

Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

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

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

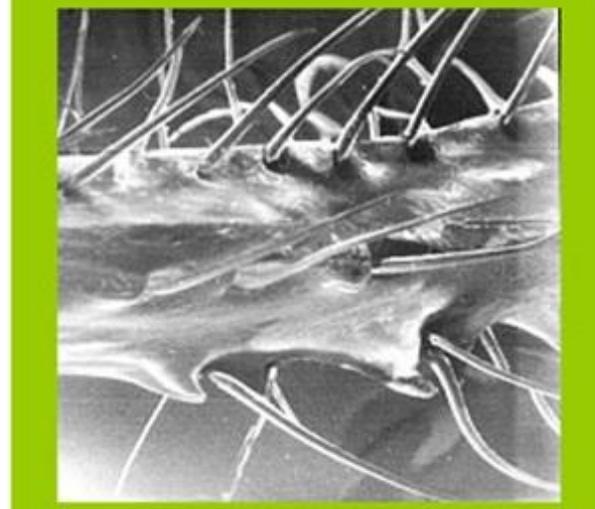
Кафедра "Машиноведение и
основы конструирования"
ИММиТ САБПУ



x 1



x 100



x 10000

Тема 4. Механизмы релаксации напряженно-деформированного состояния металла деталей машин. Модели вязко-хрупкого перехода.

4.1. Структурная релаксация напряженно-деформированного состояния металла деталей машин.

Холодная деформация

1. Закономерности структурных превращений в материалах с увеличением степени их пластического деформирования.
2. Текстурирование металлов при холодном деформировании. Анизотропия свойств деформированных полуфабрикатов.
3. Влияние нагрева на строение и свойства сплавов после холодной деформации. Отдых. Полигонизация. Рекристаллизация. Диаграмма рекристаллизации.

4.2. Концентрационная релаксация напряженно-деформированного состояния металла

4. Формирование неравновесных твердых растворов в результате деформации, закалки, фазового превращения.
5. Примеры концентрационной релаксации (перераспределения легирующих элементов) при растяжении и шлифовании.
6. Закономерности изменения физико-механических свойств и структурно-химических параметров двухфазных ($\alpha+\beta$) деформированных металлических материалов при их нагреве.

4.3. Релаксация напряженно-деформированного состояния металла за счёт формирования зародышевой трещины

7. Критическая степень пластической деформации. Критический размер зародышевой трещины.

4.4. Влияние скорости и температуры пластической деформации на релаксацию напряженно-деформированного состояния металла.

8. Скорость пластической деформации конструкционного материала от способа его обработки.
9. Влияние на структурную релаксацию температуры деформирования.
10. Влияние температуры и скорости деформирования. Условия сверхпластичности металлов и сплавов.

4.5. Влияние вида напряженного состояния. Модели вязко-хрупкого перехода.

11. Влияние вида напряженного состояния на свойства металлических материалов.
12. Диаграмма механического состояния Я.Б.Фридмана.
13. Модель вязко-хрупкого перехода. Хладноломкость.
14. Оценка работы зарождения и распространения трещин в материале по испытаниям на ударный изгиб

Механизмы релаксации напряженно-деформированного состояния металла

№ п/п	МЕХАНИЗМЫ РЕЛАКСАЦИИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ
1.	Структурная релаксация
2.	Концентрационная релаксация
3.	Зарождение микротрещин

№ п/п	ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ
1.	Энергия дефекта упаковки материала
2.	Степень наклепа
3.	Температура деформации или нагрева
4.	Скорость деформации
5.	Вид упруго-напряженного состояния

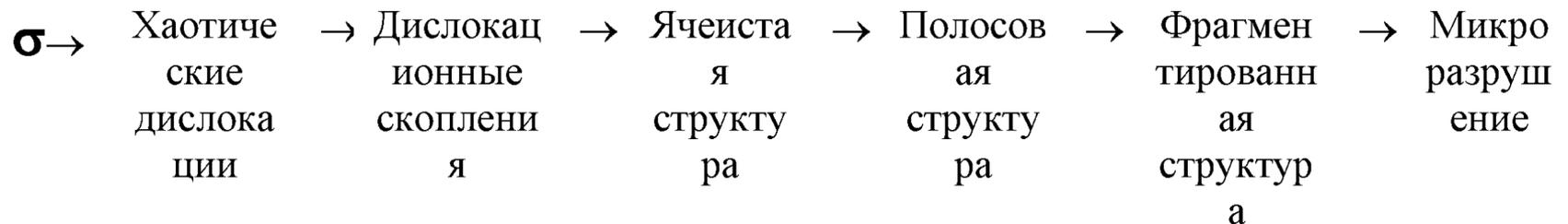
4.1. Структурная релаксация напряженно-деформированного состояния металла.

4.1. Структурная релаксация напряженно-деформированного состояния металла

4.1.1. Закономерности структурных превращений в материалах с увеличением степени их пластического деформирования

Исследования показали, что по мере увеличения степени пластической деформации и роста плотности дислокаций, субструктуры закономерным образом последовательно сменяют друг друга. Перераспределение дислокаций при деформации постоянно стремится привести дислокационную подсистему к некоторому локальному минимуму по внутренней энергии. Поэтому нередко при одинаковой плотности дислокаций энергия новой субструктуры, образующейся в процессе деформации, ниже, чем энергия старой.

По мере **увеличения степени холодной деформации**, формируются дислокационные структуры: сначала по ламинарным (сдвиговым) механизмам и далее по ротационным (поворотным).



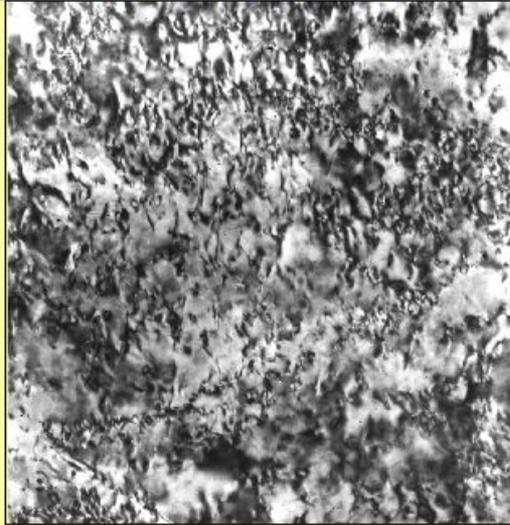
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С УВЕЛИЧЕНИЕМ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ($de / dt = \text{const} = 10^{-3}, 1/\text{сек}$) ($\rho_L < 2 \cdot 10^{11}, 1/\text{см}^2$)

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

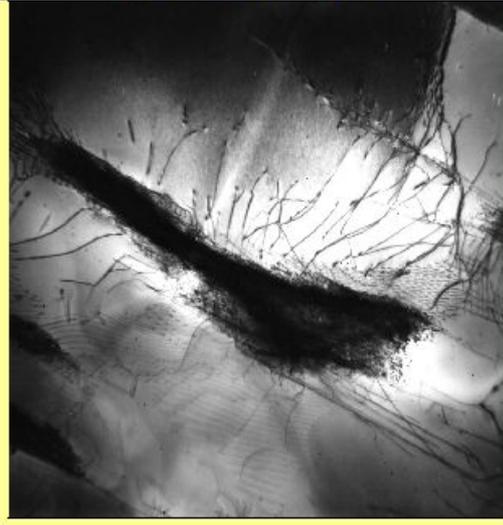
$\rho_L = 5 \dots 10 \cdot 10^9, 1/\text{см}^2$

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

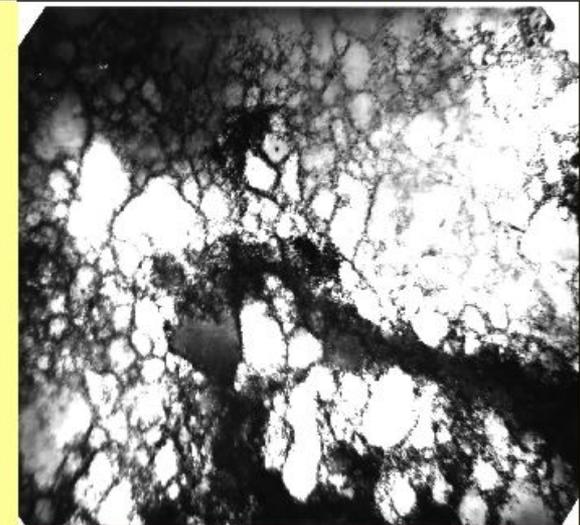
**ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ**



ХАОТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ



КЛУБКИ ДИСЛОКАЦИЙ



ЯЧЕЙСТАЯ СТРУКТУРА

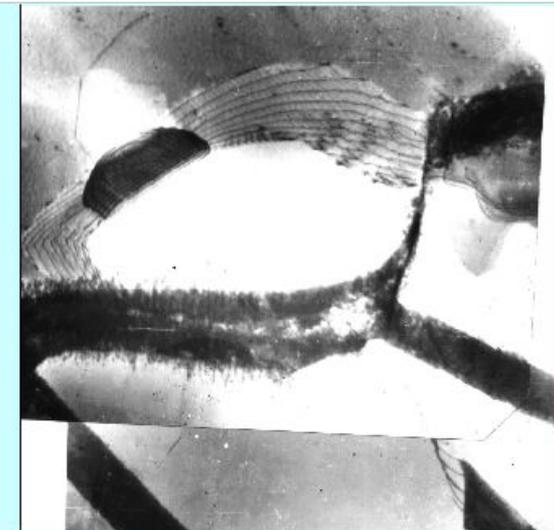
**НИЗКАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФЕКТА
УПАКОВКИ**



ПЛОСКИЕ СКОПЛЕНИЯ



ПЛОСКАЯ СЕТЧАТАЯ



ЯЧЕЙСТО-СЕТЧАТАЯ

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

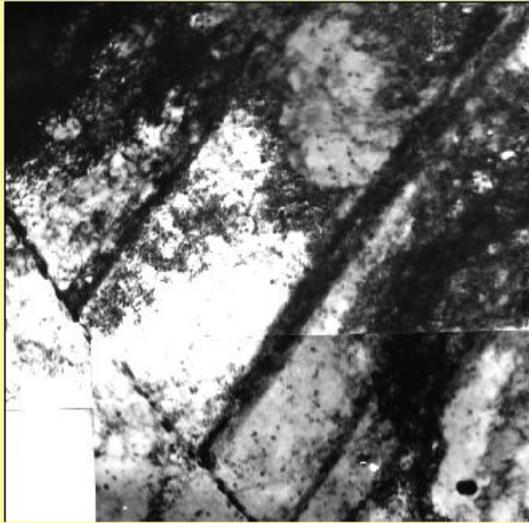
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

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

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

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

**ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ**

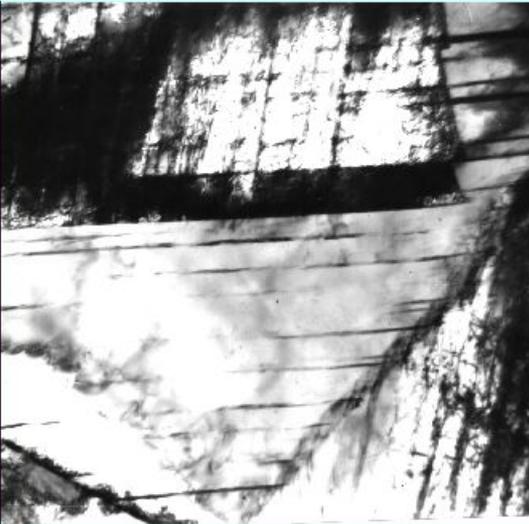


ПОЛОСОВАЯ СТРУКТУРА

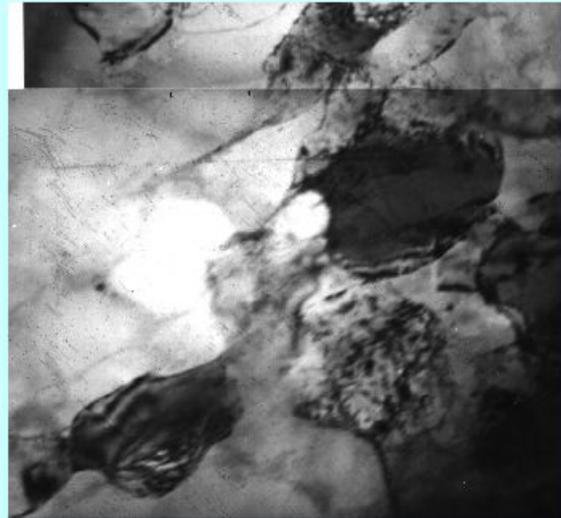


ФРАГМЕНТИРОВАННАЯ СТРУКТУРА

**НИЗКАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФЕКТА
УПАКОВКИ**



ДВОЙНИКОВАЯ СТРУКТУРА



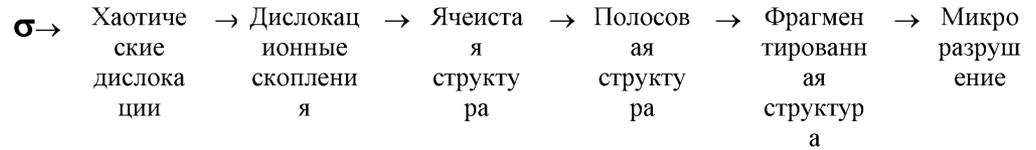
СТРУКТУРА С ДИСКРЕТНЫМИ РАЗОРИЕНТИР

4.1.1. Структурная релаксация напряженно-деформированного состояния металла

Закономерности структурных превращений в материалах с увеличением степени их пластического деформирования

Отдельные стадии эволюции структуры могут быть более или менее развитыми, что зависит от ряда параметров:

- свойств деформируемого материала (ЭДУ, устойчивость кристаллической решетки);
- вида напряженного состояния (стесненности деформации, числа систем скольжения, ограничения зоны сдвига (фактора Шмидта));
- скорости деформации;
- степени деформации;
- температуры деформации.



4.1.1. Структурная релаксация напряженно-деформированного состояния металла

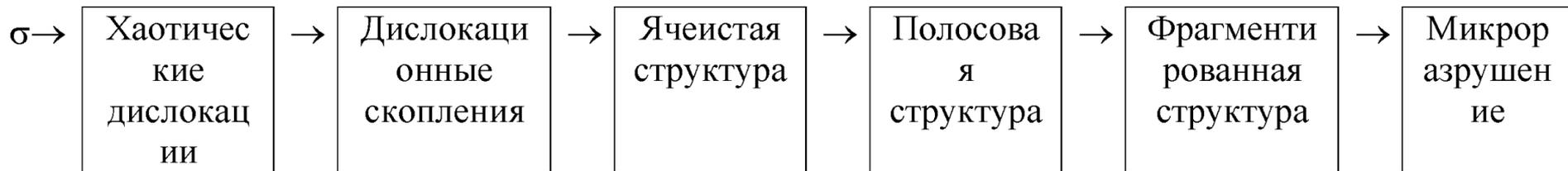
В процессе механического и термического воздействия, аккумуляция внешней энергии системой атомов основы и легирующими элементами, вызывает их смещение из своих равновесных положений (узлов кристаллической решетки), что создает в объеме деформированного металла сложное упруго-напряженное поле на всех структурных уровнях. Образующиеся при этом дислоцированные (смещенные) атомы и вакансии являются носителями избыточной энергии и способствуют повышению предела растворимости фаз. Деформация в двухфазной области приводит к формированию сразу двух α - и β - твердых растворов, пересыщенных вакансиями и разноименными им стабилизирующими элементами, тем самым, снижая энергию дефектов упаковки и способствуя расщеплению дислокаций. Для своей самоорганизации, снятия внутренних напряжений, система реализует два релаксационных механизма: **структурный и концентрационный**.

Структурная релаксация проявляется в направленных атомно-кристаллических сдвигах дислоцированных **атомов основы** и реализуется в виде закономерных **структурных превращений (отдых, полигонизация, рекристаллизация)**. С этой точки зрения, возникновение дефектов кристаллического строения (дислокаций и их скоплений) следует рассматривать, как способ релаксации внутренних напряжений после снятия нагрузки.

Концентрационная релаксация внутренних напряжений проявляется в перераспределении **легирующих элементов, примесных атомов и точечных дефектов** и реализуется в виде фазовых превращений по механизму распада.

4.1.2.Текстурообразование металлов при холодном деформировании. Анизотропия свойств деформированных полуфабрикатов

- по мере увеличения степени деформирования, формируются закономерные структуры: сначала по ламинарным (сдвиговым) механизмам и далее по ротационным (поворотным).
- **Влияние холодной деформации:**



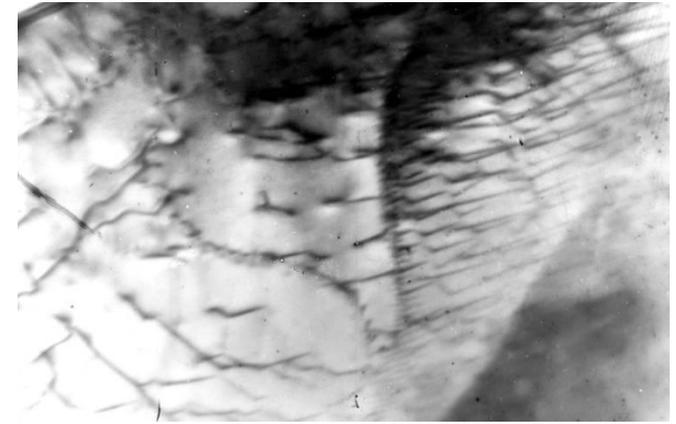
Текстура кристаллографическая – предпочтительная ориентация кристаллических ячеек зерен и фаз под действием деформации

Текстура превращения – предпочтительная ориентация кристаллических ячеек зерен и фаз под действием температуры перекристаллизации

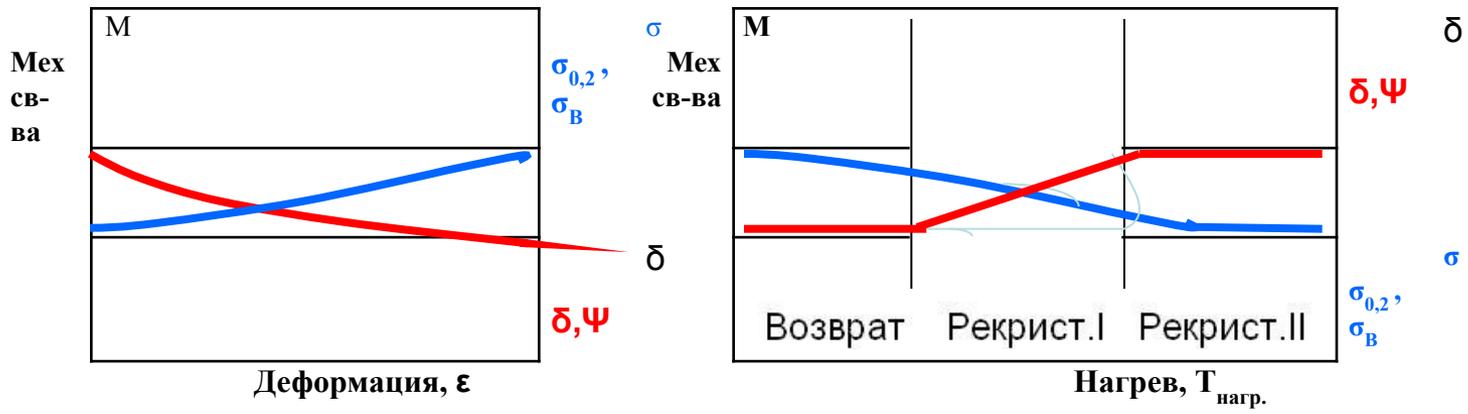
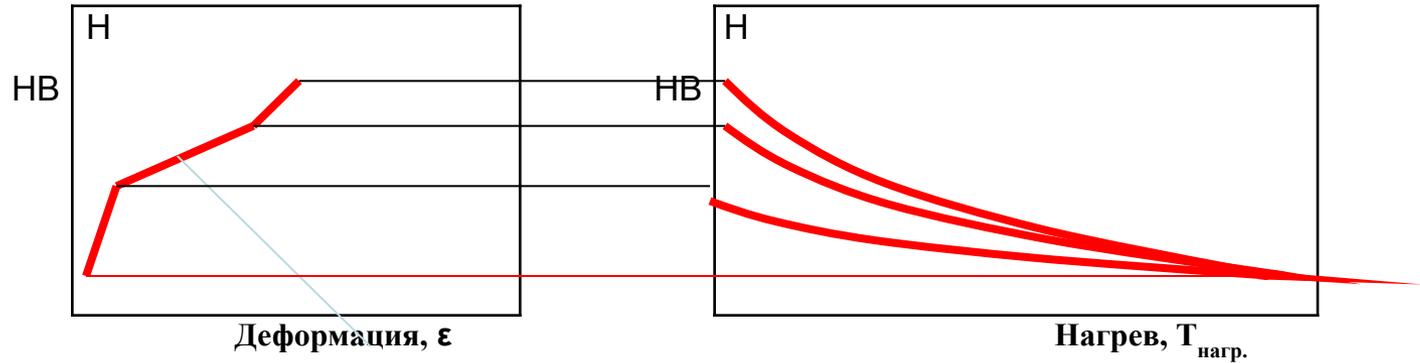
Текстура структурная – предпочтительная ориентация границ раздела зерен и фаз под действием деформации

Анизотропия свойств – особое состояние полуфабриката, в котором в различных направлениях возникают различные физические свойства

4.1.3. Влияние нагрева на строение и свойства сплавов после холодной деформации



- Рассмотрим изменение свойств до и после наклепа. Пластическая деформация переводит металл в структурно-неустойчивое состояние. Поэтому, естественно, должны возникать процессы, возвращающие этот металл в относительно устойчивое состояние. Чем выше температуры, тем более активно развивается этот процесс.



4.1.3. Отдых ($T < 0,2 T_{пл.}$)

- К самопроизвольным процессам, которые приводят пластически деформированный металл к более устойчивому состоянию, относятся снятие искажения кристаллической решетки, уменьшение плотности дислокаций за счет аннигиляции, уменьшение общего количества дефектов кристаллической решетки и перераспределению их в зернах с образованием более равновесных конфигураций, уменьшение внутренних напряжений.
- **Отдыхом – называется совокупность процессов, направленных на уменьшение внутренних напряжений за счет формирования и уменьшения плотности дефектов в деформированных кристаллах**
- Отдых – самая низкотемпературная из стадий термического возврата. Это термически активируемый процесс.
- Изменение прочностных свойств деформированного металла во времени при нагреве можно оценить по формуле:

$$d\sigma / dt = A \exp (- Q / RT) / t$$

- где, Q – энергия активации процесса отдыха, связанная с энергией активации самодиффузии по формуле:

$$Q_{отдыха} = 0,5 \cdot Q_{самодифф}$$

4.1.3. Полигонизация ($T \approx 0,2 \dots 0,3 T_{пл.}$)

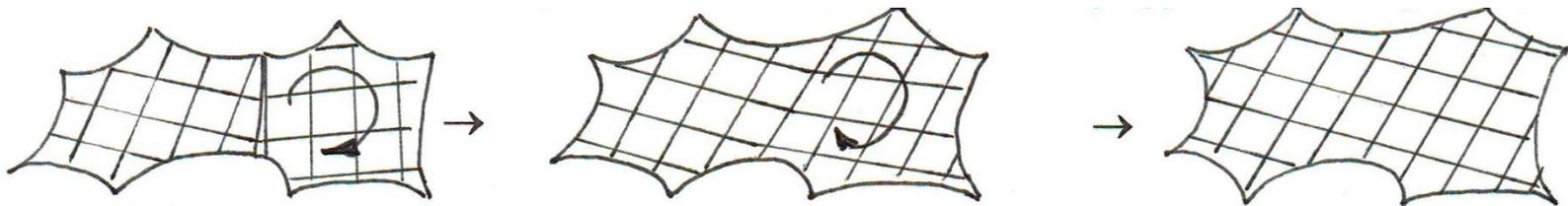
В 1949 году Р.Кан, исследуя свойства деформированного изгибом монокристалла цинка, обнаружил, что дислокации из исходного состояния (хаотическое распределение) перестроились в стенки, разориентирующие монокристалл на небольшие углы.

Полигонизация заключается в том, что беспорядочно расположенные внутри зерна дислокации, начинают собираться, образовывать дислокационные стенки и создавать ячеистую структуру, которая является значительно менее энергоемкой конфигурацией, более устойчивой и может затруднять процессы, развивающиеся при более высокой температуре (рекристаллизации).

Полигонизацией – называется образование субзерен разделенных малоугловыми границами (МУГ), путем перераспределения дислокаций

Возвратом – называют самопроизвольные процессы происходящие как при отдыхе, так и при полигонизации.

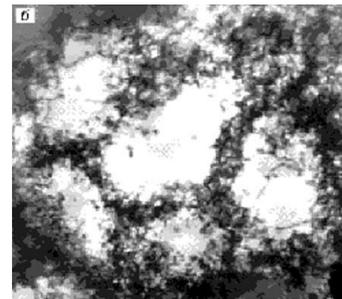
Коалесценцией (рекристаллизацией на месте, in situ) – называется разновидность полигонизации при сливании субзерен и их укрупнении до размеров зерен.



Субзерна, образовавшиеся при полигонизации, с увеличением времени и с повышением температуры отжига, стремятся укрупниться. Коалесценция субзерен сопровождается разворотом решетки одного или обоих субзерен, чтобы образовалась единая ориентация.

Процессом контролирующим коалесценцию, является объемная диффузия.

Различают коалесценцию парную и групповую.



4.1.3. Полигонизация ($T \approx 0,2 \dots 0,3 T_{пл.}$)

ПОЛИГОНИЗАЦИЯ

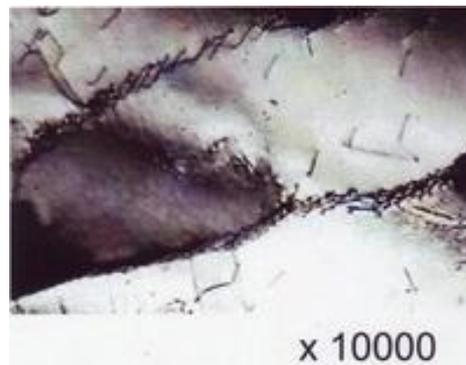
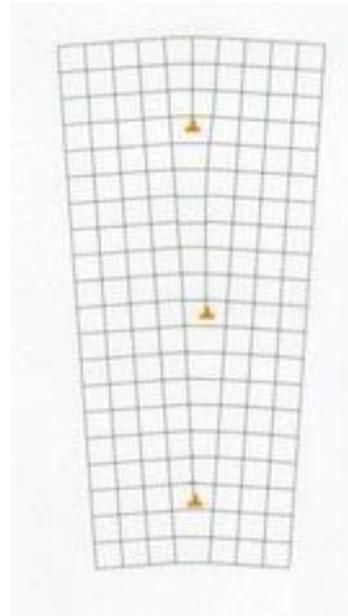
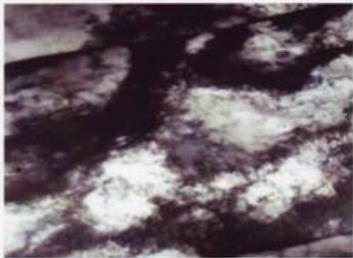
Схема полигонизации



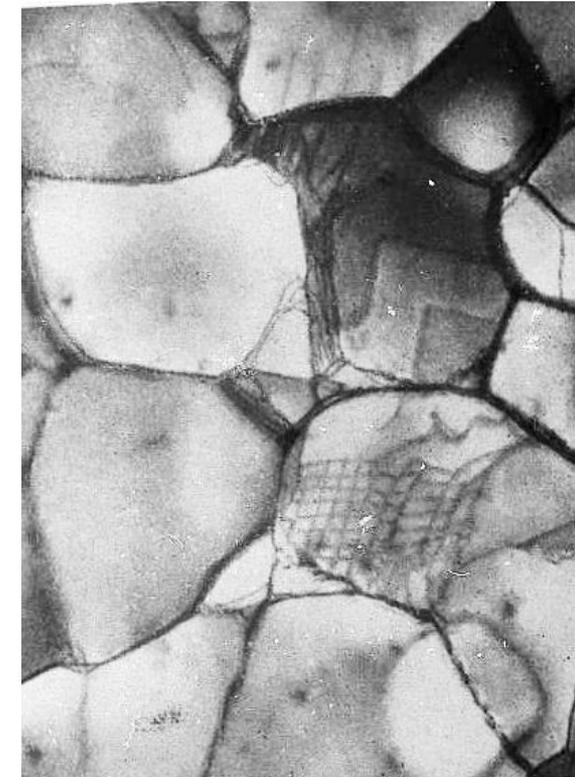
Изменение структуры при нагреве

Структура после
холодной деформации

Структура после
полигонизации



$$\sigma_5 = K_c \cdot d^{-m}$$



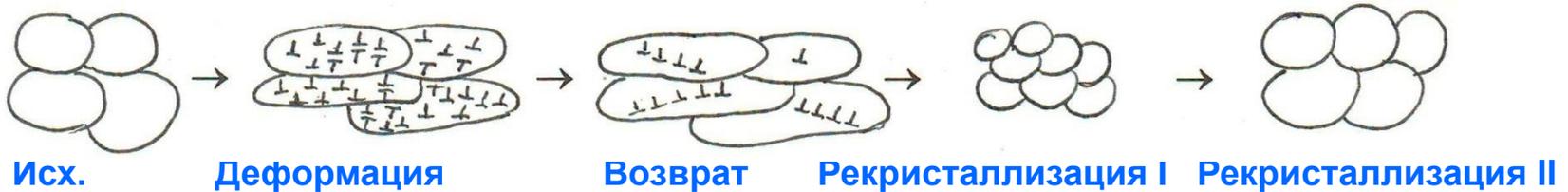
4.1.3. Рекристаллизация ($T \approx 0,3 \dots 0,4 T_{пл.}$)

Основным стимулом для протекания процесса рекристаллизации является снижение дислокационной плотности и уменьшение внутренней энергии системы за счет образования новых зерен. Сопоставление температур рекристаллизации различных металлов показывает, что между $T_{рекр.}$ и $T_{пл.}$ существует простая связь:

$$T_{рекр.} = a \cdot T_{пл.}$$

где a – коэффициент зависящий от чистоты металлов. Чем выше чистота металлов, тем ниже температура рекристаллизации. У металлов с обычной чистотой $a = 0,3 \dots 0,4$.

Рекристаллизацией первичной – называется процесс образования и роста новых зерен с более совершенной структурой, окруженных высокоугловыми границами, за счет исходных деформированных зерен той же фазы.



Рекристаллизацией вторичной (собирающей) – называется процесс интенсивного роста новых зерен при повышенной температуре.

Известно, что рост кристаллов – процесс самопроизвольный, определяемый стремлением системы к уменьшению внутренней энергии за счет сокращения суммарной поверхности границ раздела зерен.

Возможны три механизма роста зерен:

Зародышевый – состоящий в том, что после первичной рекристаллизации вновь возникают зародышевые центры, но в меньшем количестве. Поэтому, конечные зерна вырастают до более крупных размеров.

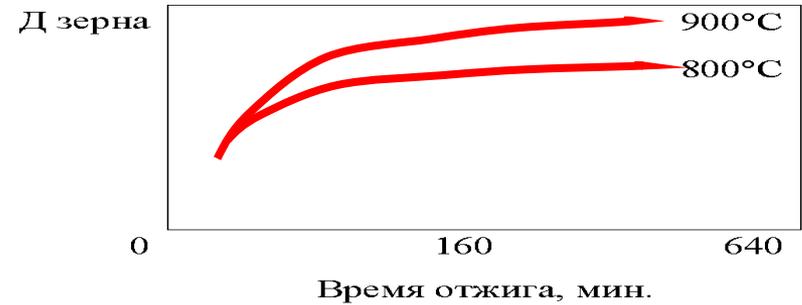
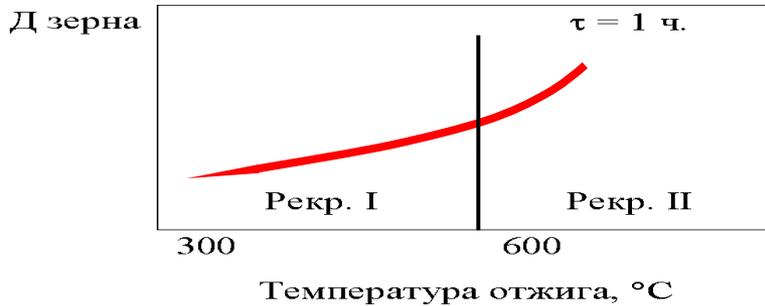
Миграционный – состоящий в перемещении Г.З. и увеличении размера зерна.

Слияние зерен – состоящее в постепенном "растворении" границ зерен и объединении мелких зерен в одно крупное.

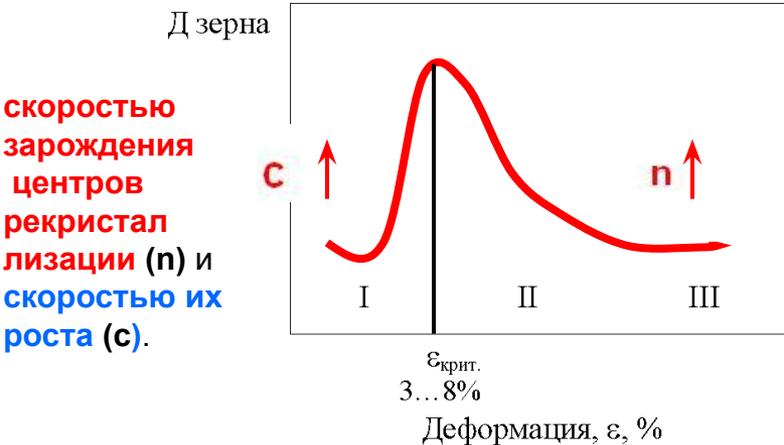
Следует напомнить, что процесс рекристаллизации (по аналогии с кристаллизацией) можно охарактеризовать двумя параметрами: **скоростью зарождения центров рекристаллизации (n)** и **скоростью их роста (c)**. В зависимости от их количественного соотношения, зерна вырастают до разных размеров. При $n > c$ – формируется мелкозернистая структура. При $n < c$ – крупнозернистая.

4.1.3. Диаграмма рекристаллизации

- Рассмотрим основные зависимости роста зерен от степени наклепа, температуры и времени нагрева. На примере алюминия.



В зависимости от степени предварительной деформации, размер зерна изменяется сложным образом



I – область: при $\epsilon < \epsilon_{\text{крит.}}$ и последующего отжига, уже в процессе отжига в отдельных зернах протекает полигонизация, а следовательно, возрастает неоднородность наклепа разных зерен.

При $\epsilon = \epsilon_{\text{крит.}}$ – неоднородность наклепа настолько велика, что из-за разности в накопленной объемной энергии, наблюдается миграция границ зерен. В результате чего, отдельные зерна растут за счет соседних.

II – область: при $\epsilon \gg \epsilon_{\text{крит.}}$ – при больших степенях деформации общая дислокационная плотность настолько велика, что при отжиге резко увеличивается скорость зарождения центров рекристаллизации (n)

III – область: при $\epsilon > \epsilon_{\text{крит.}}$ – в этой области конкурируют два процесса:

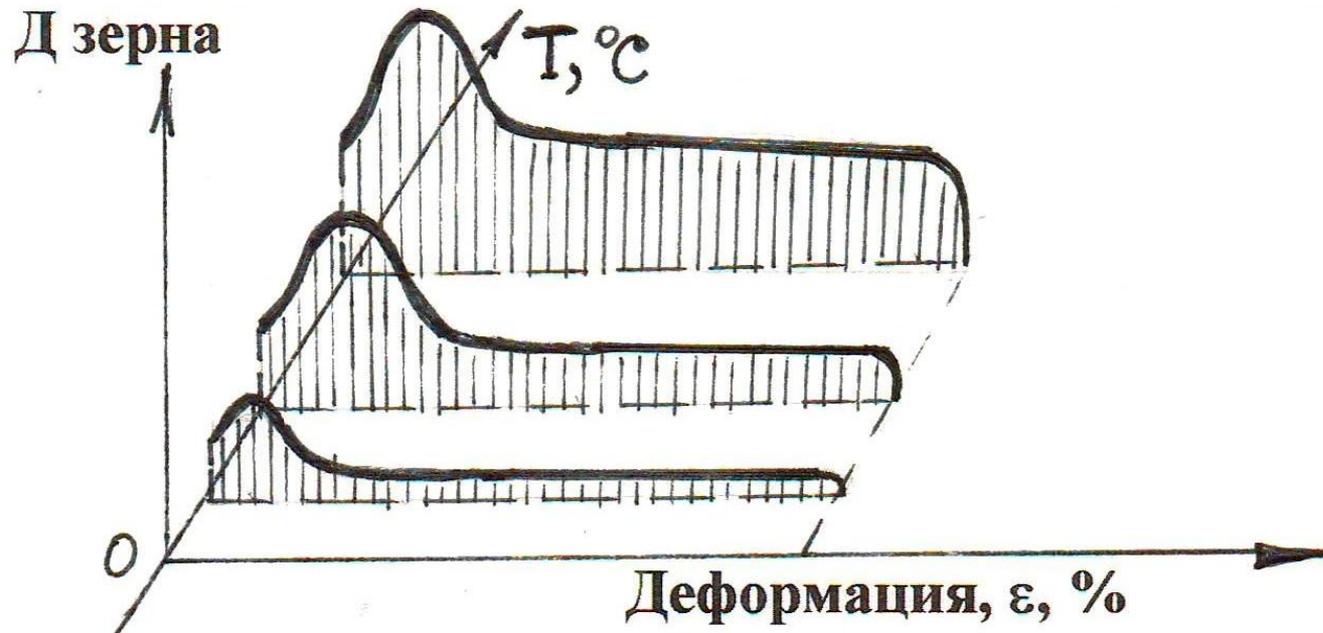
- укрупнение зерен вследствие миграции исходных границ зерен
- появление новых границ зерен из центров первичной рекристаллизации

Критическая степень деформации ($\epsilon_{\text{крит.}}$) – это степень деформации приводящая после нагрева к гигантскому росту зерна.

$\epsilon_{\text{крит.}}$ – невелика и находится в пределах 3...8 %

4.1.3. Диаграмма рекристаллизации

Зависимость размера рекристаллизованного зерна одновременно от степени и температуры деформации называется **полной диаграммой рекристаллизации**.



При отжиге наклепанного металла свойства изменяются обратно тому, как они изменялись при холодной деформации. Показатели сопротивления деформации уменьшаются, а пластичность увеличивается. В зависимости от температуры отжига а предварительно деформированном материале может развиваться только – возврат. Такой отжиг называется текстурирующим. рекристаллизация. Такой отжиг называется неполным рекристаллизационным. собирательная рекристаллизация. Такой отжиг называется полным рекристаллизационным

4.2. Концентрационная релаксация напряженно-деформированного состояния металла деталей машин.

4.2.4. Формирование неравновесных твердых растворов в результате деформации, закалки, фазового превращения

В процессе термомеханического воздействия (ТМВ) и теплосмен, по сечению механически обрабатываемых заготовок (особенно больших толщин) возникает повышенная склонность металла к деформационной и температурной неоднородности, что обуславливает появление в объеме заготовок механических и термических внутренних напряжений на макро-, микро- и субмикроскопическом уровнях, которые наряду с высокой дефектностью кристаллической решетки, повышают предел растворимости фаз и вызывают пересыщение легирующими и примесными атомами. Для своей самоорганизации, перехода к относительному равновесию, система реализует два релаксационных механизма: структурный и концентрационный.

Неравновесным твердым раствором – называется твердый раствор, находящийся в упруго-напряженном состоянии, в котором атомы металла основы смещены относительно своих равновесных узлов в кристаллической решетке.

Неравновесные твердые растворы могут быть получены в результате:

- пересыщения легирующими элементами при быстром охлаждении (**закалке**);
- смещения атомов основы из своих равновесных узлов в кристаллической решетке при деформации или **облучении**;
- пересыщения точечными дефектами (вакансиями) при полиморфного фазового превращении (**смене кристаллической решетки**);

4.2.5. Примеры концентрационной релаксации (перераспределения легирующих элементов) при растяжении

Как показали результаты анализа химического состава испытанных на растяжение образцов из стали 20 и сплава титана Ti – 5,4Al, как в зоне излома, так и в исходном металле, полученные с помощью метода Оже-спектроскопии, (рис.), деформирование металла вызывает перераспределение в нем легирующих элементов.

Сплав	Легирующий элемент (л.э.)	Концентрация л.э., % в зоне излома на расстоянии 0...0,1 мкм от края образца		Концентрация л.э., % в металле образца на расстоянии 0,5...0,6 мкм от излома	
		Температура испытания		Температура испытания	
		20°C	250°C	20°C	250°C
Сталь 20	Mn	1,0	1,0	1,0	0,9
	Sn	1,0	1,1	0,8	0,7
	S	0,2	0,3	0,2	0,2
	P	0,5	0,2	0,5	0,2
	Si	1,3	1,3	0,4	0,4
	Cr	0,9	0,5	0,4	0,3
	C	1,4	1,5	0,4	0,2
Сплав Ti – 5,4 Al	N	0,003	–	0,05	–
	H	0,03	–	0,03	–
	O	0,1	–	0,3	–
	Fe	0,2	–	0,3	–
	V	0,4	–	0,4	–
	C	0,9	–	0,1	–
	Cr	1,6	–	0,1	–
	Al	22,3	–	2,3	–
	Ti	75,4	–	96,2	–

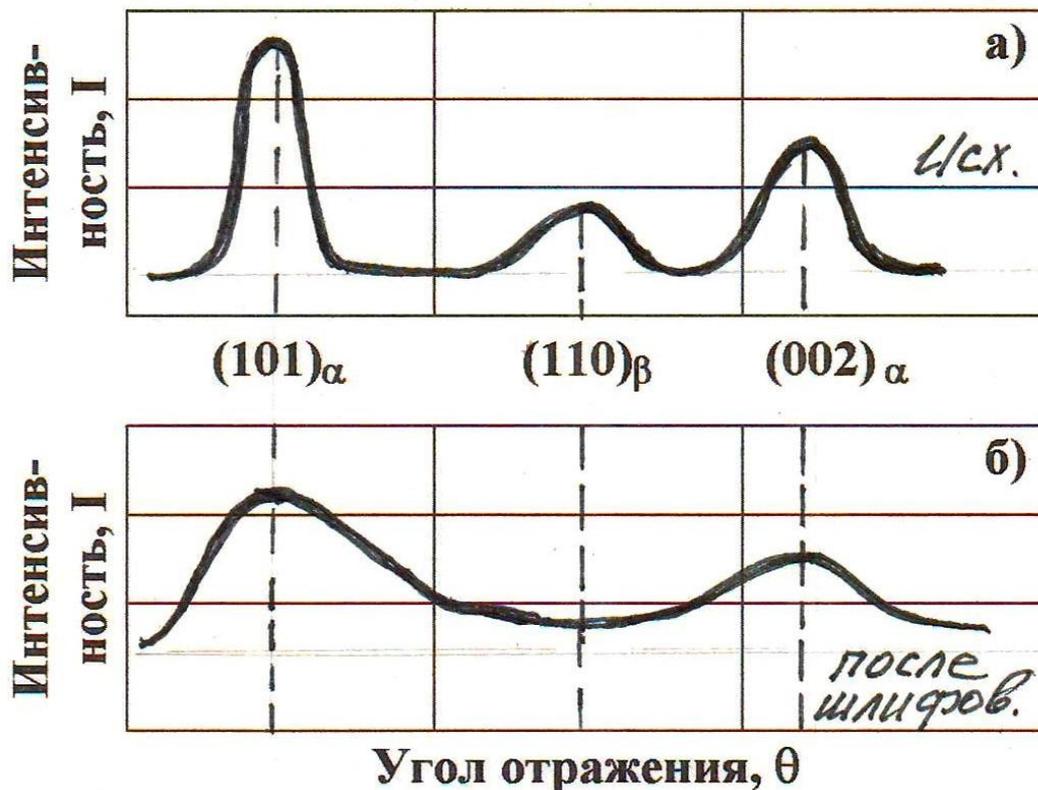
4.2.5. Примеры концентрационной релаксации

(перераспределения легирующих элементов) при шлифовании

Перераспределение легирующих атомов в металле, было обнаружено и при технологической обработке, например, при шлифовке авиационных лопаток из двухфазного ($\alpha+\beta$) титанового сплава ВТ9. На рис. представлена дифрактограмма рентгеновского излучения, полученная с поверхности детали до (рис. а) и после (рис. б) **шлифовки**.

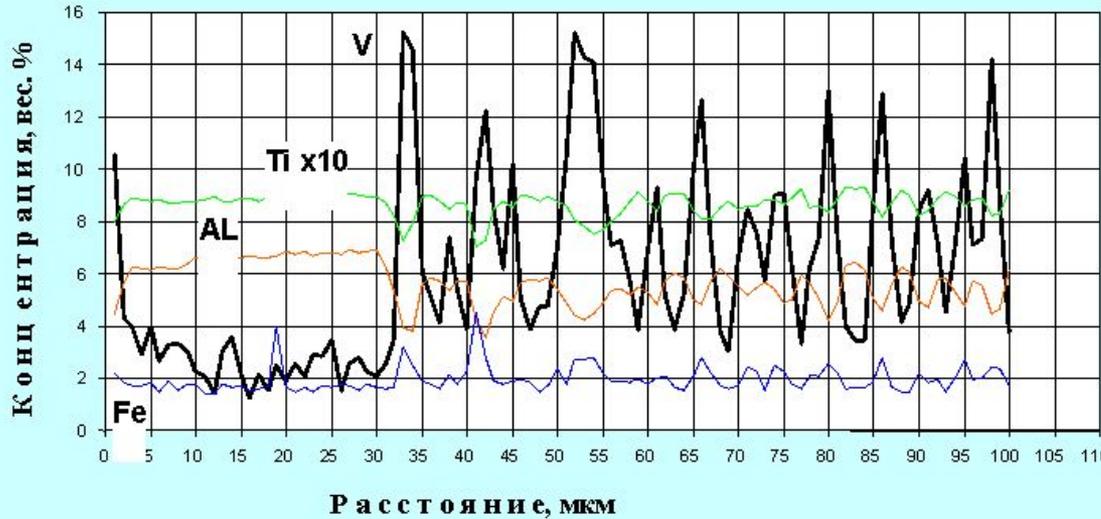
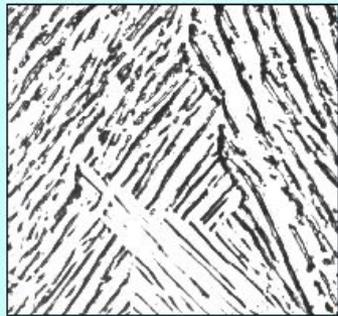
Видно, что поверхностное деформирование металла привело к **растворению в нем второй β – фазовой составляющей**, приведя в пересыщению по β – стабилизирующим элементам α – твердый раствор.

Исчезновение на поверхности детали «мягкой» β – фазы привело к так называемому ее «альфированию» и к снижению в 100 раз числа циклов до разрушения авиационных лопаток.



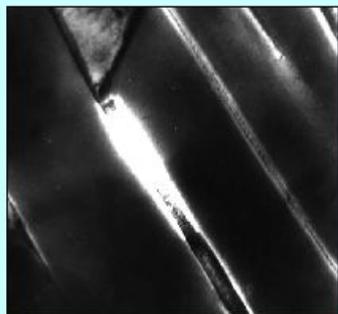
4.2.6. Закономерности изменения физико-механических свойств и структурно-химических параметров деформированных двухфазных ($\alpha+\beta$) металлических материалов при их нагреве

Морфология структурных и фазовых составляющих сплавов ОТ4 и ВТ6



Структура пластинчатого типа сплава ВТ6
x 1000

Структура глобулярно-пластинчатого типа сплава ВТ6
x 1000



Микроструктура и распределение легирующих элементов в структурных составляющих материала лопаток из сплава ВТ6 x 3000.

Структура пластинчатого типа сплава ОТ4
x 10000

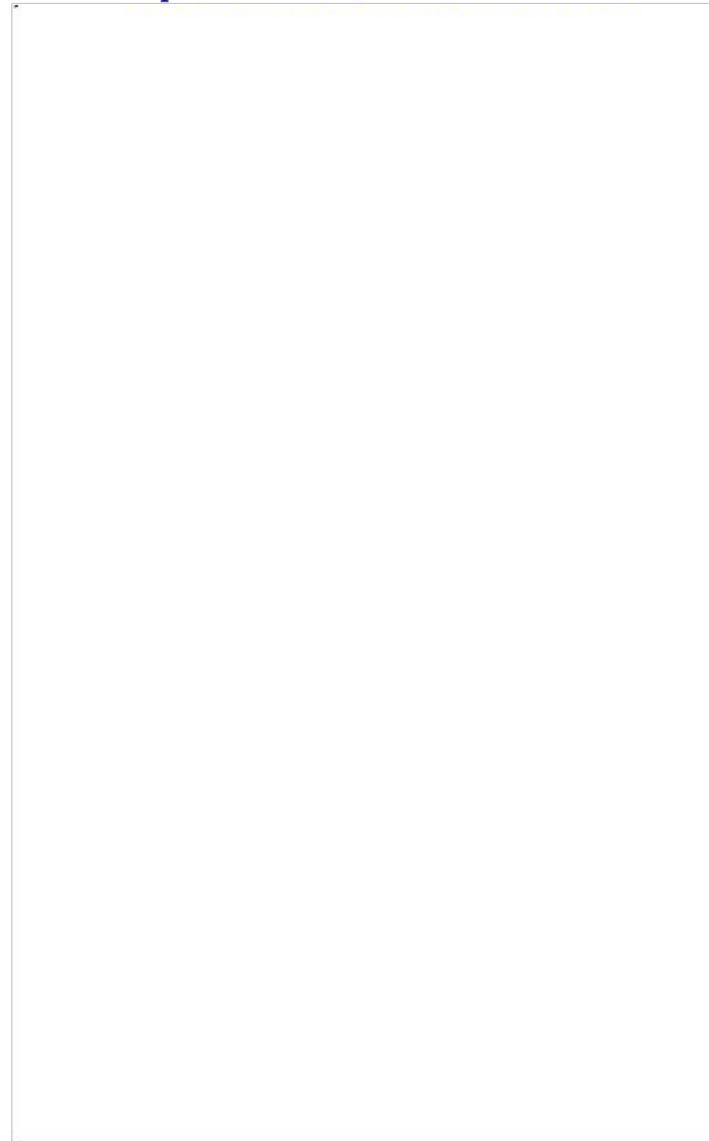
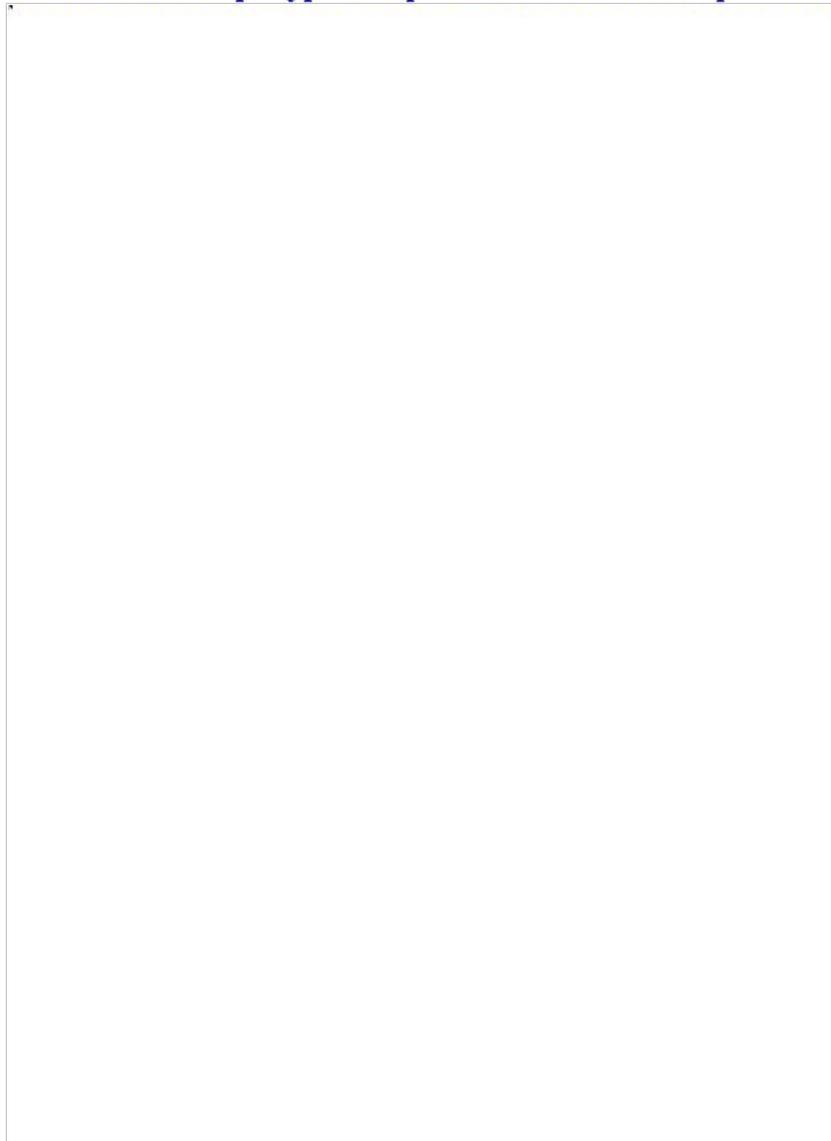
Структура глобулярно-пластинчатого типа сплава ВТ6
x 24000

	Размер частиц фаз, [μm]	Концентрация легирующих элементов, [вес. %]		Микротвердость частиц фаз, [МПа]
		AL	V	
α_I	15	7,30	1,35	3550
α_{II}	2,2	6,01	3,60	3830
β_{II}	0,8	4,14	9,64	2584
$\alpha_{II} + \beta_{II}$	22			2999

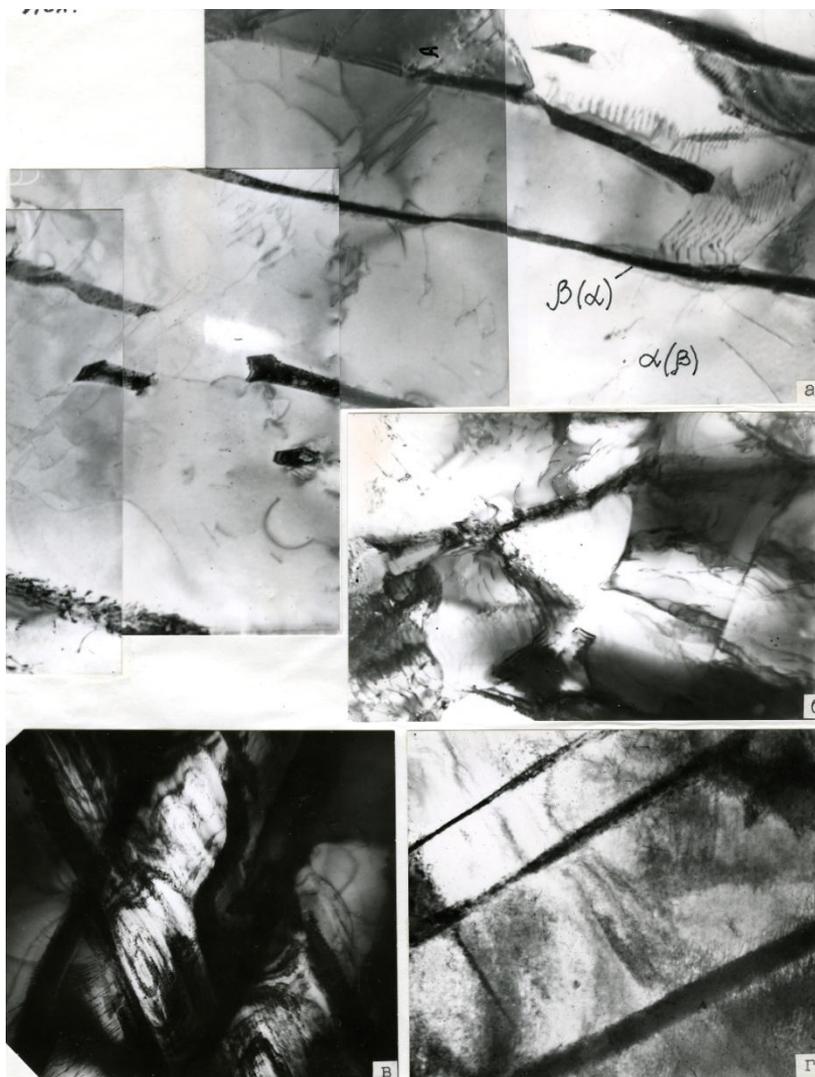
4.2.6. Закономерности изменения физико-механических свойств и структурно-химических параметров деформированных двухфазных ($\alpha+\beta$) металлических материалов при их нагреве

Кинетическая диаграмма структурных и фазовых превращений в зависимости от температуры нагрева абсолютной и приведённой.

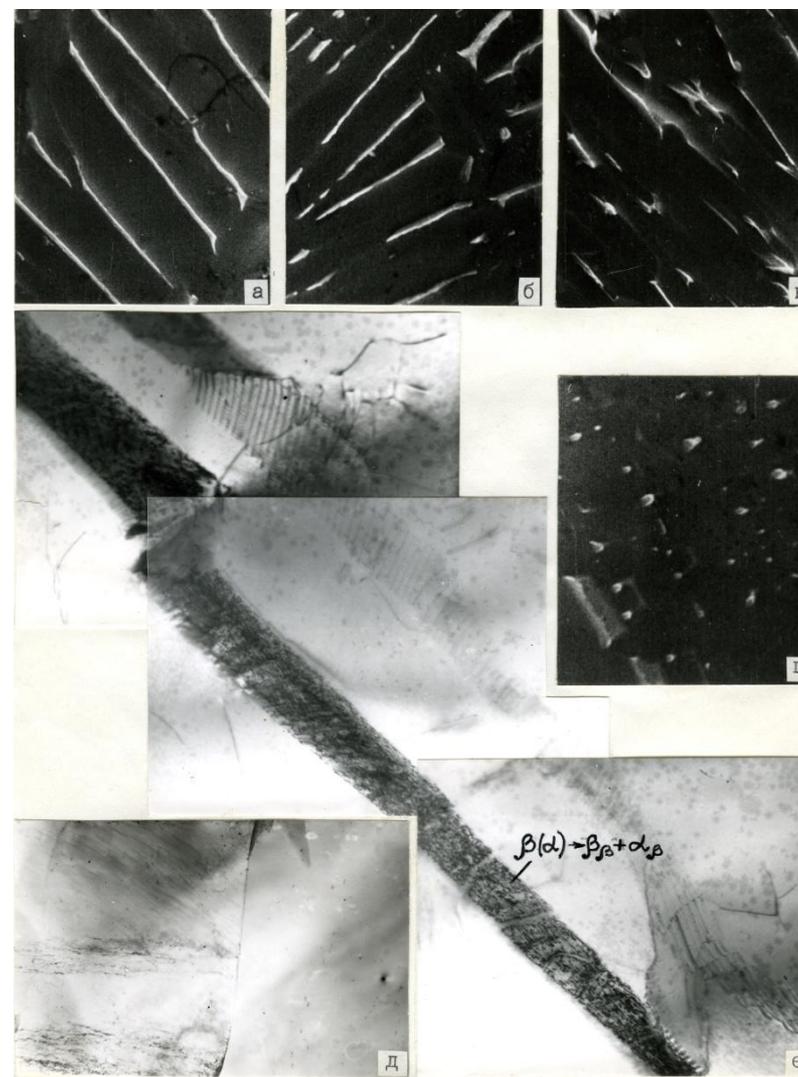
дилатометрические (а) и микрокалориметрические (б) кривые исследованных сплавов



**4.2.6. СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ ТИТАНА
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ от ТЕМПЕРАТУРЫ
T10 (10% высокотемпературной β -фазы) (распад β -фазы)**

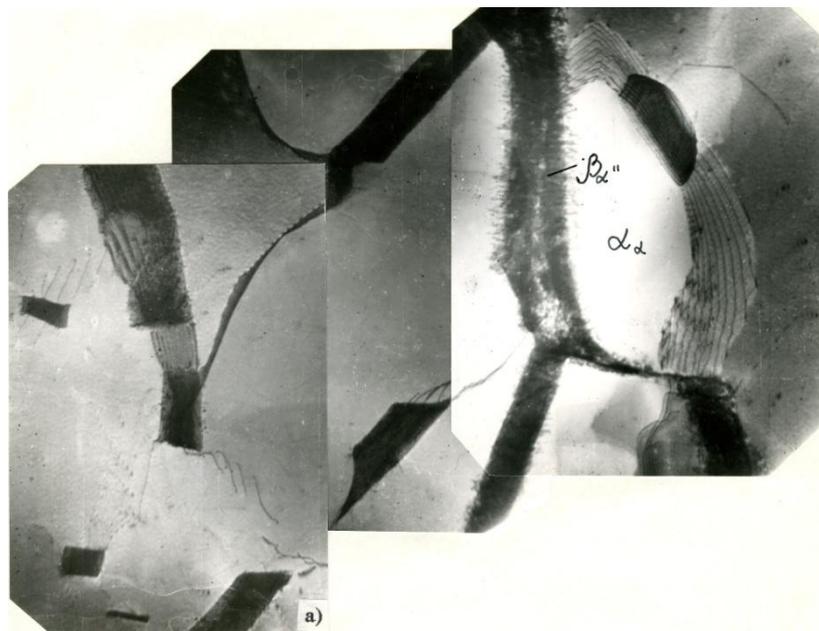


Исходное состояние x 24000

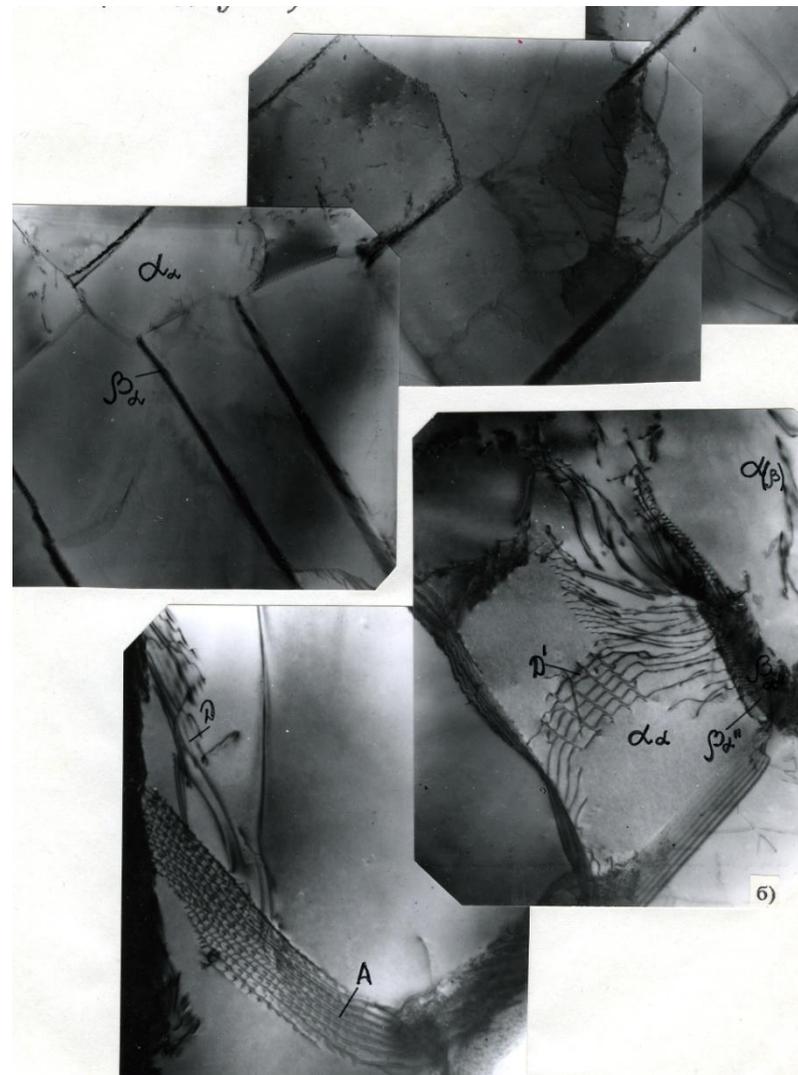


Полигонизация β - фазы x 24000

**4.2.6. СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ ТИТАНА
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ от ТЕМПЕРАТУР T15 и T20
(15% и 20% высокотемпературной β -фазы)**

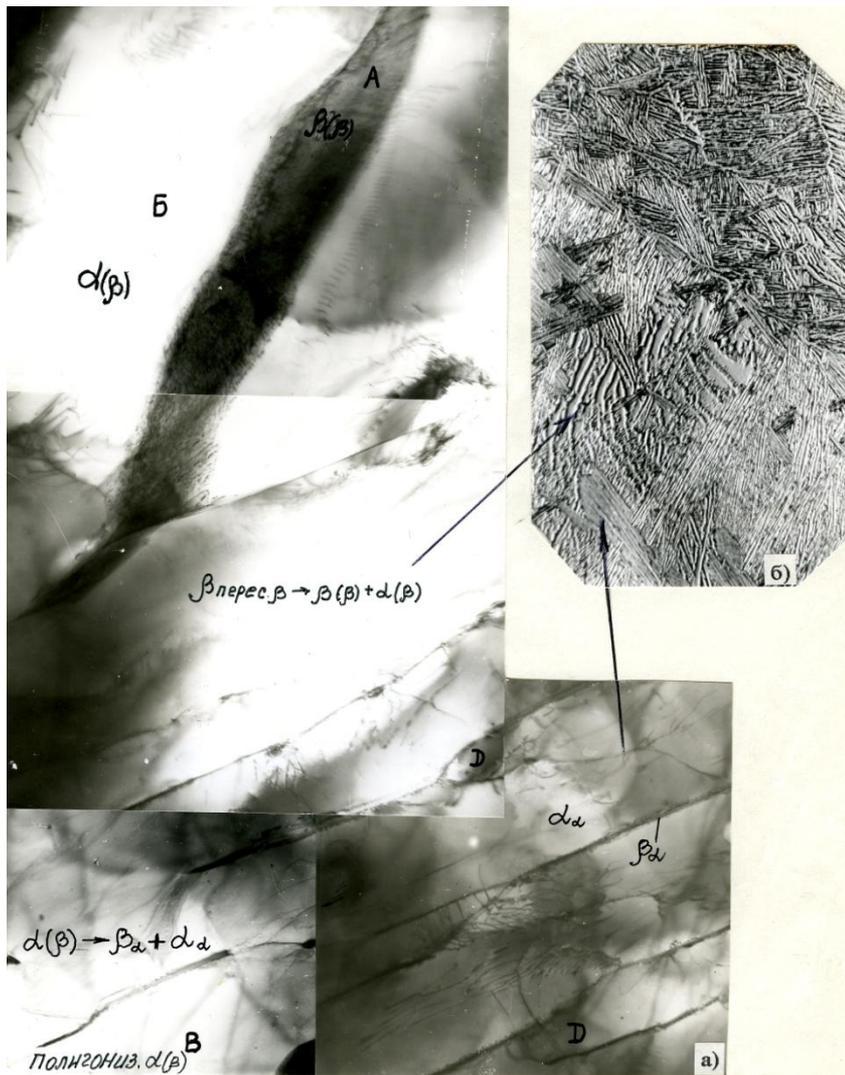


Перераспределение л.э. x 24000



Рекристаллизация β - фазы x 24000

4.2.6. СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ ТИТАНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ от ТЕМПЕРАТУР T30 и T50 (30% и 50% высокотемпературной β -фазы)

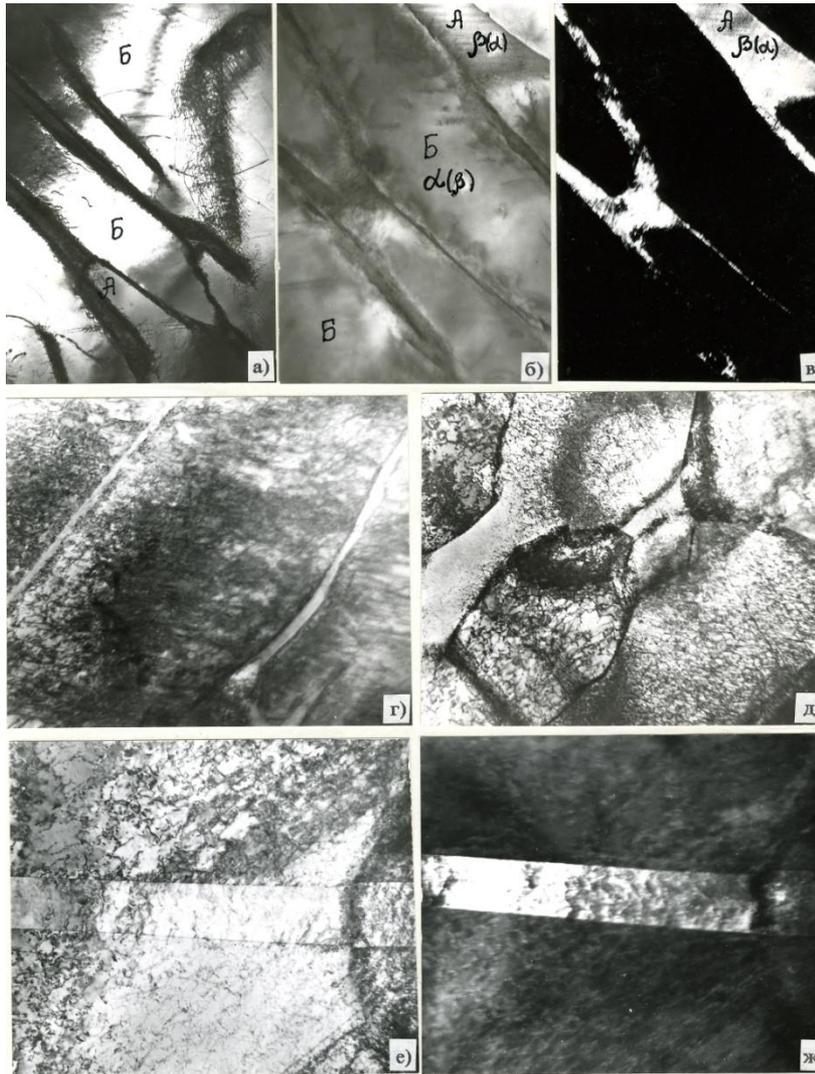


Полигонизация α - фазы x 24000

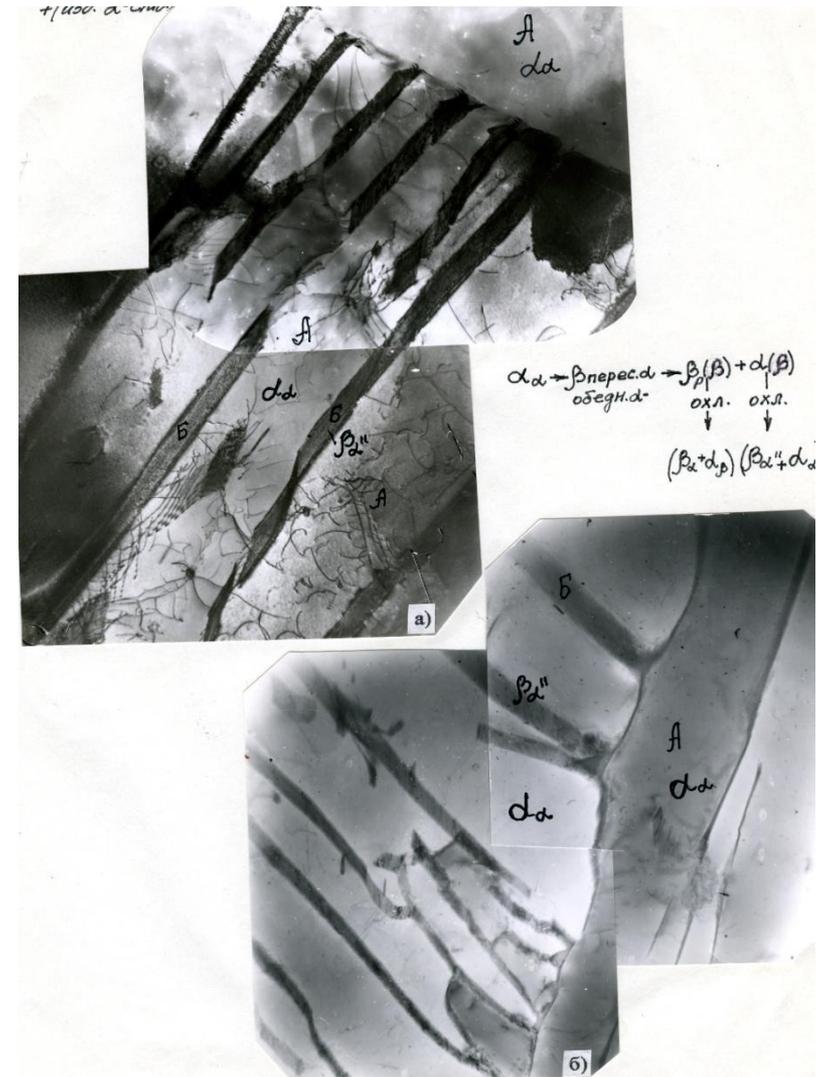


Перераспределение л.э. x 24000

**4.2.6. СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ ТИТАНА
 ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ от Т₇₅ и Т_{III}
 (75% и 100% высокотемпературной β-фазы)**

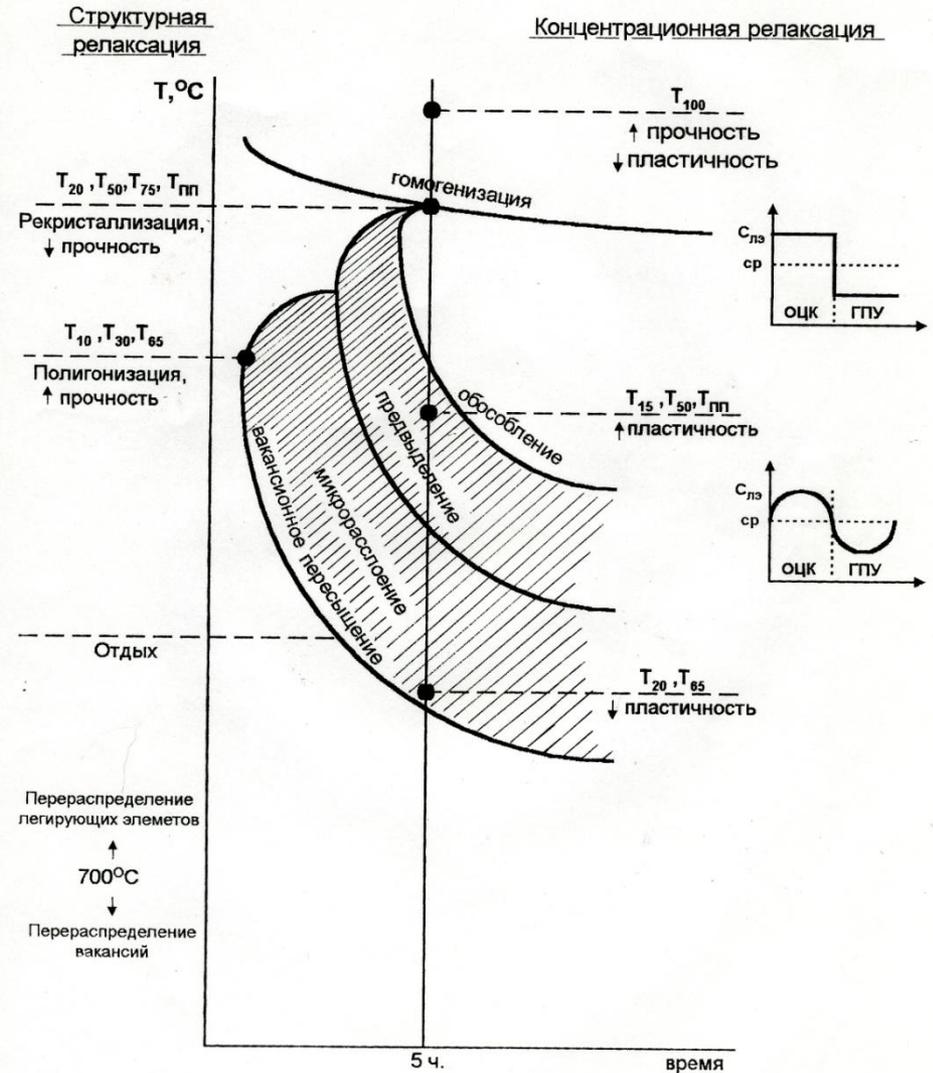
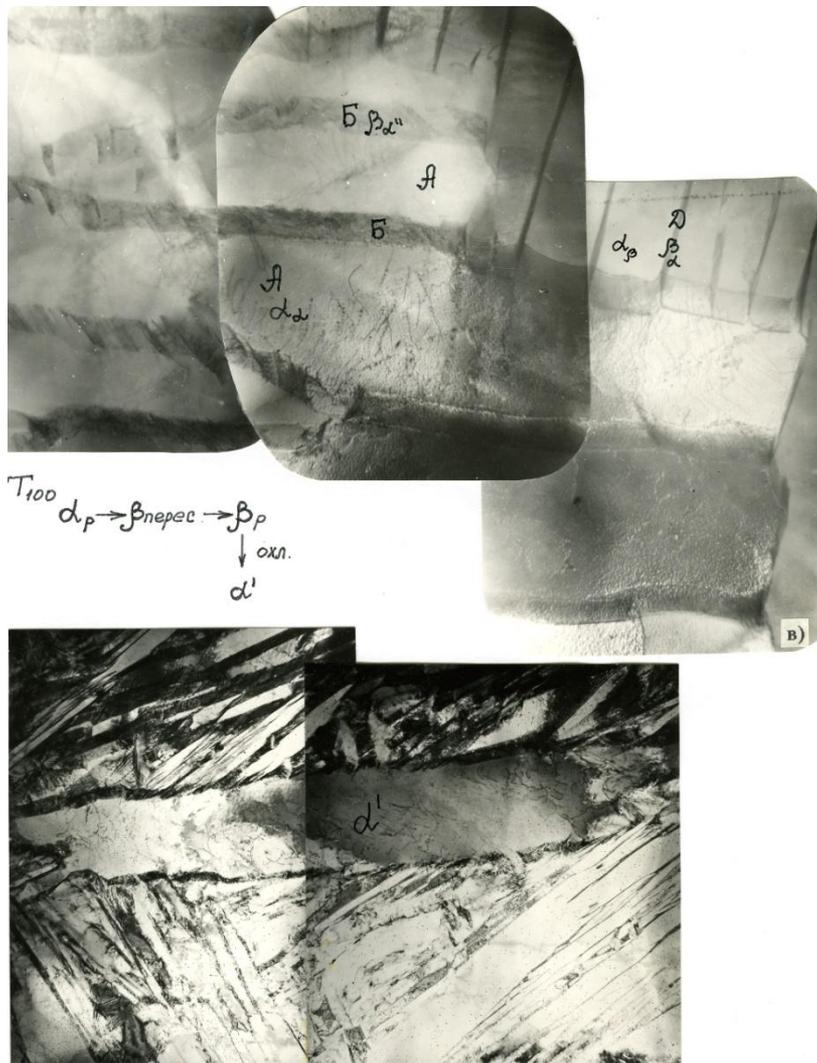


Рекристаллизация α- фазы x 24000



Перераспределение л.э. x 24000

4.2.6. СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ ТИТАНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ от ТЕМПЕРАТУРЫ T_{100} (100% гомогенной β -фазы)



Перераспределение л.э.
(гомогенизация β -фазы) x 24000

Стадии структурной и
концентрационной релаксации

4.3. Релаксация напряженно-деформированного состояния металла за счёт формирования зародышевой трещины.

4.3.7. Критическая степень пластической деформации. Критический размер зародышевой трещины.

$\sigma \rightarrow$ Хаотиче \rightarrow Дислокац \rightarrow Ячеиста \rightarrow Полосов \rightarrow Фрагмен \rightarrow Микро
ские ионные я ая тированн разруш
дислока скопленн структу структу ая ение
ции я ра ра структур

При достижении **критической величины пластической деформации** и формировании зародышевой микротрещины, в материале открываются его новые «способности» - оказывать сопротивление распространению трещины. Учёные назвали такую способность материала – **трещиностойкостью**.

Расход (диссипация, затраты) энергии на образование свободных поверхностей оценивается по формуле:

$$\Delta W_S = \gamma_S \cdot F = \gamma_S \cdot 2 \cdot l$$

где, W_S – энергия трещины (затраты на разрушение), Дж

γ_S – удельная поверхностная энергия, Дж / м²

F – площадь свободной поверхности, м²

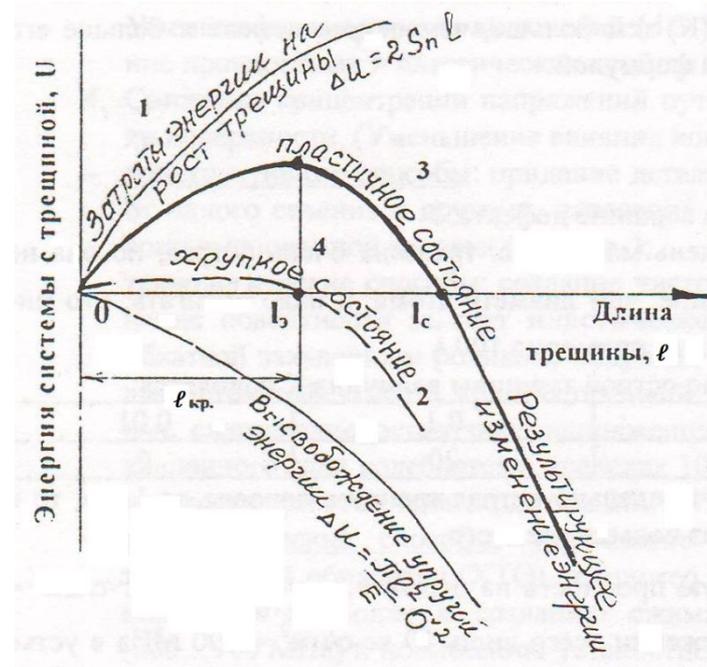
l – длина трещины;

σ – минимальное действующее напряжение приводящее к росту трещины.

Критической длиной трещины ($l_{кр}$) – называется минимальная её длина, начиная с которой происходит самопроизвольное её распространение, сопровождающееся высвобождением энергии в системе и снятием внутренних напряжений.

$$l_{кр} = \frac{2 \cdot \gamma_S \cdot E}{\pi \cdot \sigma^2}$$

Трещиностойкостью – называется способность материала сопротивляться распространению трещины при статическом или циклическом нагружении.



Изменение энергии системы с растущей трещиной

4.4. Влияние скорости пластической деформации на релаксацию напряженно-деформированного состояния металла.

4.4.8. Скорость деформации конструкционного материала от способа его обработки

В процессе пластической деформации, во время эволюции субструктуры материала, происходит **перераспределение внутренних напряжений**. Важно напомнить, что каждому типу субструктуры соответствует определенная плотность дислокаций, и для ее формирования требуется определенное время, тем большее, чем ниже температура нагрева. Отсюда становится понятным, **почему увеличение скорости деформирования и снижение температуры задерживает эволюцию структурообразования**. При этом тормозятся релаксационные процессы, и возрастает сопротивление деформированию. Для сохранения целостности материала изделия, на смену сдвиговым, ламинарным механизмам приходят высокоскоростные механизмы фазовых превращений. Для сравнения, в таблице 6 приведены скорости пластической деформации, которые реализуются в материалах при различных видах их технологической обработки, испытаниях, и при работе конструкций.

Способ деформирования	Скорость деформации, с ⁻¹
Шлифование	$10^{+5} \dots 10^{+6}$
Взрыв, ударная волна	$10^{+4} \dots 10^{+6}$
Резание	$10^{+1} \dots 10^{+4}$
Испытание на ударную вязкость	$10^{+2} \dots 10^{+3}$
Прокатка, ковка, волочение	$10^0 \dots 10^{+3}$
Горячая прокатка	$10^0 \dots 10^{+2}$
Экструзия	$10^{-2} \dots 10^{+1}$
Испытания на растяжение по ГОСТ	$10^{-4} \dots 10^{-3}$
Ползучесть в конструкциях	$10^{-10} \dots 10^{-6}$
"Холодная" релаксация напряжений в конструкциях	$10^{-12} \dots 10^{-9}$

4.4.8. Скорость деформации конструкционного материала от способа его обработки

Релаксационные процессы вносят большой вклад в формирование структуры и, соответственно свойств, при пластической деформации. Этот вклад состоит в том, что одновременно с процессами **упрочнения** и формирования субструктуры деформированного состояния происходят процессы **разупрочнения** (превращения субструктур). Разупрочняющие процессы происходят тем интенсивнее, чем больше время, температура, степень, и меньше скорость деформирования материала.

Введем понятия: $(d\varepsilon / dt)_{\text{деформ.}}$ – **скорость деформирования материала**, $(d\varepsilon / dt)_{\text{релакс.}}$ – **скорость релаксации** (например, рекристаллизации) материала. В таком случае можно дать определения горячей и холодной пласт. деформации.

Горячей деформацией – называется деформация, проходящая при скоростях сопоставимых со скоростями релаксации,

$$(d\varepsilon / dt)_{\text{деформ.}} \approx (d\varepsilon / dt)_{\text{релакс}}$$

Теплой деформацией – называется деформация, проходящая при скоростях больших по сравнению со скоростями релаксации,

$$(d\varepsilon / dt)_{\text{деформ.}} > (d\varepsilon / dt)_{\text{релакс.}}$$

Холодной деформацией – называется деформация, проходящая при скоростях много больших по сравнению со скоростями релаксации,

$$(d\varepsilon / dt)_{\text{деформ.}} \gg (d\varepsilon / dt)_{\text{релакс.}}$$

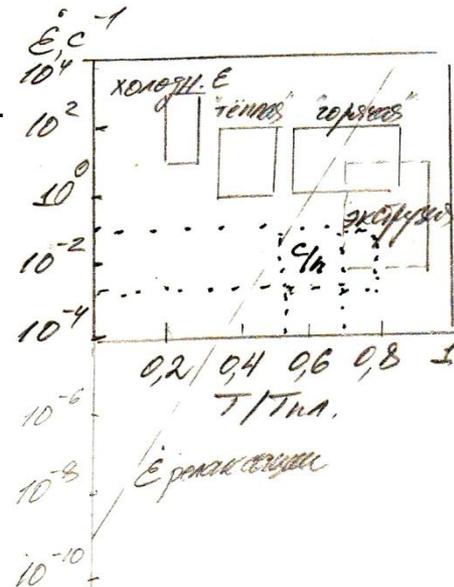
Физическая сущность **быстрого** процесса деформирования состоит в том, что за сверхкороткое время, внешнее приложенное напряжение может вызвать пластическую деформацию только по скоростному механизму фазовых (мартенситных) превращений. В материале не успевают срабатывать релаксационные процессы, затрудняется теплообмен между деформируемой зоной и окружающей средой. Поэтому происходит переход от изотермической деформации к адиабатической, подключаются ротационные механизмы пластической деформации. Возникшая локализация пластической деформации сохраняется вплоть до разрушения.

Оценку динамического предела текучести $\sigma_{\text{(динамич.)}}$ в зависимости от скорости деформирования $\dot{\varepsilon}^*$ можно произвести по формуле:

$$\sigma_{\text{T(динамич.)}} = \sigma_{\text{T(статич.)}} + K \cdot \lg(\dot{\varepsilon}^* (\text{динамич.}) / \dot{\varepsilon}^* (\text{статич.}))$$

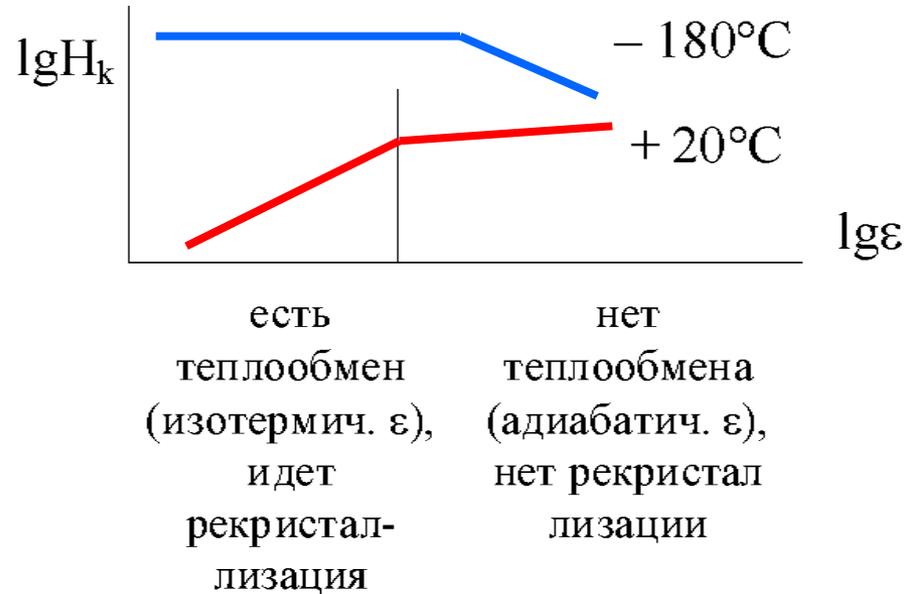
где, $\sigma_{\text{T(статич.)}}$ – величина предела текучести материала, полученная при обычном стандартном испытании на растяжение со скоростью $(d\varepsilon/dt)_{\text{(статич.)}} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;

С увеличением скорости деформирования, происходит увеличение прочности, снижение пластичности и вязкости разрушения материала.



4.4.8. Скорость деформации конструкционного материала от способа его обработки

Как показали опыты Витмана проведенные вдавливанием алмазного конуса в образцы из стали, меди, алюминия, с увеличением скорости нагружения твердость металлов возрастала. Например, для образцов из **свинца** была построена зависимость:



есть	нет
теплообмен	теплообмена
(изотермич. ε),	(адиабатич. ε),
идет	нет рекристал-
рекристал-	лизации
лизация	

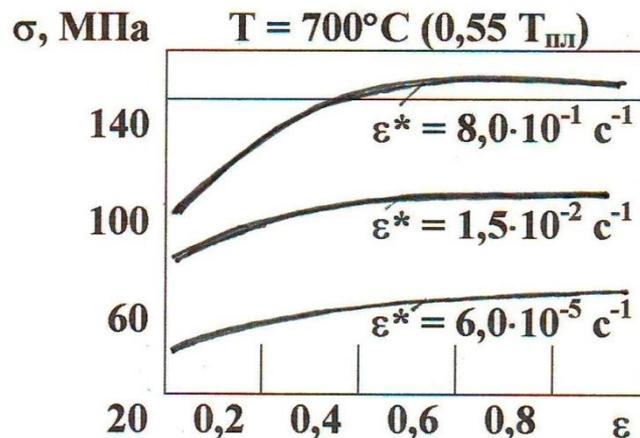
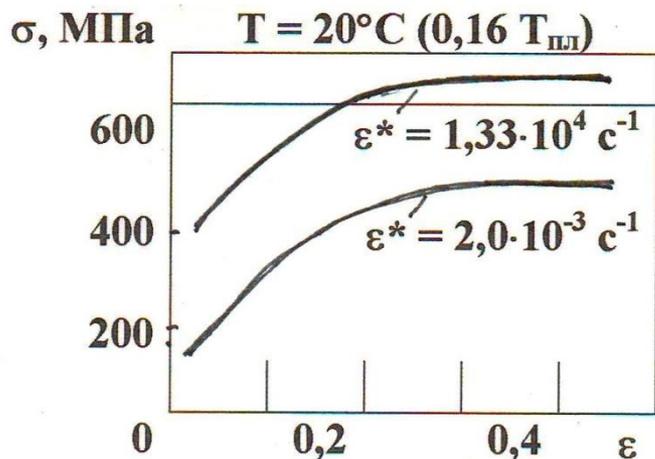
С увеличением скорости вдавливания, затрудняется теплообмен между **деформируемой зоной** и **окружающей средой**. Поэтому происходит переход от изотермической деформации к адиабатической. Согласно полученным результатам, для свинца уже при +20°C с увеличением скорости деформирования происходит переход от "горячей" к "холодной" деформации. При температуре - 180°C, происходит "холодное" деформирование $(dε / dt)_{\text{деформ.}} \gg (dε / dt)_{\text{релакс.}}$.

4.4.9. Влияние на структурную релаксацию температуры деформирования

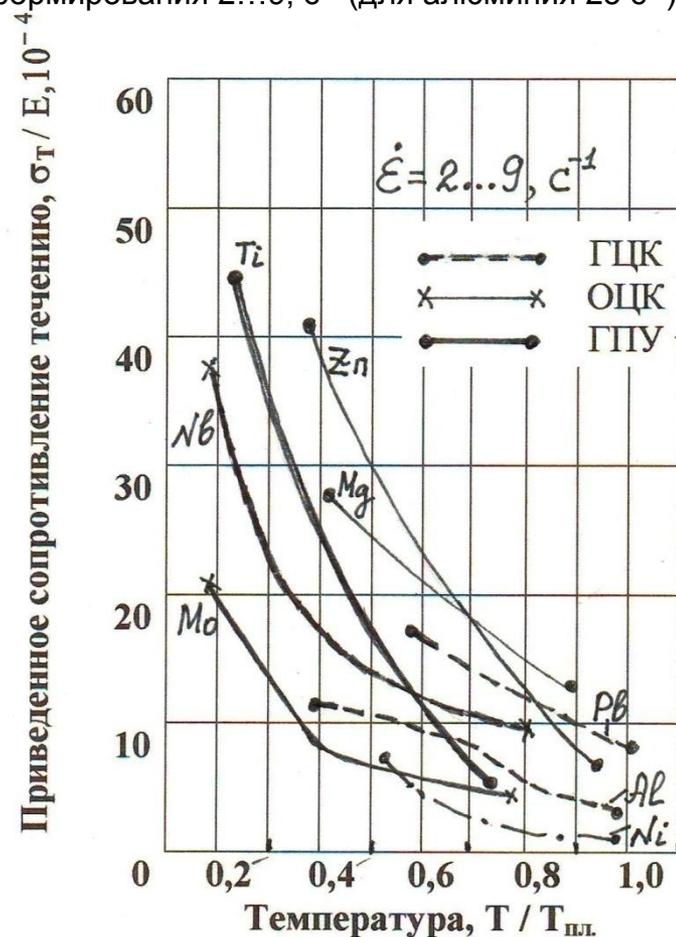
С повышением температуры наблюдается увеличение атомной подвижности, что приводит к различным физико-химическим процессам. Для анализа используют так называемые гомологические (сходственные) температуры, $T / T_{пл}$

Рассмотрим обобщенную температурную зависимость приведенного сопротивления течения для поликристаллических материалов с различной кристаллографической решеткой.

Исследовалось сопротивление малым пластическим деформациям (2...4 %) со скоростью деформирования 2...9, с⁻¹ (для алюминия 25 с⁻¹)



Диаграммы сжатия железа при различных скоростях и температурах деформирования:



4.4.10. Условия сверхпластичности металлов и сплавов.

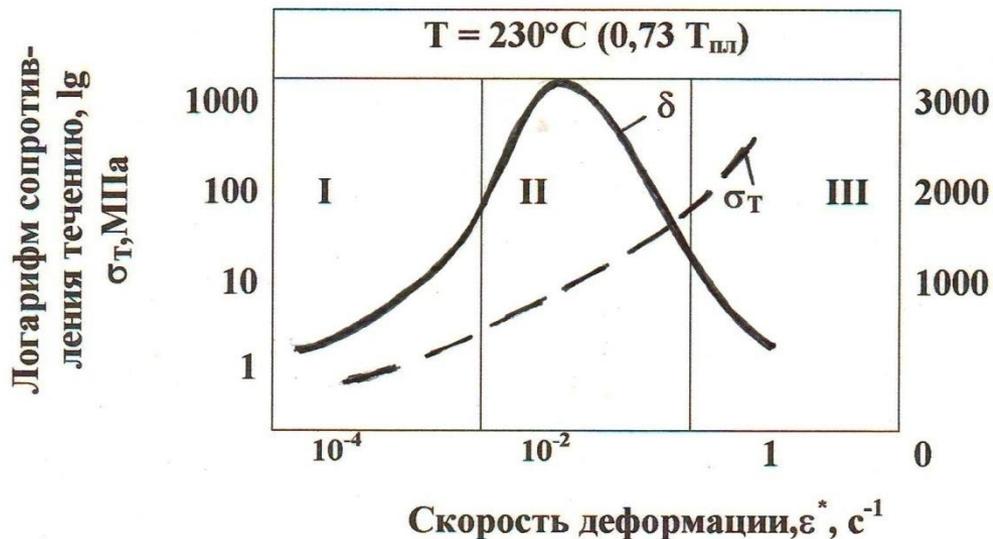
Сущность процесса разрушения состоит в следующем. Напряжение при достижении им предела текучести вызовет пластическую деформацию, т.е. приведет в движение дислокации. Если препятствий для свободного перемещения дислокаций нет и они не возникают в процессе деформации, то деформация может быть сколь угодно большой. При растяжении образец может удлиниться в десятки и сотни раз, превращаясь в подобие проволок. В некоторых случаях (при определенных температурах и скоростях деформации некоторых металлов) это наблюдается и носит название сверхпластичность. Конечно, так удлиниться на многие сотни, и, даже тысячи процентов образец сможет лишь тогда, когда не возникает местное сужение (шейка). Если возникает шейка, то деформация локализуется и в таком металле, в конечном итоге, произойдет разделение образца на два куска, но тогда, когда в месте разделения сечение утонилось до нуля. Это не редкий случай.

Значит, сверхпластичность может наблюдаться тогда, когда в процессе деформации пластичность металла не уменьшается и не образуется локальной деформации (шейки). Под сверхпластичностью следует понимать способность материала равномерно пластически деформироваться без упрочнения.

Сверхпластичность проявляется в следующих случаях:

- 1. при медленном деформировании мелкозернистых материалов (сплавов) при высоких температурах** (приблизительно 0,7 - 0,8 от абсолютной температуры плавления);
- 2. при температурах вблизи (несколько ниже) температуры фазовых превращений**, например в стали при 680 - 720° С (выше 720° С в стали происходит превращение), но не при температуре самих превращений, что иногда ошибочно указывается; в момент диффузионных фазовых превращений пластичность резко падает;
- 3. в момент сдвиговых (мартенситных) превращений.**

Используя эффект сверхпластичности, можно значительно продеформировать металл, затрачивая на это мало усилий. Однако сверхпластичность проявляется в сравнительно узком интервале температур, поэтому на практике штамповка в режиме сверхпластичности называется изотермической штамповкой, когда рабочий инструмент (штамп) и штампуемый материал нагреты на одну, строго определенную температуру. Тем не менее такого рода предельная пластичность типична для очень мягких, чистых металлов. Рассмотрим область существования сверхпластичности на примере эвтектоида **Zn – Al**. Особенностью высокотемпературного деформирования является накопление дефектов кристаллического строения не в теле, а вдоль границ зерен.



4.5. Влияние вида напряженного состояния.

Модели вязко-хрупкого перехода.

4.5.11. Влияние вида напряженного состояния на свойства металлических материалов

В механике деформируемого твердого тела общепринятым является классифицировать разрушение на хрупкое, вязкое и смешанное. Однако, в общем случае, на механизм разрушения влияние также комплекс других факторов: режим нагружения, температура испытания, вид, а точнее «жесткость» напряженного состояния.

Показатель напряженного состояния - коэффициент жесткости (α) — безразмерная величина для количественной оценки напряженного состояния, отражающий соотношение нормальных и касательных напряжений,

Напряженное состояние характеризуется отношением

$$\alpha = t_{\max} / S_{\max}^n$$

где, α — коэффициент жесткости **напряженного состояния**,

t_{\max} — **истинное** касательное напряжение,

S_{\max}^n — приведенное **истинное** нормальное напряжение, — напряжение, которое было приведено к той же деформации при одноосном растяжении.

Значения коэффициента жесткости при разных видах нагружения приведены в таблице

Таблица. Значения коэффициента жесткости при разных видах нагружения.

Вид нагружения	Коэффициент жесткости, α	Способ нагружения
Сжатие	2	Мягкий способ нагружения
Кручение	0,8	Средней жесткости
Одноосное растяжение	0,5	Жесткий способ нагружения
Трехосное растяжение	0	

4.5.11 Влияние вида напряженного состояния на свойства металлических материалов

При деформировании металлического образца, скольжение происходит по кристаллографической системе, которой соответствует максимальное скалывающее напряжение. Линии скольжения являются прямолинейными, если скольжение происходит только по одной системе, и волнистым, если скольжение происходит по нескольким системам скольжения. Расстояние между линиями скольжения убывает с увеличением степени деформации и составляет 100...1000 мкм.

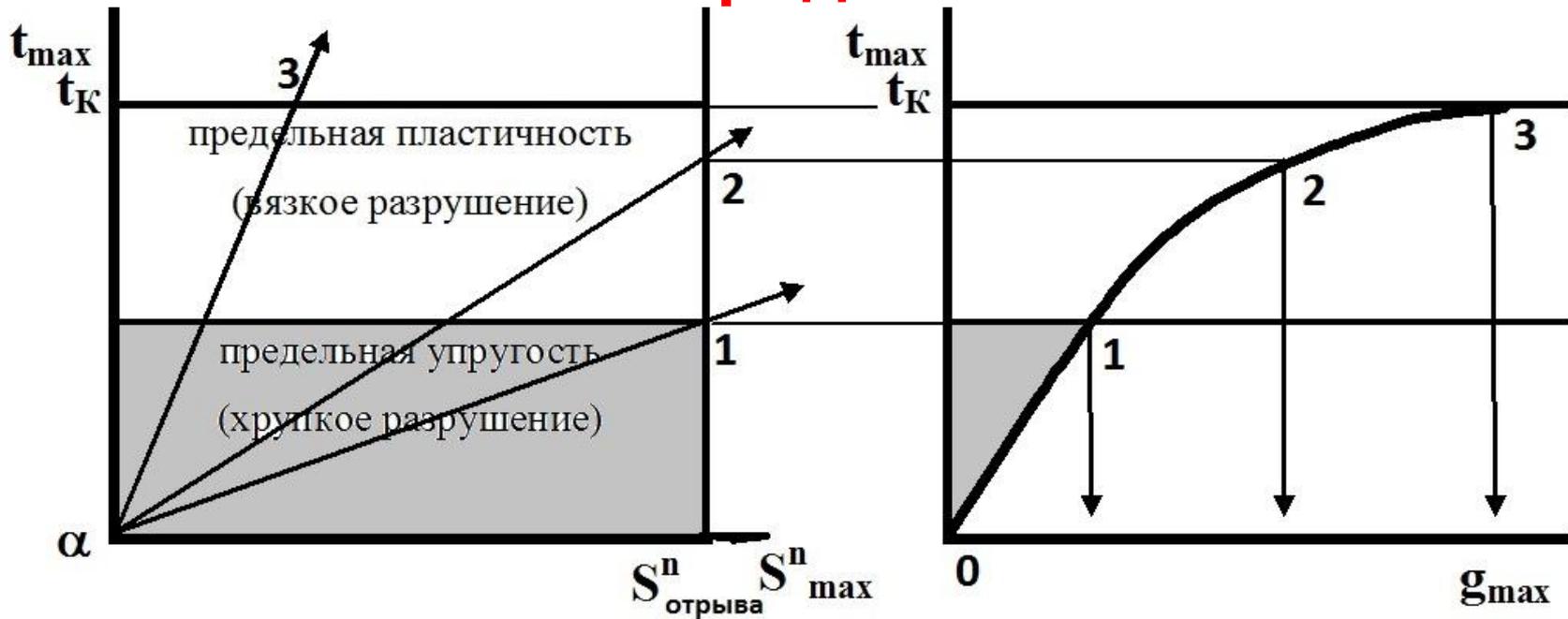
Критическим скалывающим напряжением (t_k) – называется напряжение, действующее в плоскости скольжения вдоль направления скольжения.

Критическое скалывающее напряжение не зависит от ориентации кристалла, является постоянной величиной и составляет примерно 10^{-4} от модуля сдвига G .

Таблица. Значения критических скалывающих напряжений кристаллов при комнатной температуре

Me	Ag	Cd	Mg	Au	Cu	β -Sn	Zn	Ni
t_k , МПа	0,60	0,80	0,85	0,90	1,00	1,30	1,50	5,80

4.5.12. Диаграмма механического состояния Я. Б.Фридмана



Для любого напряженного состояния можно построить обобщенную кривую течения, где g_{max} – деформация срезом.

S^n_{max} – приведенное **истинное** нормальное напряжение, – напряжение, которое было приведено к той же деформации при одноосном растяжении.

Луч проведенный из начала координат характеризует определенное напряженное состояние, которое оценивается показателем $\alpha = t_{max} / S^n_{max}$

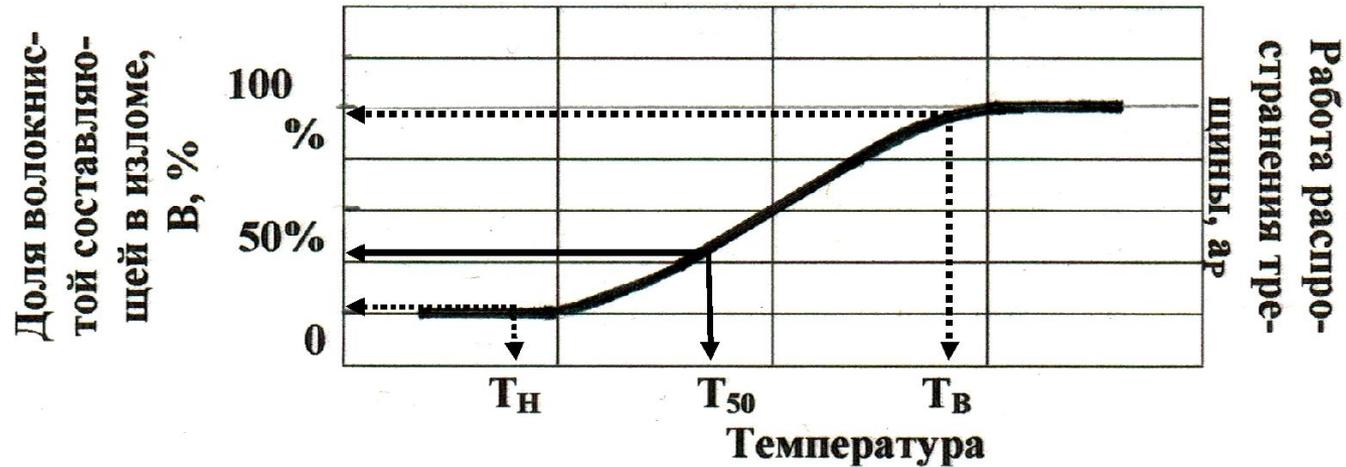
если $t_{max} \gg S^n_{max}$ способ нагружения является мягким (сжатие, $\alpha = 2,0$)

$t_{max} \ll S^n_{max}$ способ нагружения является жестким (растяжение, $\alpha = 0,5$)

$t_{max} \approx S^n_{max}$ способ нагружения является средним (кручение, $\alpha = 0,8$)

Таким образом, увеличивая коэффициент жесткости α за счет применения более мягкого способа нагружения (сжатия) можно перевести металл в пластическое состояние.

4.5.13. Модель вязко-хрупкого перехода. Хладноломкость.



Сериальная кривая для определения порога хладноломкости T_{50} и работы распространения трещины a_p в материале.



а

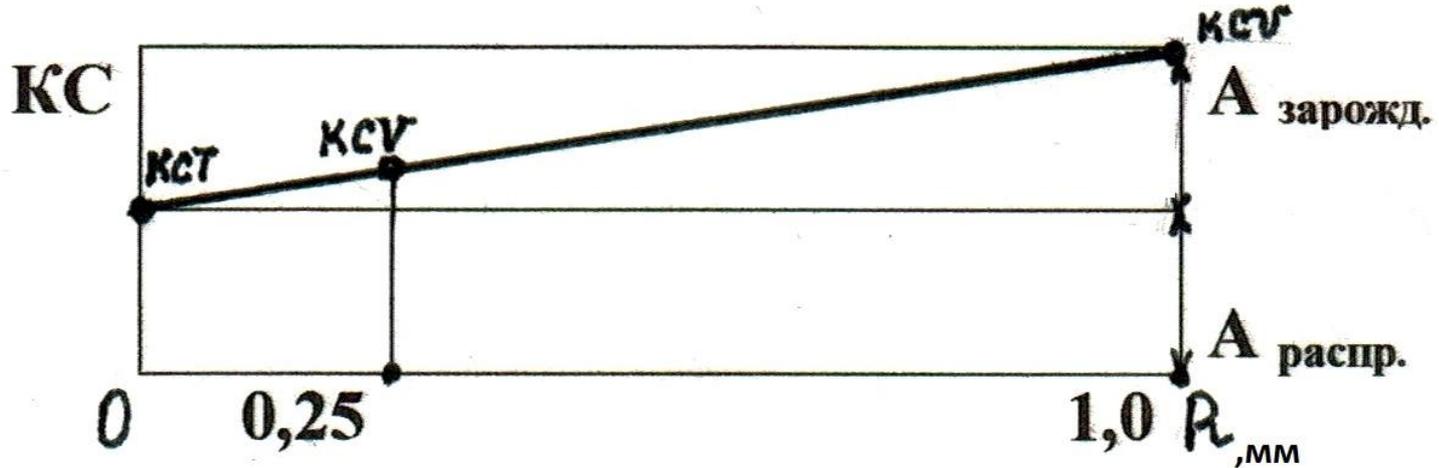


б

Виды образцов после ударного нагружения с вязким (а) и кристаллическим (б) изломом.

4.5.14. Оценка работы зарождения и распространения трещин в материале по испытаниям на ударный изгиб

$A_{\text{разрушения}} = A_{\text{зарождения трещины}} + A_{\text{распротр. трещины}}$



- $КСУ$ – при радиусе надреза $R = 1$ мм,
- $КСВ$ – при радиусе надреза $R = 0,25$ мм,
- $КСТ$ – при концентраторе в виде трещины ($R \sim 0$).

Ударная вязкость зависит от:

- размера зерна металла – измельчение зерна приводит к значительному повышению ударной вязкости;
- наличия концентраторов напряжений в изделии;
- наличия вредных примесей;
- скорости деформации – чем выше скорость, тем ударная вязкость ниже;
- температуры.

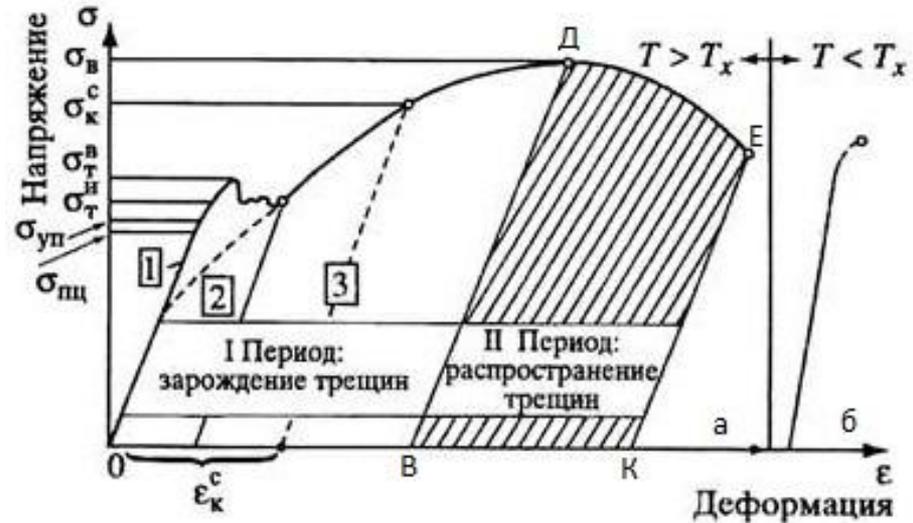


Диаграмма растяжения при вязком (а) и хрупком (б) состоянии.

Контрольные вопросы по Теме 4.

1. Изменение прочности материала с повышением (снижением) температуры поверхностных слоев деталей машин.
2. Изменение прочности материала с повышением (снижением) скорости деформирования поверхностных слоев деталей машин.
3. Условия возникновения состояния сверхпластичности материалов.
4. Основные способы релаксации внутренних напряжений металлом.
5. Эволюция изменения дислокационной субструктуры в металле с низкой (высокой) энергией дефекта упаковки (э.д.у.).
6. Какие испытания проводят для оценки Температуры вязко-хрупкого перехода материала ($T_{хр}$)?
7. Что называется Концентрационной релаксацией в сплаве?
8. Основные процессы, протекающие в холоднодеформированном металле при нагреве по мере повышения температуры (Отдых. Полигонизация. Рекристаллизация).
9. Как оценивается температура вязко-хрупкого перехода материала по виду излома после фрактографического анализа.
10. Приведите пример мягкого (жёсткого) способа нагружения.

**Спасибо
за внимание**