зернограничный

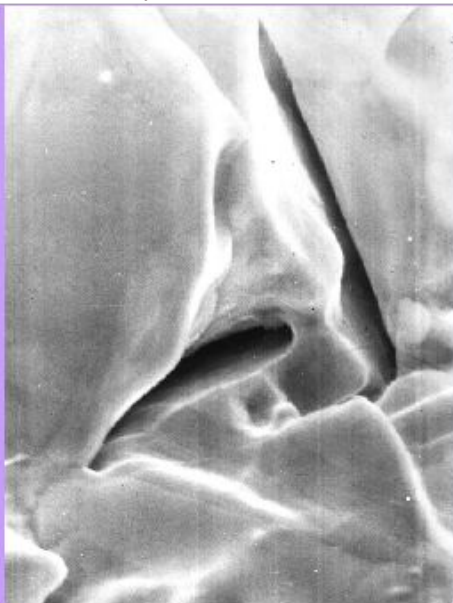


Вязкий зернограничный

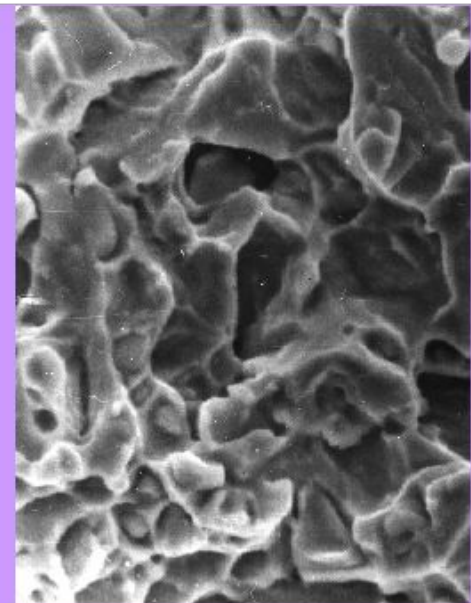
ВНУТРИЗЕРЕННОЕ, ТРАНСКРИСТАЛЛИТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ



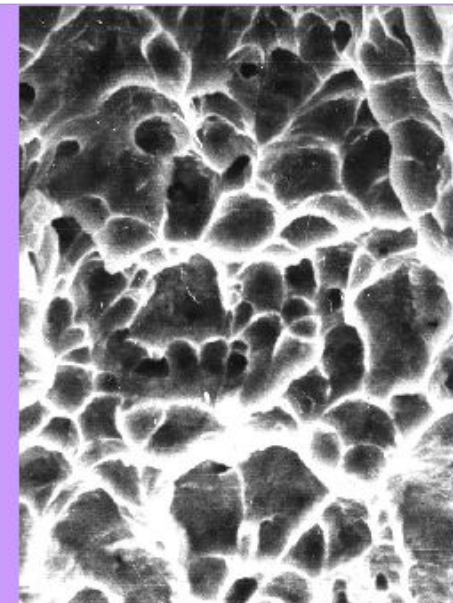
СКОЛ



МИКРОСКОЛ



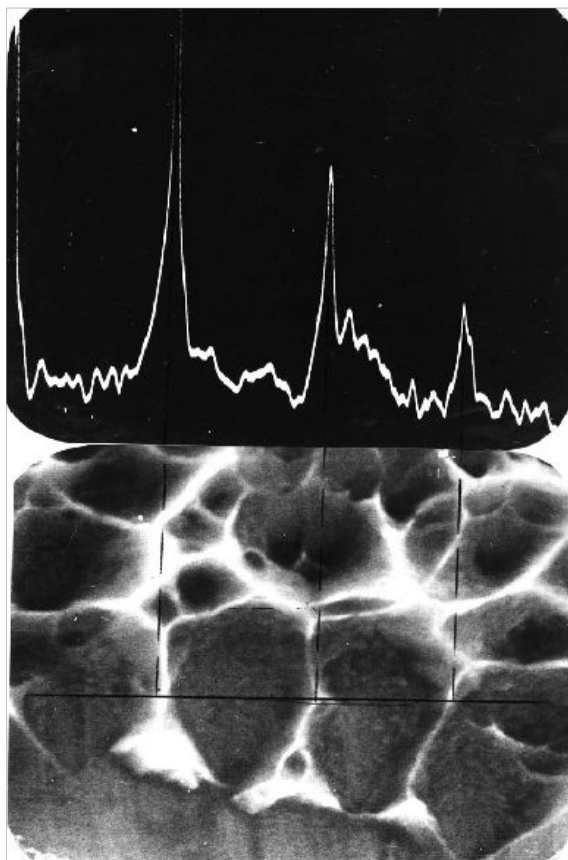
КВАЗИСКОЛ



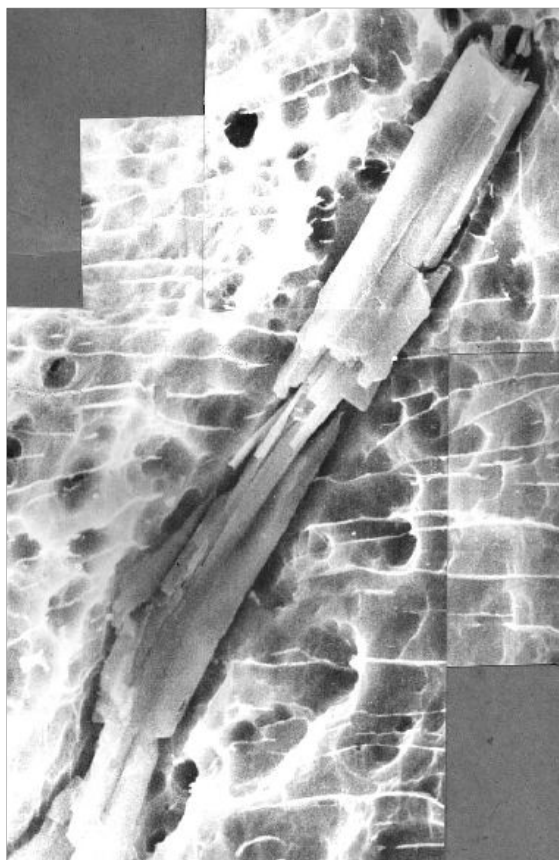
ЧАШЕЧНЫЙ

ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗЛОМОВ

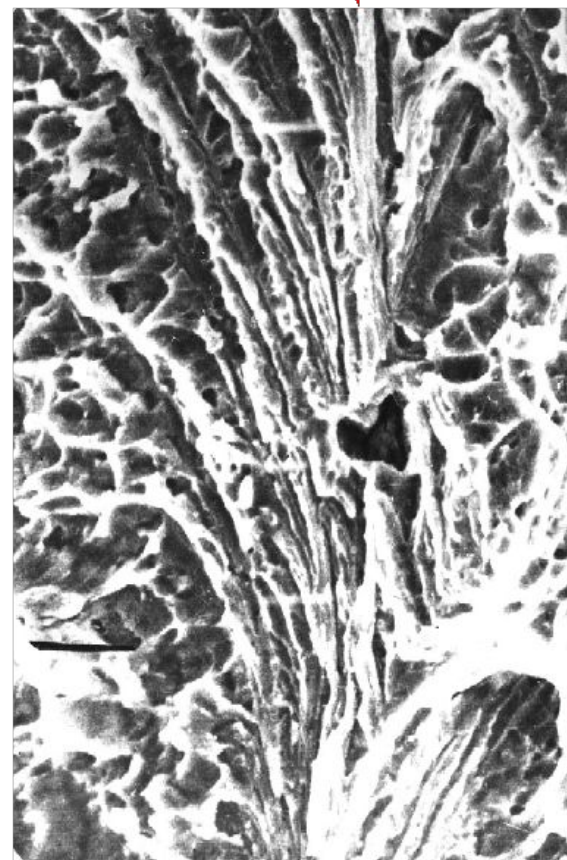
ШЕРОХОВАТОСТЬ



ФАЗА



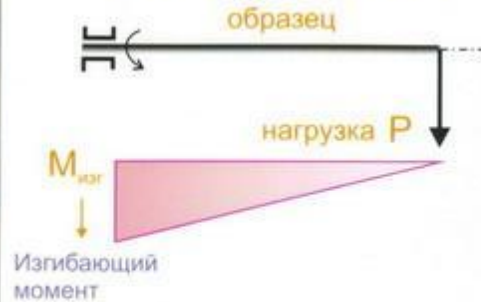
ЛИКВАЦИЯ



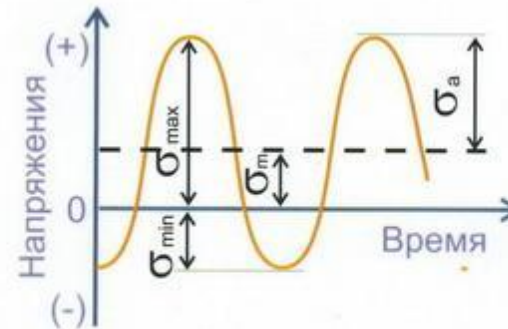
Испытания на выносливость

Испытания на выносливость

Схема нагружения - изгиб с вращением

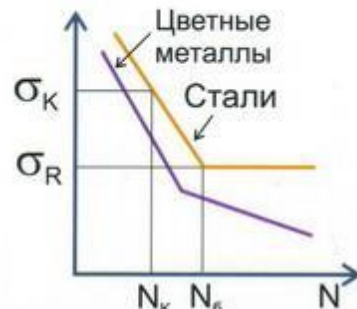


Цикл напряжений



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

Кривые усталости

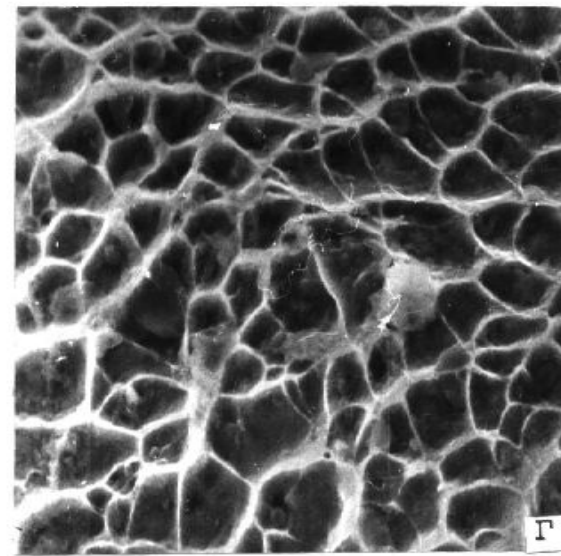
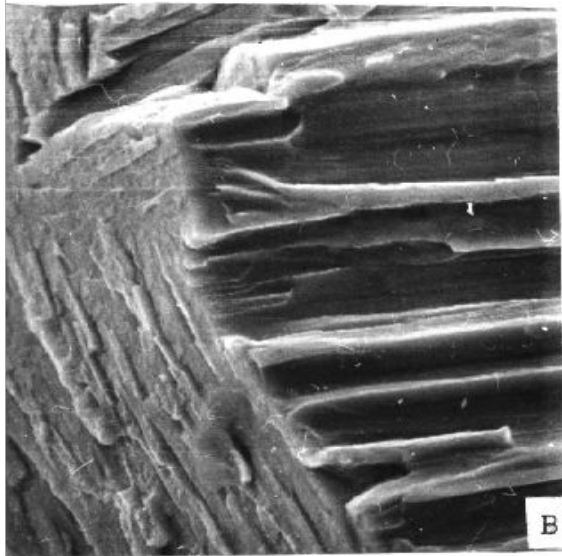
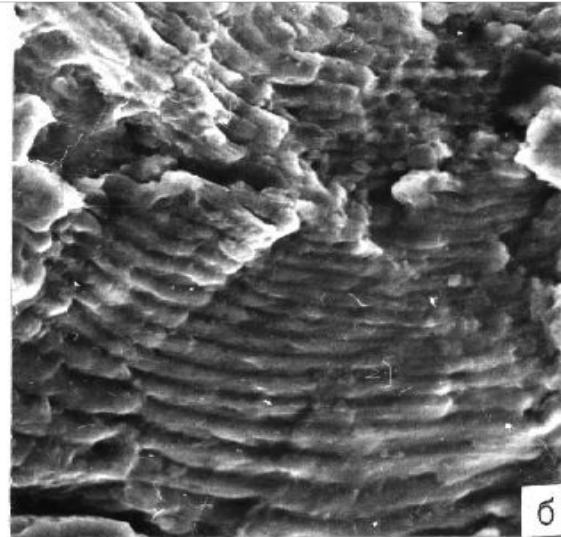
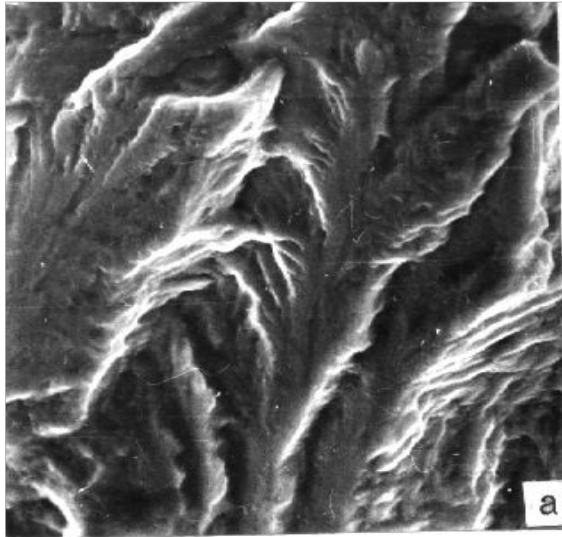


σ_R - физический предел выносливости
 σ_K - ограниченный предел выносливости при заданном количестве циклов N_K .

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 ₂ O ₃	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

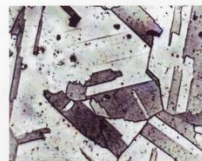
В зависимости от структуры, образующейся при охлаждении на воздухе, хромистые стали делятся на следующие классы: мартенситные, мартенситно-ферритные (содержат более 10 % феррита) и ферритные.

Марка стали	Содержание, %				Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{0,9}$ МПа	δ , %	Ψ , %
	C	Cr	Ti	другие					
Стали мартенситного класса									
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
Стали мартенситно-ферритного класса									
12X13	0,09-0,15	12-14	-	-	Закалка от 1000-1050°C + отпуск 700-770°C	410	590	20	60
Стали ферритного класса									
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

Хромоникелевые аустенитные коррозионностойкие стали

Марка стали	Содержание, %				Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{0,9}$ МПа	δ , %
	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

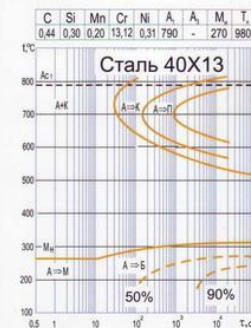
Структура стали 12X18H10T после закалки



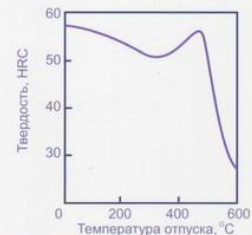
x1000

Свойства хромистых коррозионностойких сталей

Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали 40X13



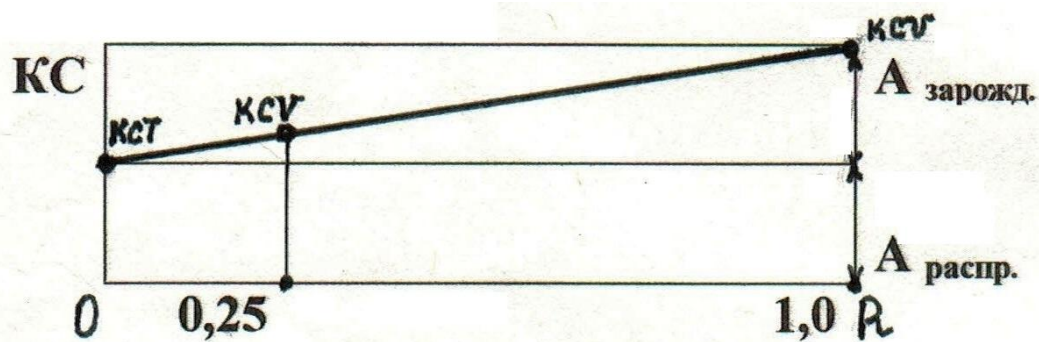
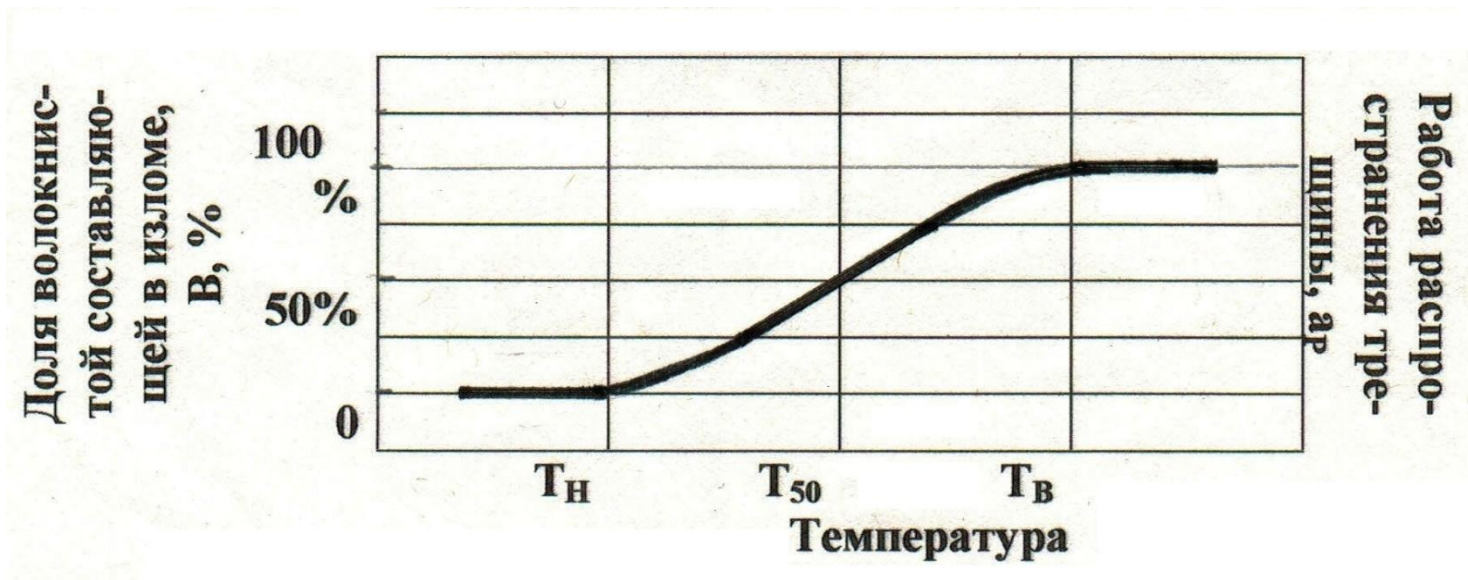
Зависимость коррозионной стойкости стали 10X13 от температуры отпуска



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

Классификация видов ударного разрушения

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



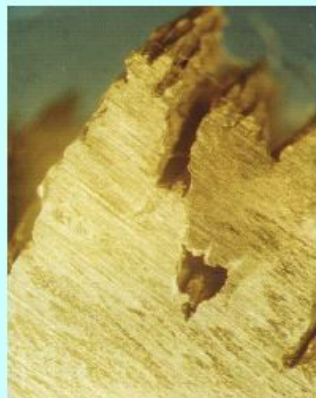
Методика Гуляева:

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

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

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

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



а) $\times 40$



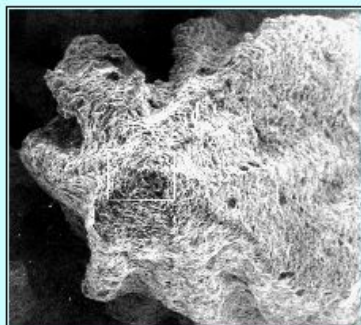
б) $\times 40$



в) $\times 120$



г) $\times 40$



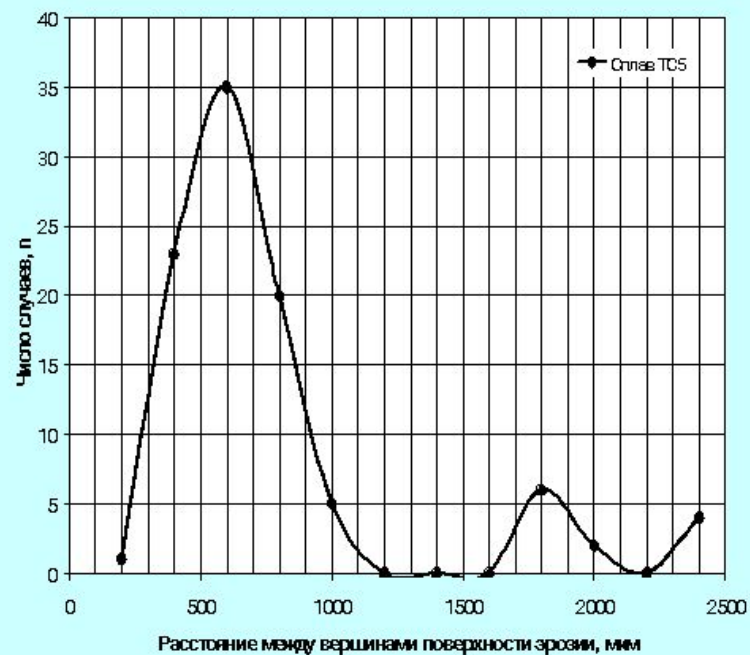
д) $\times 800$



е) $\times 240$

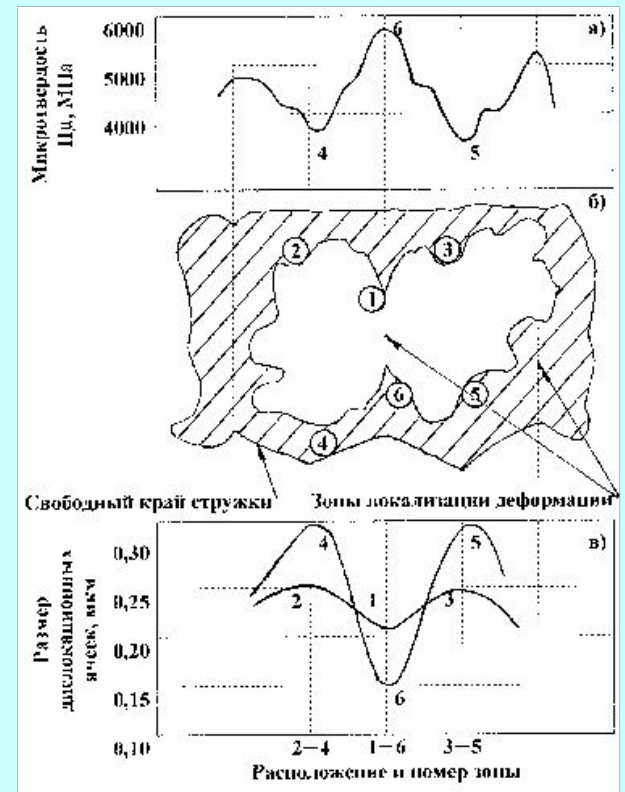
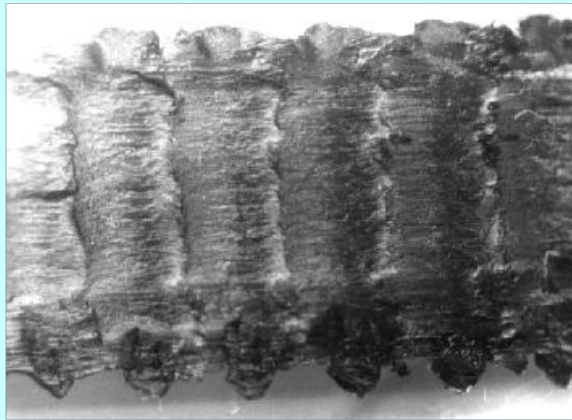
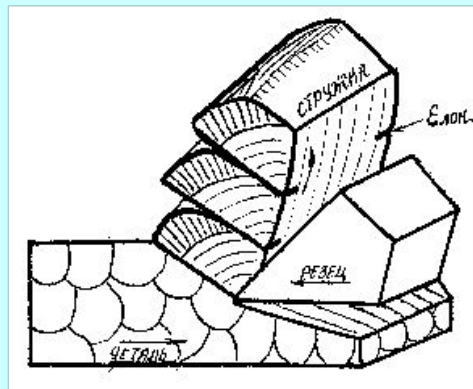
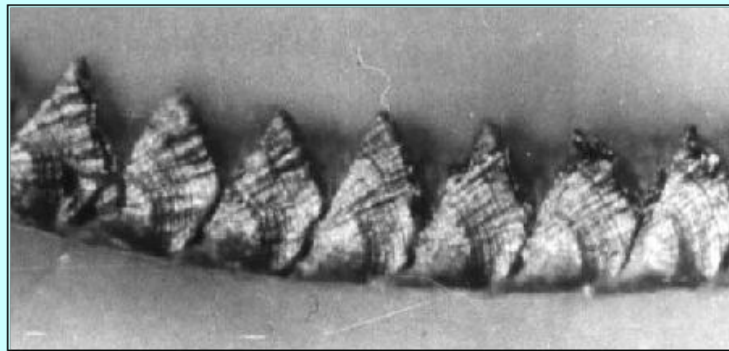


Отпечаток с поверхности лопатки, подвергнутой каплеударной эрозии, $\times 30$



Гистограмма распределения расстояний между вершинами отдельных элементов эрозии,

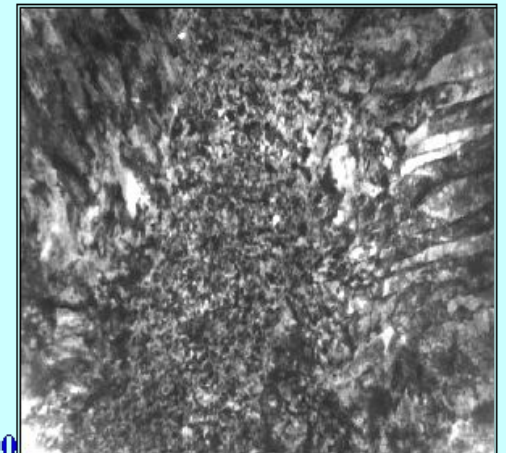
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ



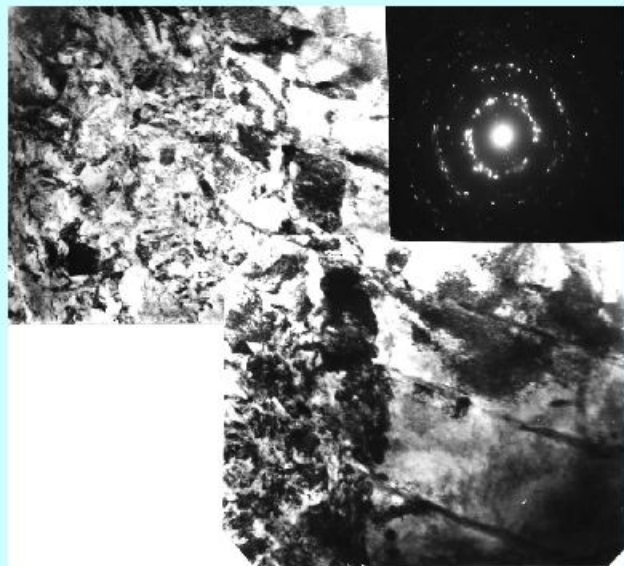
x 1600



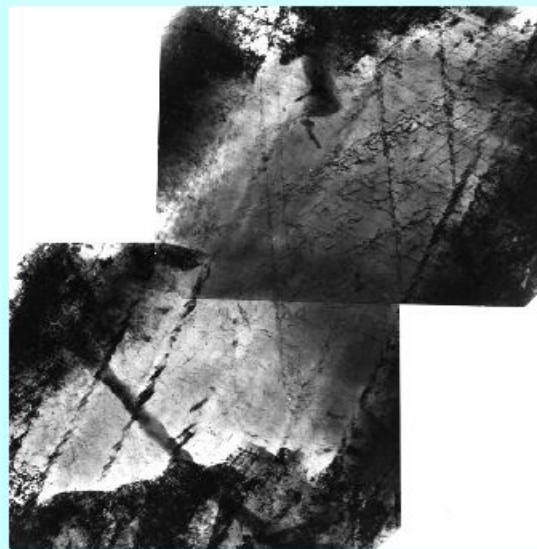
X24000



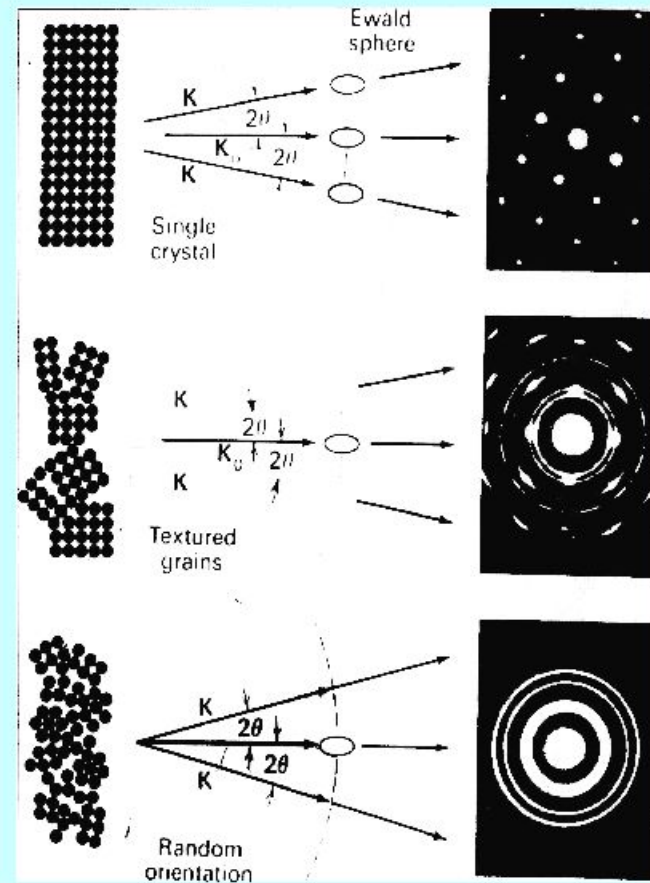
$(ds/dt = 10^{-5} \dots 10^{-7} \text{ 1/сек})$



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**