

Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

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

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

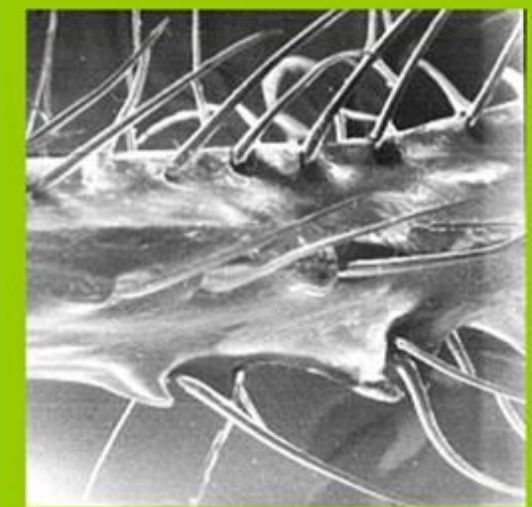
Кафедра "Машиноведение и
основы конструирования"
ИММиТ САбПУ



x 1



x 100



x 10000

Тема1. 1.5. Прочность металлов и сплавов как совокупная характеристика влияния структурных уровней.

- **На макро-уровне** – на механические свойства влияет масштабный фактор
- **На микро-уровне** – на механические свойства влияет размер зерна.

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + K / (D_{\text{зерна}})^{1/2}$$

На субмикро-уровне – на механические свойства влияет размер зерна.

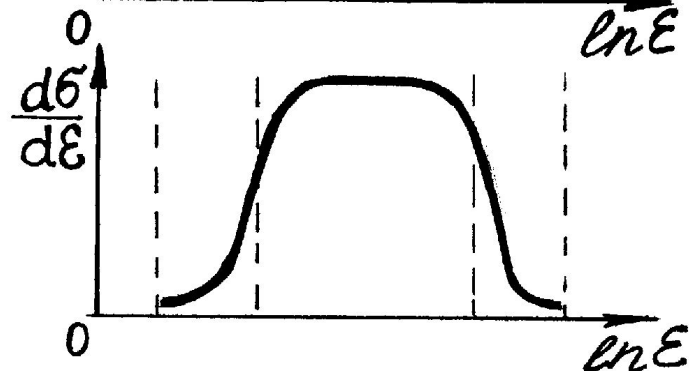
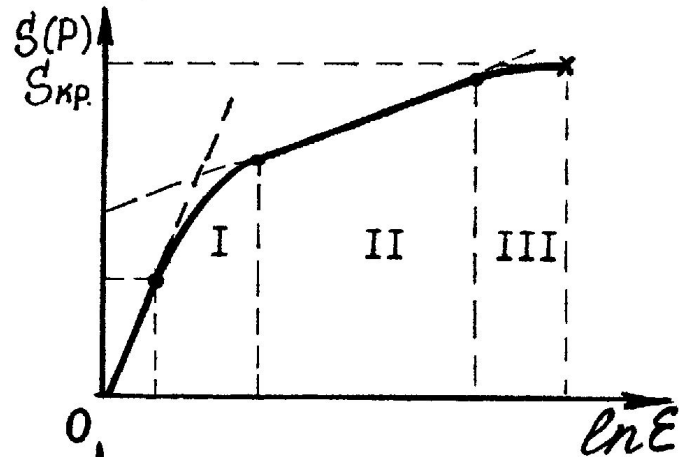
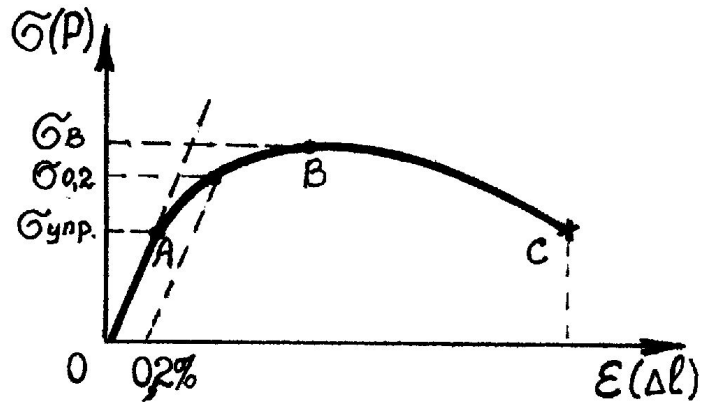
- влияние легирования
- влияние второй фазы
- дислокационное упрочнение
- влияние границ раздела

$$\sigma_{\text{reop}} = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{S}_n / \mathbf{a})^{1/2}$$

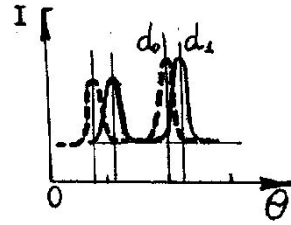
$\sigma_{0,2}$	=	σ_0	+	σ_1	+	σ_2	+	σ_3	+	σ_4	+	σ_5
		сила трения решетк и		твердо раство рное упрочне ние		дислока ционное упрочне ние		дисперс сионное упрочне ние		упрочне ние больше угловы ми граница ми		упрочне ние малоугл овыми граница ми

Тема 2. 2.1. Исследование деформации.

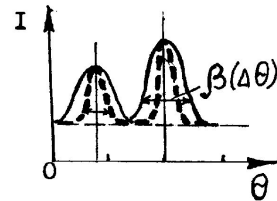
Классификация остаточных напряжений



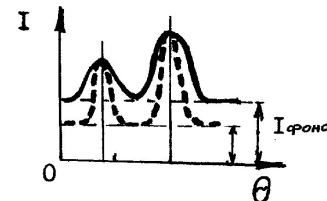
- Факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений:
- А. Механический
- Б. Тепловой
- В. Структурно-фазовый
- С. Коррозионный



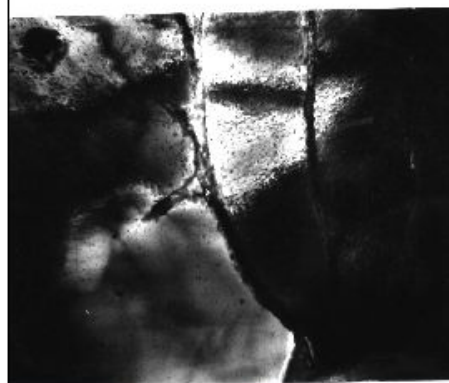
- 1. Макронапряжения (напряжения I рода) - упругие напряжения уравнивающиеся в объеме всей детали.
- 2. Микронапряжения (напряжения II рода) - упругие напряжения, уравнивающиеся в пределах отдельных зерен или блоков (дальнодействующие).



- 3. Статические искажения решетки - упругие напряжения, уравнивающиеся в пределах небольших групп атомов.



ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ



х 24000

№
п/п

ФАТОРЫ ПРИВОДЯЩИЕ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

1.

Механический (силовой)

2.

Термический (тепловой)

3.

Структурно-фазовый

4.

Коррозионный (электрохимический)

Контроль внутренних напряжений по
экстинкционным контурам
на электронно-микроскопических снимках

←

→



х 24000

№ п/п

МЕХАНИЗМЫ РЕЛАКСАЦИИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

1. Структурная релаксация

2. Концентрационная релаксация

3. Зарождение микротрещин

№ п/п

ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ

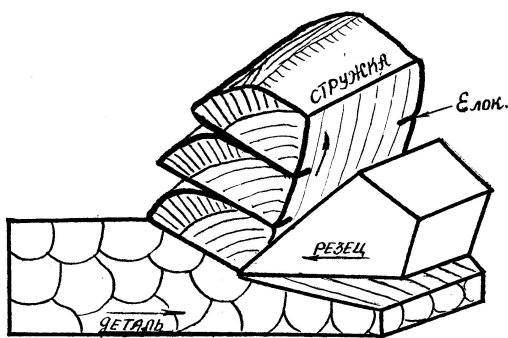
1. Энергия дефекта упаковки материала

2. Степень наклепа

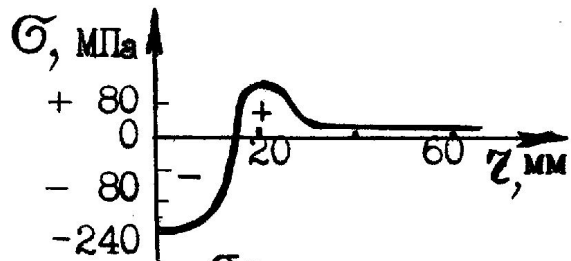
3. Температура деформации или нагрева

4. Скорость деформации

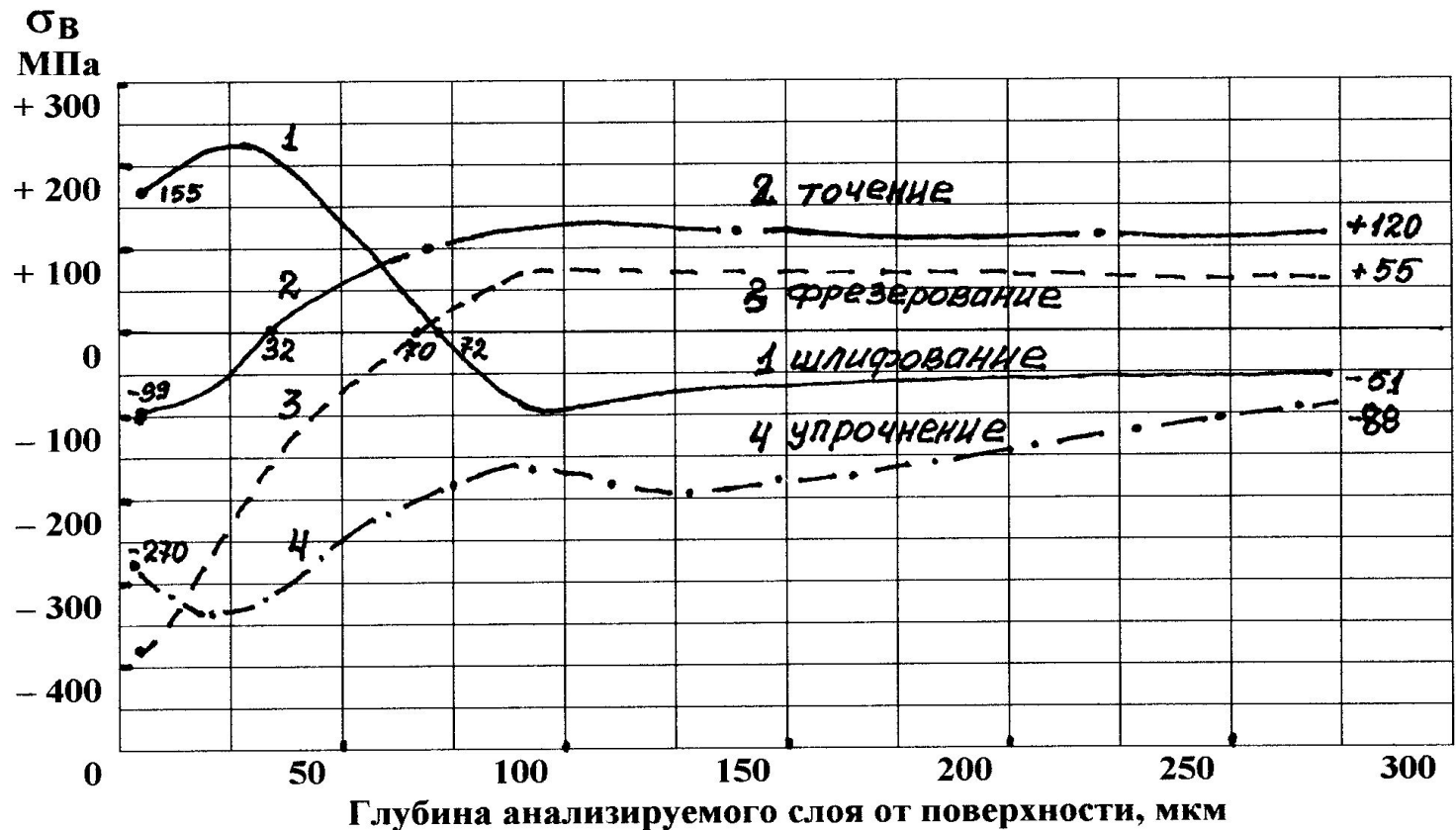
5. Вид упруго-напряженного состояния



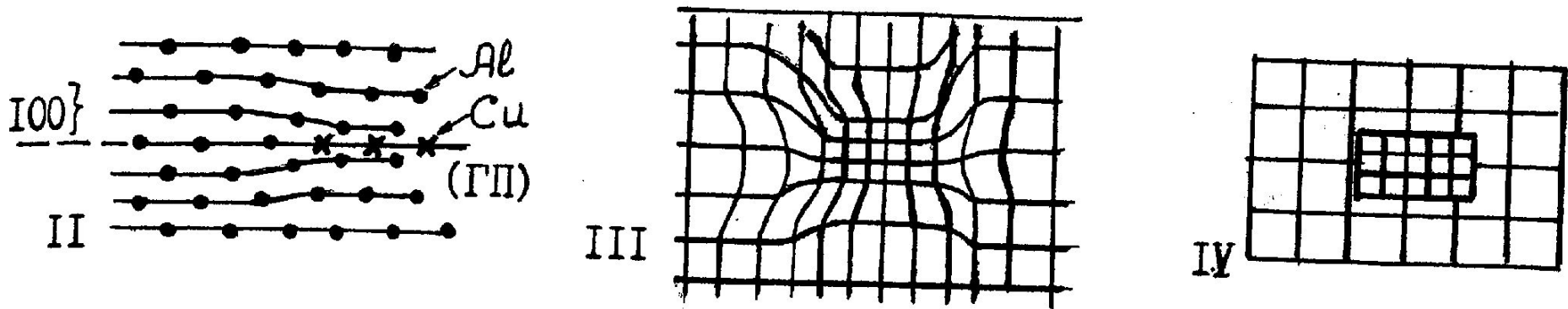
2.2. Механические напряжения



- Эпюры остаточных напряжений после
- шлифования (1), точения (2), фрезерования (3) стали 12Х13



2.4. Структурно-фазовые напряжения



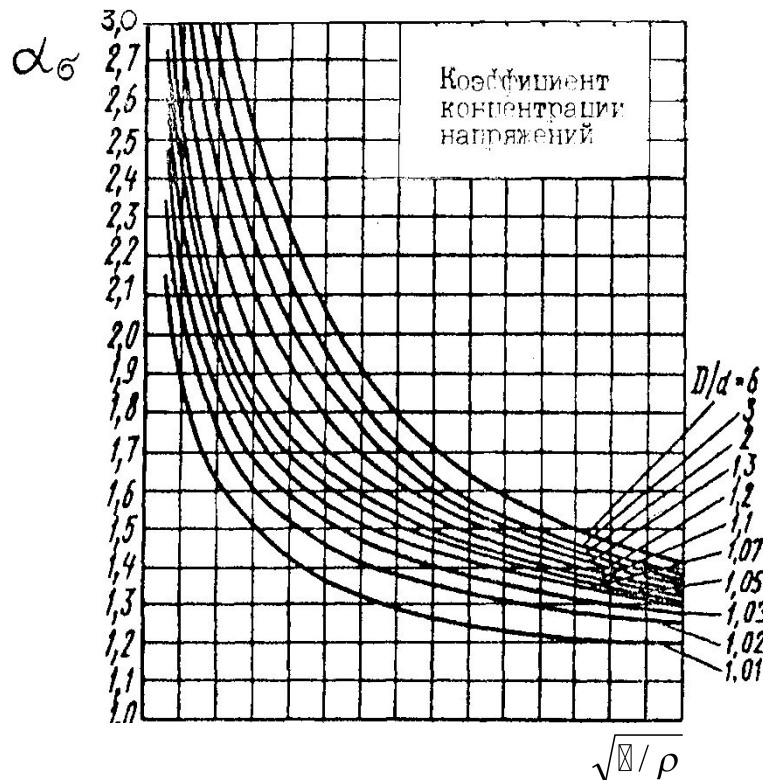
- I. Дораспадный период.
- II. Подготовительный (инкубационный) период распада. Образование зон Гинье-Престона (Г.П.).
- III. Самопроизвольный распад. Формирование на базе зон Г.П. предвыделений - новых фаз с когерентной с матрицей решеткой.
- IV. Обособление продуктов распада, снятие когерентности с границ фаз.

3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей

Концентраторы напряжений бывают

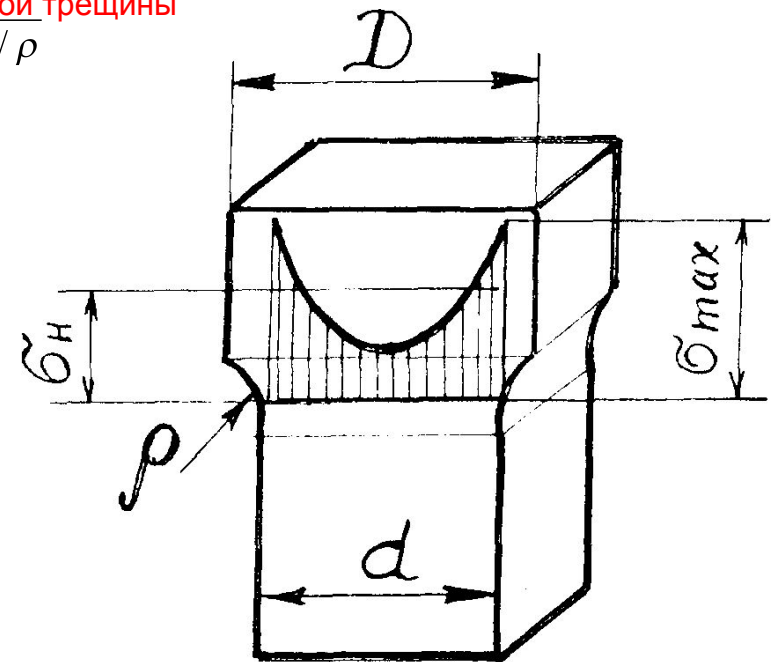
конструктивные (отверстия, резьба)
технологические (царапины, надрезы)
металлургические (несплошности,
грубые включения избыточных фаз)

- **Концентрацией напряжений** – называется явление местного увеличения внутренних напряжений по сравнению с уровнем приложенного номинального в зонах резкого изменения размеров и очертаний детали.
- Введем коэффициент концентрации напряжения (α_σ)



Для центральной эллиптической трещины
 $\alpha_\sigma = 1 + 2\sqrt{r}/\rho$

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$



3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.

Таким образом, для повышения прочности деталей желательно максимальное **смягчение формы надреза**. Возможно нанесение дополнительных разгружающих надрезов, которые могут увеличивать или уменьшать концентрацию напряжений, в зависимости от формы тела, расположения надрезов и способа нагружения.

Геометрические параметры неровностей поверхности оцениваются параметрами шероховатости, волнистости, регулярных микрорельефов.

Шероховатость поверхности - это совокупность неровностей обработанной поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. Примерное отношение высоты неровностей к шагу менее 50. при $S/H \ll 0...50$ – называется **субмикрогеометрическое отклонение формы поверхности**.

Волнистость поверхности - это совокупность неровностей, имеющих шаг больший, чем базовая длина, используемая для измерения шероховатости. Отношение высоты к шагу более 50 и менее 1000.

при $S/H = 50...1000$ – называется **микрогеометрическое отклонение формы поверхности**.

Волнистость в России не стандартизирована, то для ее оценки используют параметры шероховатости.

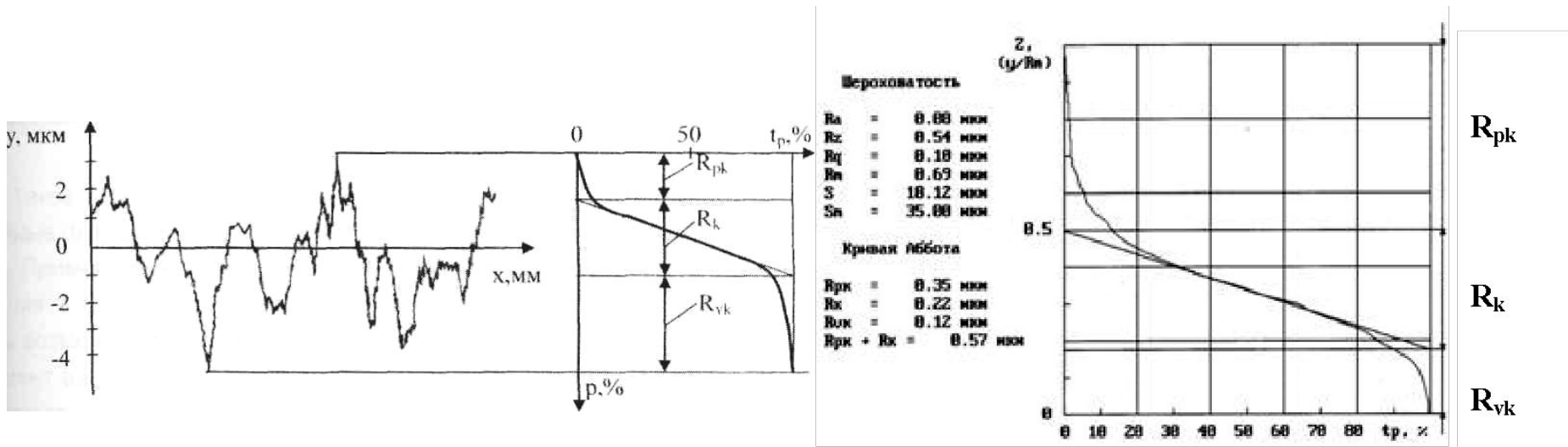
Регулярные микрорельефы – это неровности, которые в отличие от шероховатости и волнистости, одинаковы по форме, размерам и взаиморасположению.

при $S/H > 1000$ – **макрогеометрическое отклонение формы поверхности**;

Регулярный микрорельеф получают обработкой резанием или поверхностным пластическим деформированием роликами, шариками, алмазами.

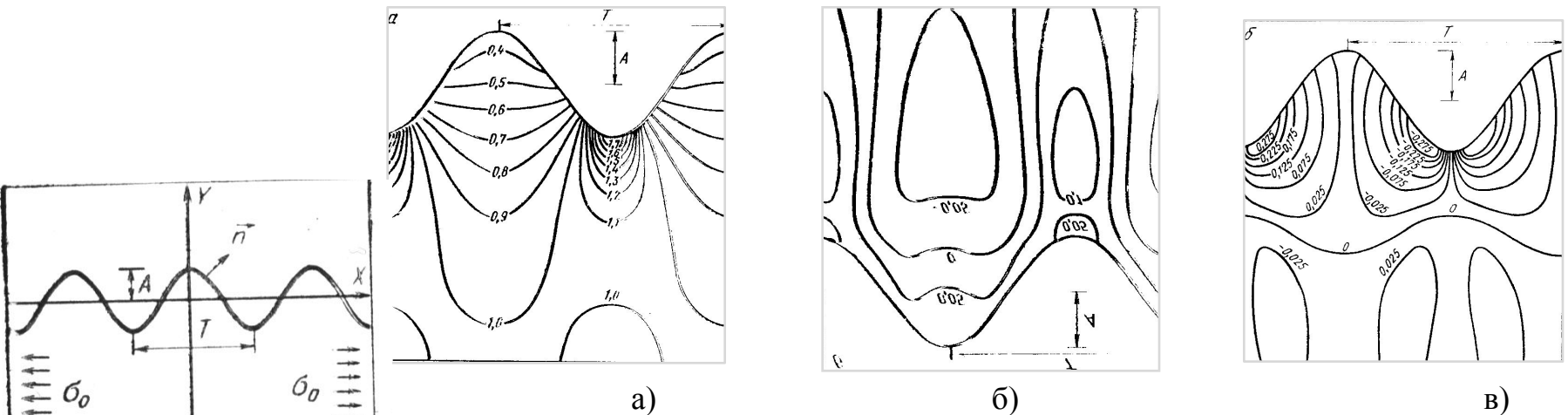
3.3. Геометрические характеристики качества поверхности деталей.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ КРИВЫХ АБОТА



- R_a - среднее арифметическое отклонение профиля;
- R_z - высота неровностей профиля по десяти точкам;
- R_q - среднее квадратическое отклонение профиля;
- R_{max} - наибольшая высота неровностей профиля;
- S - средний шаг местных выступов профиля;
- S_m - средний шаг неровностей профиля;
- R_{pk} - параметр, характеризующий высоту выступов быстро изнашивающихся в первый период эксплуатации (в период приработки);
- R_k - параметр, характеризующий основу профиля, которая длительное время находится в работе и является несущей площадью по мере срабатывания наружных слоев;
- R_{vk} - параметр, характеризующий глубину впадин профиля и соответственно смазывающую способность наружных слоев;
- $R_{pk} + R_k$ - сумма параметров, характеризующая изнашиваемость рабочих поверхностей;

3.5. Исследование шероховатости поверхности до и после нанесения РМР



Распределение внутренних напряжений в приповерхностном слое

σ_{xx} (а); σ_{yy} (б); σ_{xy} (в).

Локальное напряжение, σ_0^i , действующее **в выступе**, связано следующим соотношением с "макроскопическим напряжением" σ_0 , действующим в толще детали:

$$\sigma_0^i (\text{недогр.}) = \sigma_0 \cdot (1 - R/S \cdot \sin 2\pi/S) \cdot \cos^2 \beta \quad (1)$$

В любой точке поверхности **во впадине**, которые являются концентраторами напряжения, вероятно, должно выполняться соотношение:

$$\sigma_0^i (\text{перегр.}) = \sigma_0 \cdot 2 (R/r)^{1/2} = \sigma_0 \cdot K \quad (2)$$

где K – коэффициент концентрации напряжений в вершинах неровностей во впадинах размером R и радиусом закругления r .

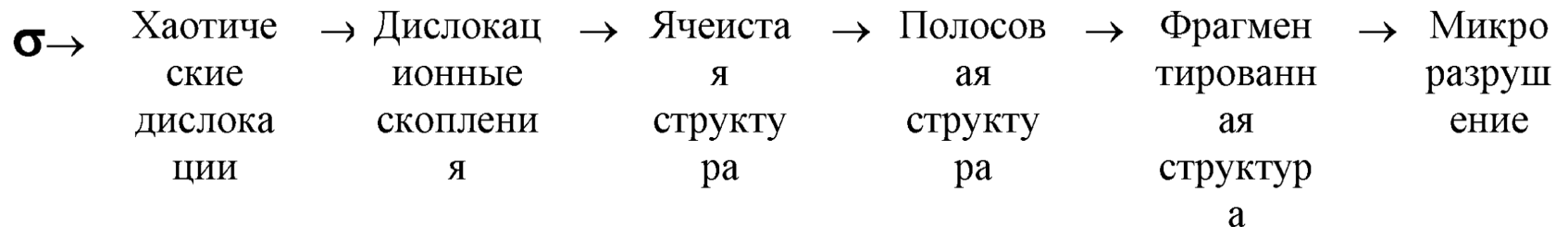
Как видно из рис., в поверхностном слое детали, имеющем волнообразную **шероховатость с амплитудой R , периодом S , и их отношением R/S** , происходит перераспределение внутренних напряжений: выступы оказываются **недогруженными**, а впадины **перегруженными**.

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).



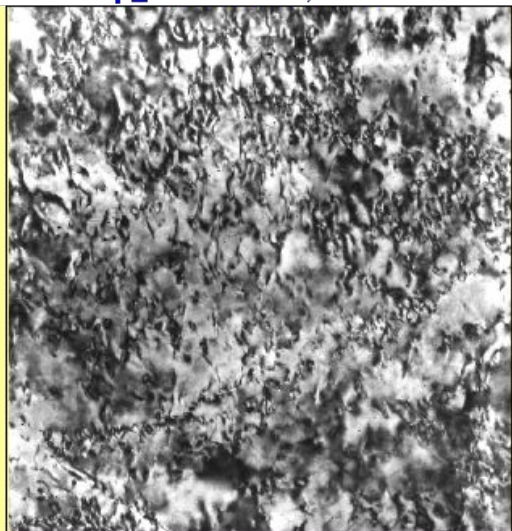
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С УВЕЛИЧЕНИЕМ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ($d\varepsilon / dt = \text{const} = 10^{-3}, 1/\text{сек}$) ($\rho_{\perp} < 2 \cdot 10^{11}, 1/\text{см}^2$)

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

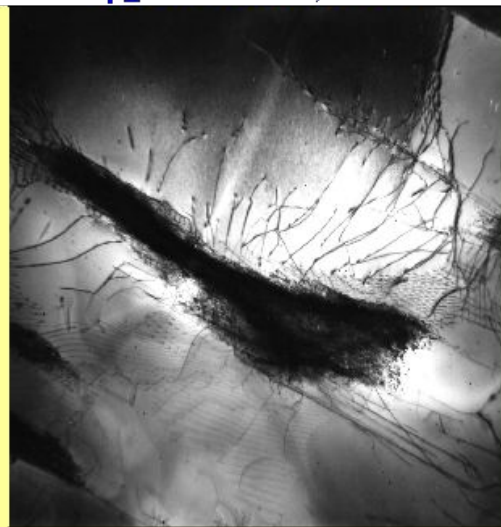
$$\rho_{\perp} = 5 \dots 10 \cdot 10^9, 1/\text{см}^2$$

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

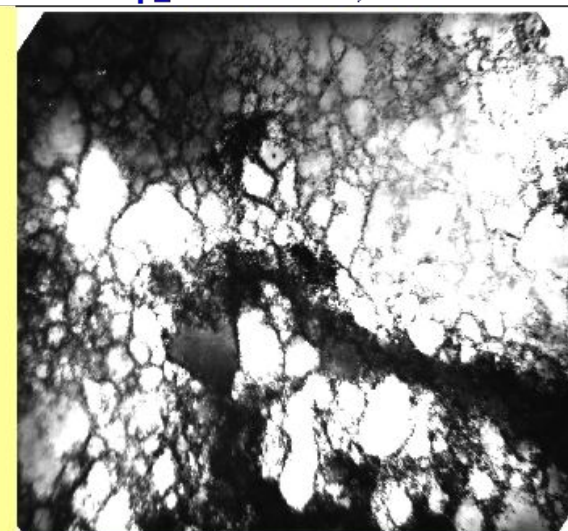
**ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ**



ХАОТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

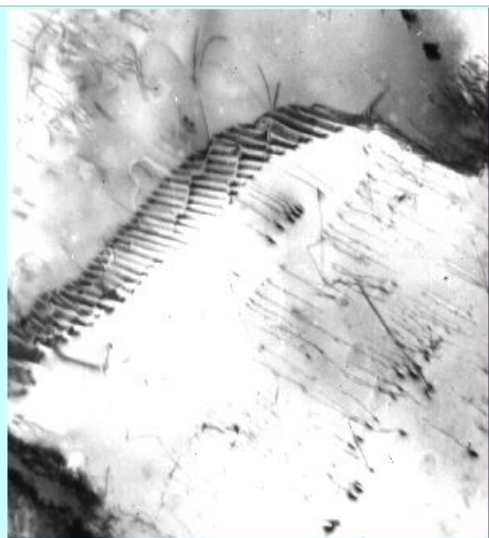


КЛУБКИ ДИСЛОКАЦИЙ



ЯЧЕЙСТАЯ СТРУКТУРА

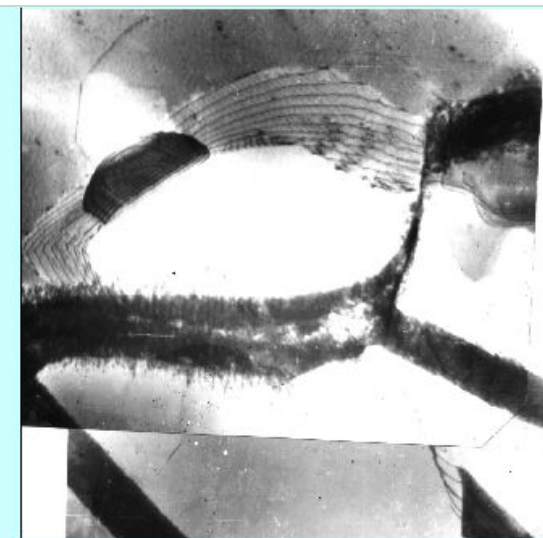
**НИЗКАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФЕКТА
УПАКОВКИ**



ПЛОСКИЕ СКОПЛЕНИЯ



ПЛОСКАЯ СЕТЧАТАЯ



ЯЧЕЙСТО-СЕТЧАТАЯ

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

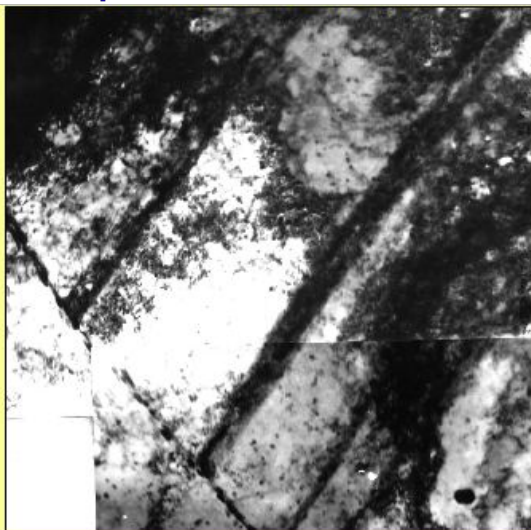
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

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

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

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

ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ
ДЕФЕКТА УПАКОВКИ

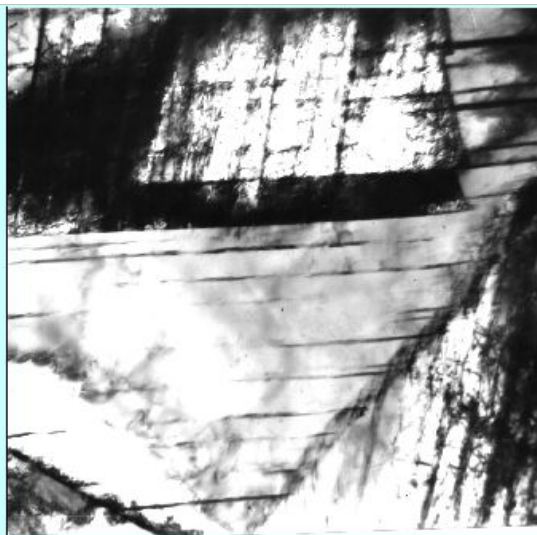


ПОЛОСОВАЯ СТРУКТУРА

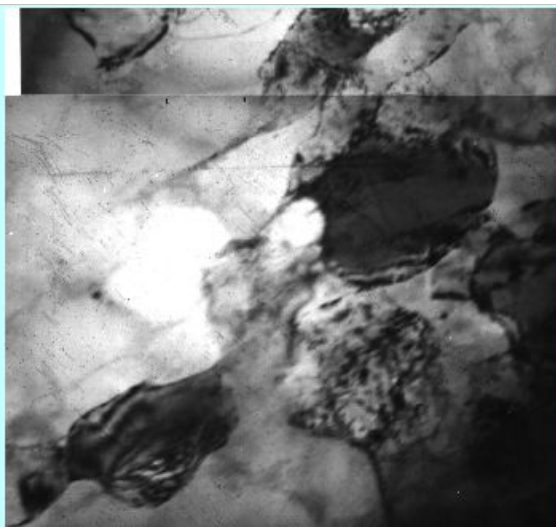


ФРАГМЕНТИРОВАННАЯ СТРУКТУРА

НИЗКАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФЕКТА
УПАКОВКИ



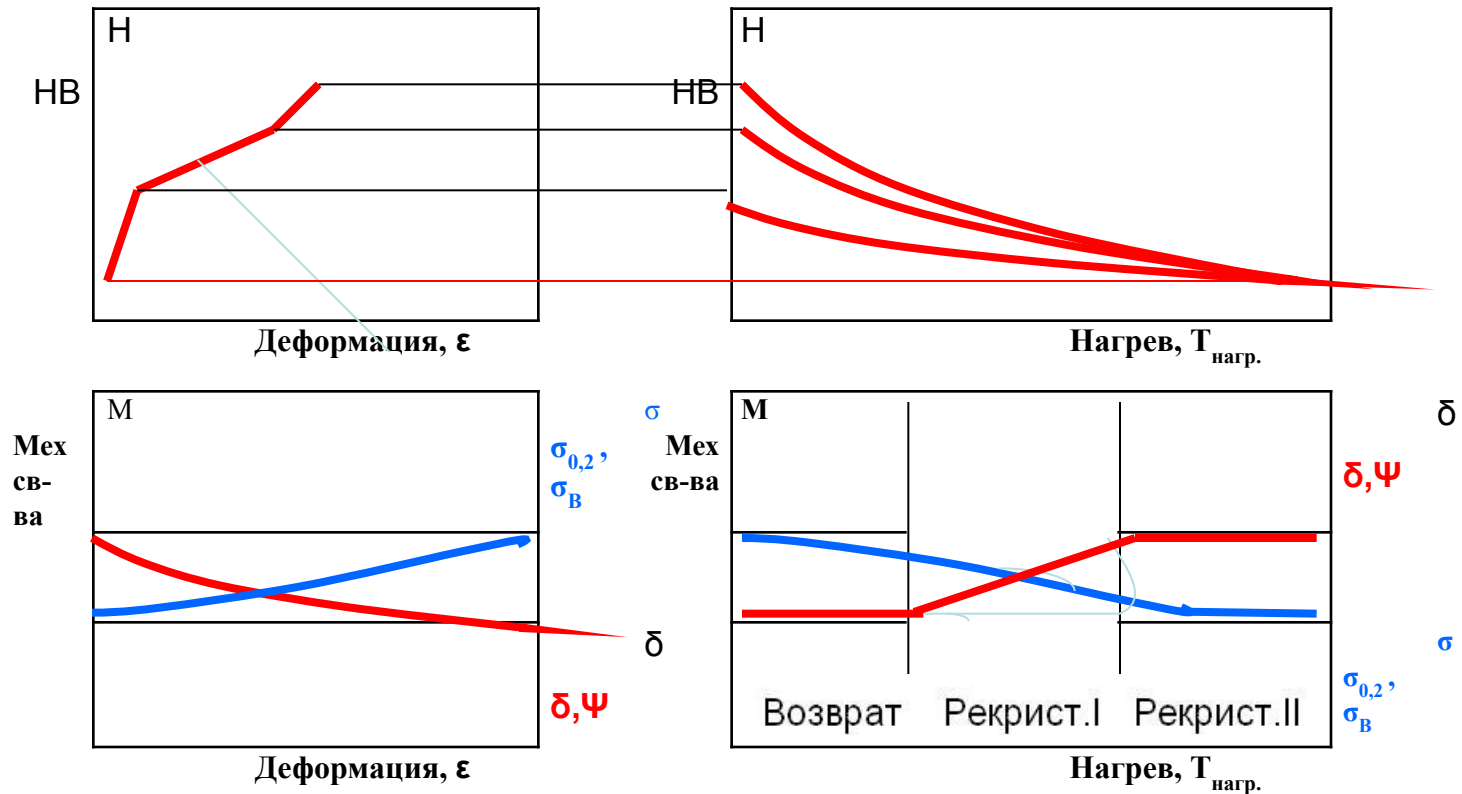
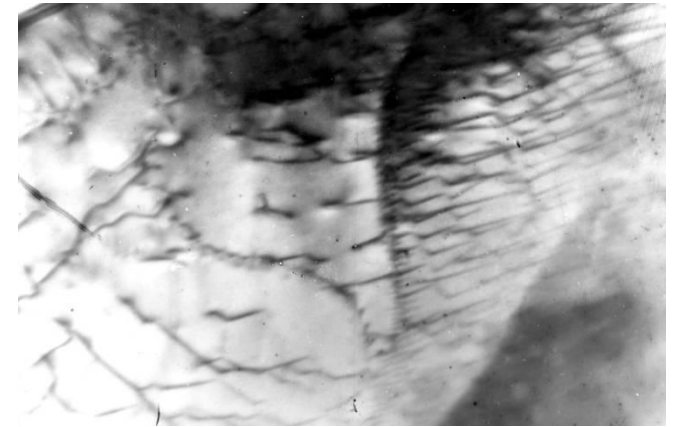
ДВОЙНИКОВАЯ СТРУКТУРА



СТРУКТУРА С ДИСКРЕТНЫМИ РАЗОРИЕНТИР

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

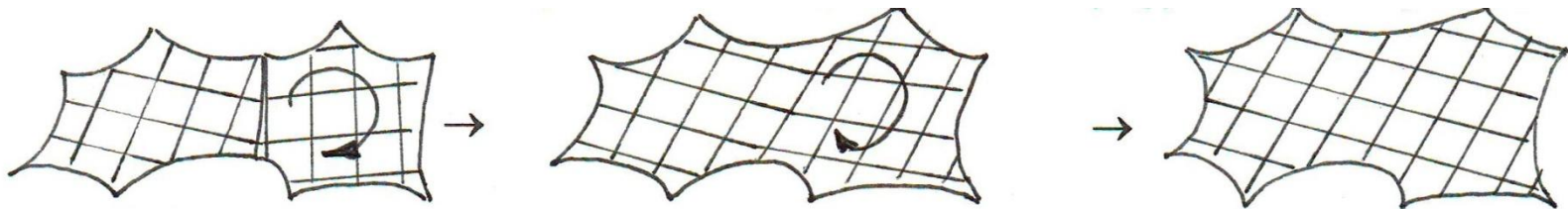
В 1949 году Р.Кан, исследуя свойства деформированного изгибом монокристалла цинка, обнаружил, что дислокации из исходного состояния (хаотическое распределение) перестроились в стенки, разориентирующие монокристалл на небольшие углы.

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.

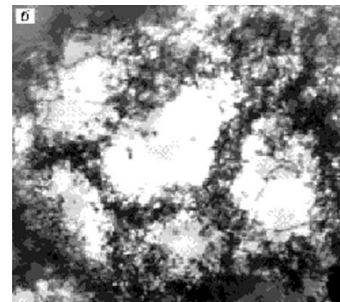
Коалесценцией (рекристаллизацией на месте, in situ) – называется разновидность полигонизации при сливании субзерен и их укрупнении до размеров зерен.



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 ($T \approx 0,2 \dots 0,3 T_{пл.}$)

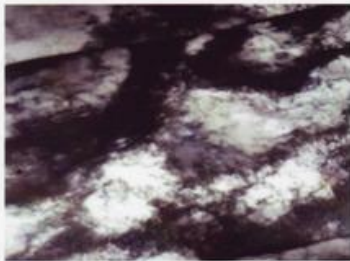
ПОЛИГОНИЗАЦИЯ

Схема полигонизации

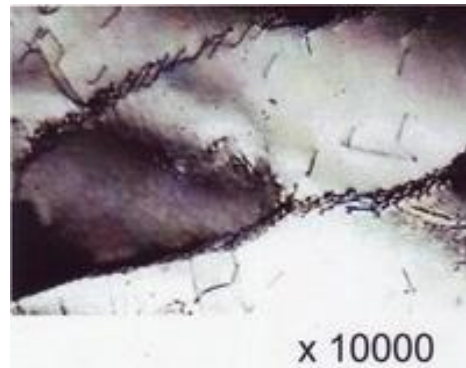
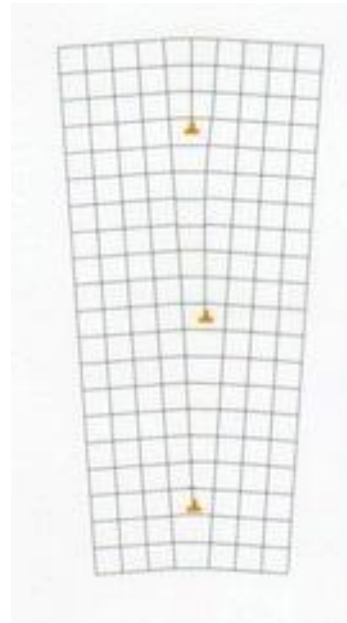
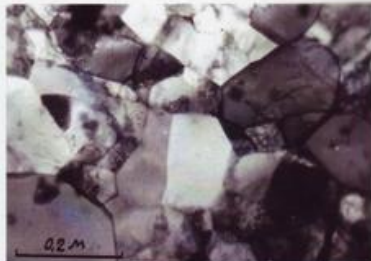


Изменение структуры при нагреве

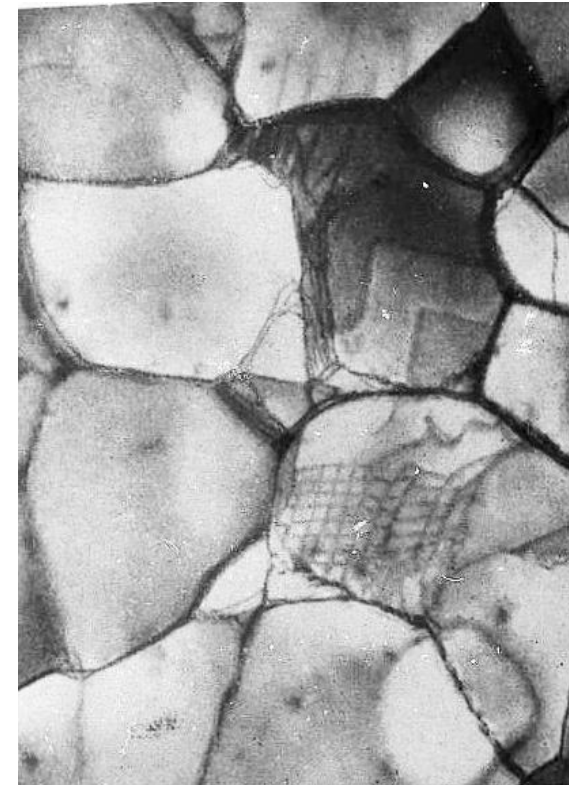
Структура после
холодной деформации



Структура после
полигонизации



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



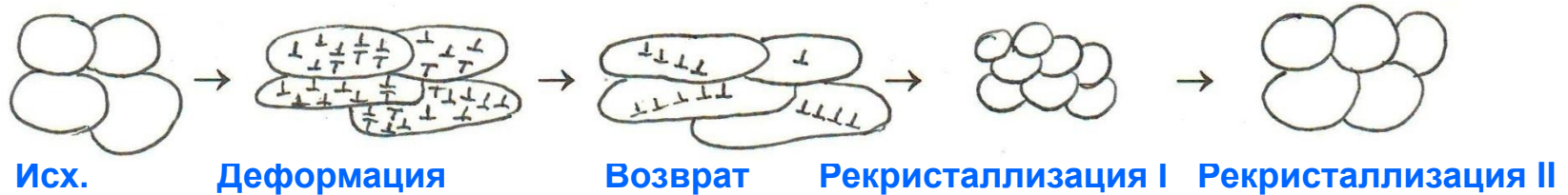
4.1.3. Рекристаллизация ($T \approx 0,3...0,4 T_{пл.}$)

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 $a = 0,3...0,4$.

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.

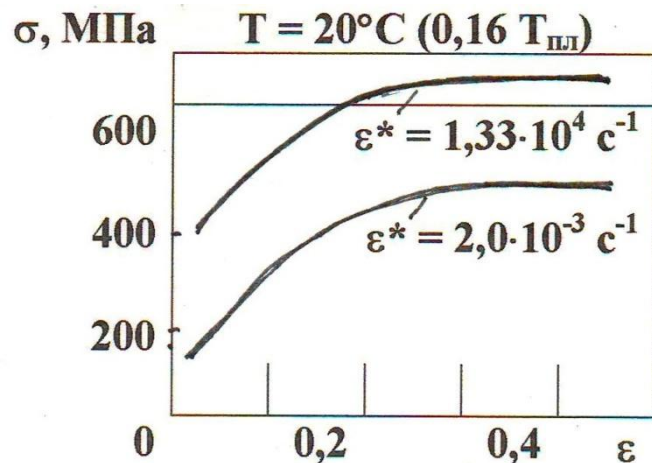
4.4. Влияние скорости пластической деформации на релаксацию напряженно-деформированного состояния металла.

4.4.9. Влияние на структурную релаксацию температуры деформирования

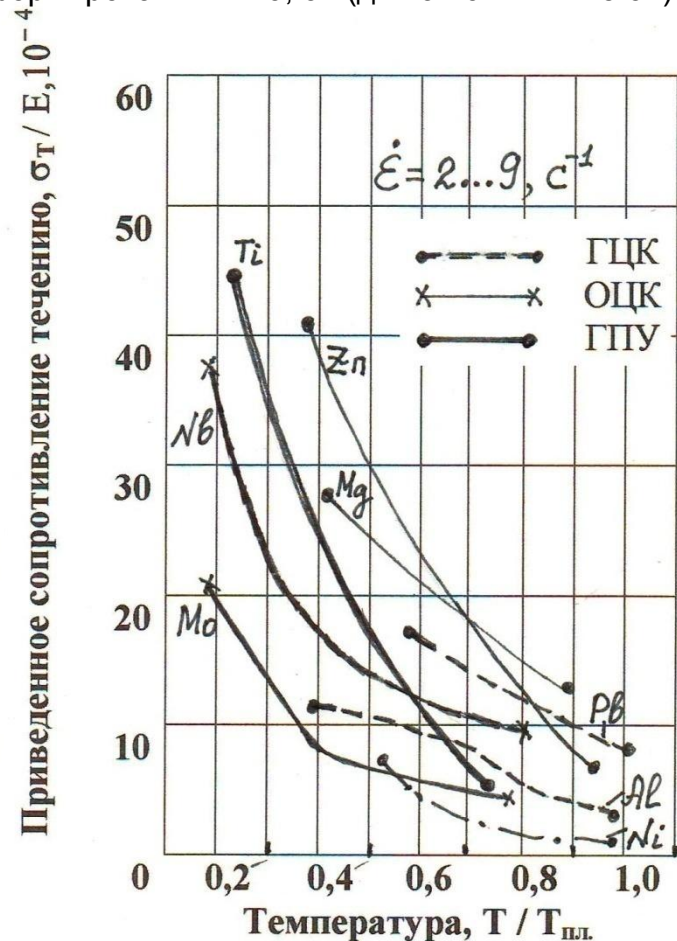
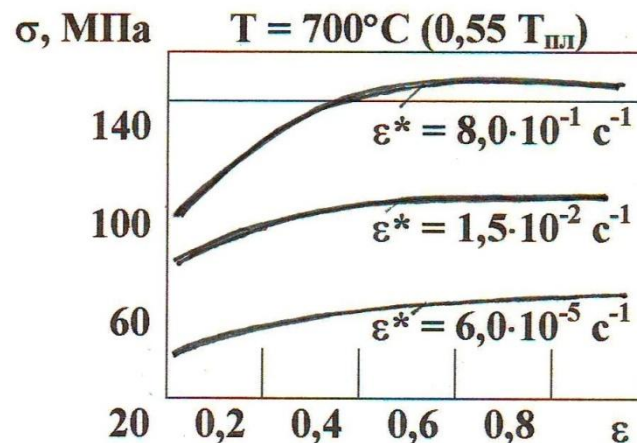
С повышением температуры наблюдается увеличение атомной подвижности, что приводит к различным физико-химическим процессам. Для анализа используют так называемые гомологические (сходственные) температуры, $T / T_{пл}$

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, c^{-1} (для алюминия 25 c^{-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.

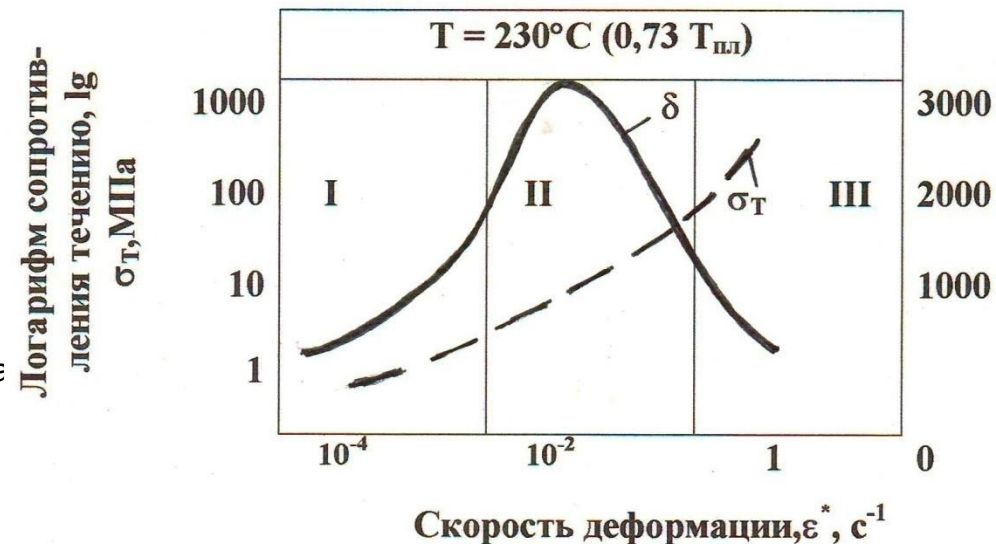
Значит, сверхпластичность может наблюдаться тогда, когда в процессе деформации пластичность металла не уменьшается и не образуется локальной деформации (шейки). Под сверхпластичностью следует понимать способность материала равномерно пластически деформироваться без упрочнения.

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,

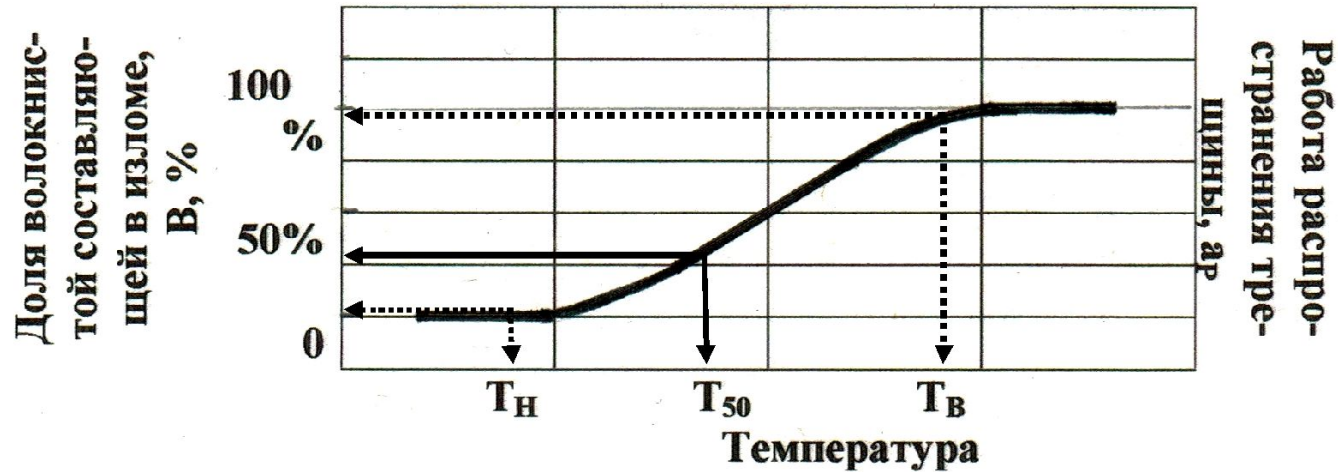
$S_{\max}^n$ — приведенное **истинное** нормальное напряжение, — напряжение, которое было приведено к той же деформации при одноосном растяжении.

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	

4.5.13. Модель вязко-хрупкого перехода. Хладноломкость.



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



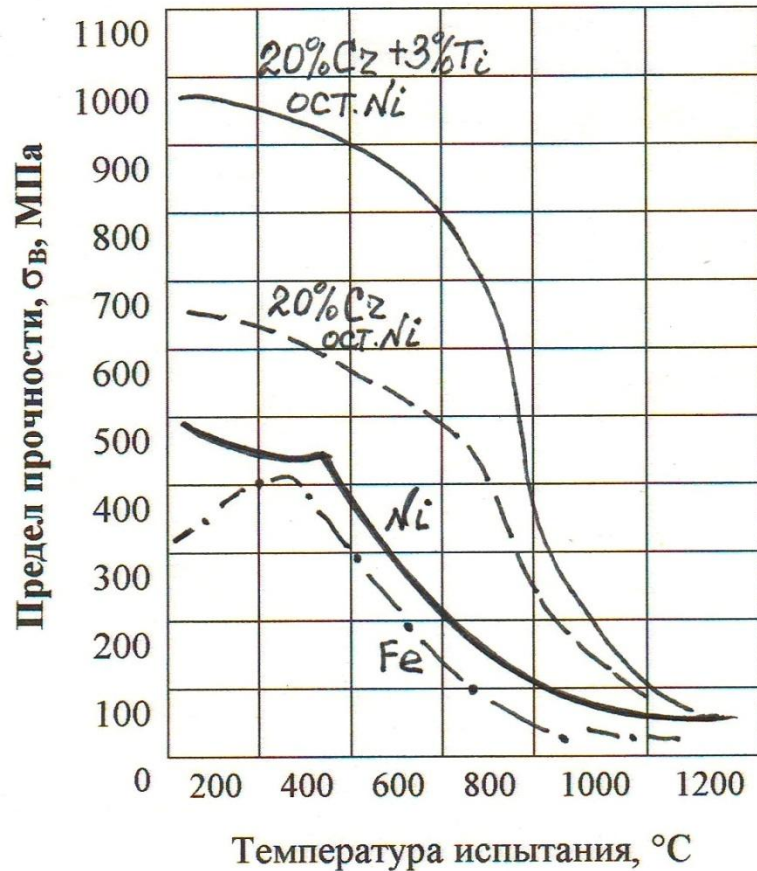
а



б

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

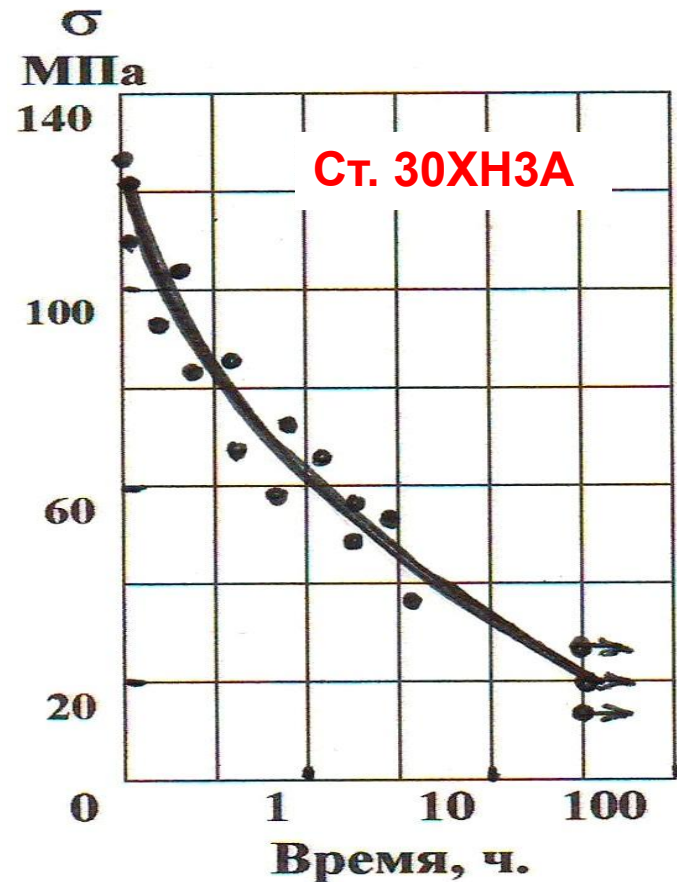
5.1. Влияние высоких температур на механические свойства при кратковременном и длительном растяжении.



Многие детали машин и конструкций подвергаются весьма длительному воздействию **постоянных длительных статических нагрузок**, а также воздействию коррозионных или поверхностно-активных сред при нормальных или при повышенных температурах (**крепежные детали, пружины, детали судов и котлов**, нагруженных внутренним давлением, химической и нефтяной аппаратуры, паровых и газовых турбин и т. п.).

При длительных статических нагружениях значительную опасность может представлять *преждевременное разрушение*. У многих деталей из конструкционных сталей и сплавов на алюминиевой и титановой основе (**затянутые болты, пружины, сварные соединения** и др.) наблюдается *склонность к замедленному разрушению*. Многие металлы и жаропрочные стали и сплавы при высоких температурах обнаруживают при длительных статических нагрузках значительное **понижение прочности, пластичности и вязкости**.

5.2. Испытания материалов на длительную прочность. Определение предела длительной прочности.



Замедленное разрушение конструкционных материалов наступает, как правило, при комнатной температуре за время на несколько порядков большее чем при кратковременном испытании, при напряжении меньшем кратковременной прочности данного материала. **Особенностью замедленного разрушения** является то, что оно происходит в напряженной системе без подгрузки внешними силами во время развития процесса разрушения. **Характерным признаком замедленного разрушения является макрорупкий межзеренный излом детали (образца).**

Склонность к замедленному межзеренному разрушению проявляется обычно у **высокопрочных материалов** в деталях сложной формы или крупных размеров с нестабильной или **неоднородной структурой**, в жестких сварных соединениях **под воздействием внутренних растягивающих напряжений**. На рис. представлена временная зависимость прочности при испытании образцов на кручение **из стали 30ХН3А** в закаленном без отпуска состоянии. При осевом растяжении в стали такого состояния была обнаружена временная зависимость прочности только на образцах с кольцевым надрезом.

5.2. Испытания материалов на длительную прочность.

Определение предела длительной прочности.

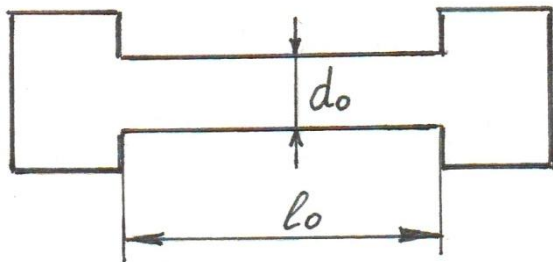
Длительной прочностью – называется сопротивление материала механическому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки при высокой температуре.

Различают **длительную прочность** при *растяжении, кручении и изгибе*, а также в сложнапряженном состоянии, например, *растяжение и изгиб, растяжение и кручение*.

Длительная прочность характеризуется **пределом длительной прочности**, который чаще всего определяют при растяжении. **Предел длительной прочности** характеризует способность материала противостоять разрушению при длительном воздействии **температуры и напряжения**. **Длительная прочность** большинства материалов **с повышением температуры снижается**; она зависит от химического состава, микроструктуры (размера зерна, формы, размера и характера распределения упрочняющих частиц), состояния поверхности образцов (снижение при увеличении шероховатости), окружающей среды.

Испытание на длительную прочность при температурах до 1200°C заключается в том, что образец доводится до разрушения под действием **постоянной растягивающей нагрузки** при **постоянной температуре**. Результатом испытания каждого из серии образцов являются **три характеристики**: **время до разрушения (долговечность)**, **относительное удлинение**, **относительное сужение**. В результате испытаний определяют **предел длительной прочности на базе испытаний 50...10.000 ч**.

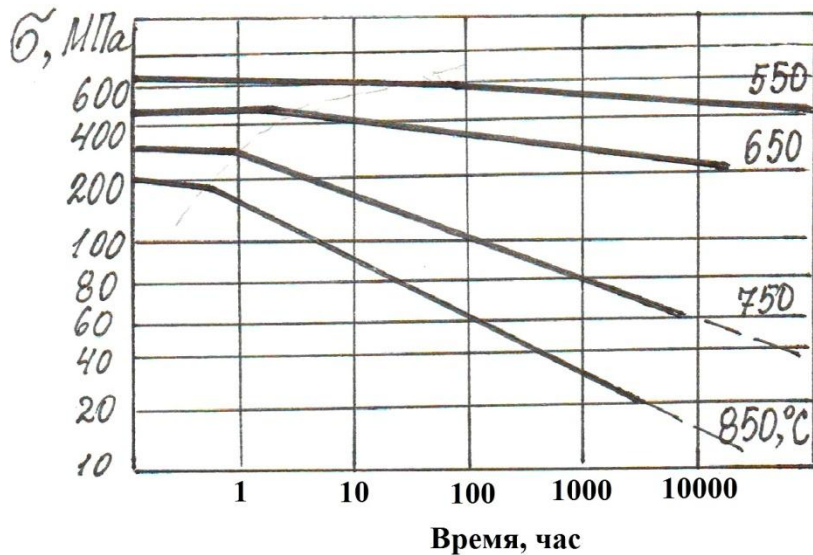
Пределом длительной прочности – называется **наибольшее напряжение, не вызывающее разрушение металла при определенной температуре за установленное время испытания (срок службы)**.



Для испытаний на длительную прочность (ГОСТ 10145 – 81) устанавливают цилиндрические образцы «пятикратные» и «десятикратные» диаметром (d_0) 5;10 мм с начальной расчетной длиной ($l_0=5;10 \cdot d_0$) 50;100 мм, соответственно; плоские образцы с начальной расчетной длиной $l_0 = 5,65 (F_0)^{1/2}$, где F_0 – начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца, мм^2 .

5.2. Испытания материалов на длительную прочность. Определение предела длительной прочности.

Машины для испытания металлов на длительную прочность, как и на ползучесть, должны обеспечивать **постоянство нагрузки** в течение всего процесса испытания, плавность нагружения и разгружения образца, надежное центрирование образца, возможность проведения испытаний в вакууме и воздушной среде **при температурах от 150 до 1200°C**. Специальные устройства задают **скорость деформирования** образца и запись диаграммы в координатах "**нагрузка – время**". Этим требованиям отвечают **машины АИМА-5-2, 1243ПРЛ-5/1200, 1242П-1/1800**.



Для определения **предела длительной прочности** необходимо провести испытание **до разрушения** нескольких (5...6) образцов при разных напряжениях. Основным результатом испытания каждого образца является **время до разрушения (t_p)** при заданном напряжении (σ). Связь между t_p и σ хорошо аппроксимируется уравнением: **$t_p = B \cdot \sigma^{-m}$** . В логарифмических координатах эта зависимость **прямолинейна** и, следовательно, дает возможность **экстраполировать** результаты на более длительное время (что сокращает время испытаний).

Иногда зависимость **$\lg \sigma - \lg t_p$** характеризуется **точкой перелома**. Она соответствует переходу от внутрикристаллитного или смешанного разрушения к полному межкристаллитному при низких температурах.

Предел длительной прочности обозначается σ с двумя числовыми индексами: **верхний** — температура испытаний, °C; **нижний** — заданная продолжительность испытания до разрушения, ч., например **σ^{750}_{1000}** — **предел длительной прочности (80 МПа)** на базе испытания 1000 ч при температуре 750°C.

5.4. Жаропрочность материалов. Явление ползучести.

Экспериментальная оценка предела ползучести.

По мере развития техники все большее число деталей машин и механизмов работают при **повышенных температурах**: лопатки турбин, обшивка фюзеляжа и крыльев самолетов, клапаны мощных двигателей, узлы атомных реакторов, паровые котлы.

Надежность их работы определяется жаропрочностью металлических материалов, из которых они изготовлены.

Жаропрочностью – называется комплекс свойств металлов, обеспечивающих их работоспособность под напряжением в условиях повышенных температур без заметной пластической деформации и разрушения.

При длительной работе металла при высоких температурах первостепенное значение приобретает явление ползучести металлов.

Ползучестью – называется свойство металлов медленно и непрерывно пластически деформироваться с течением времени при постоянном напряжении (нагрузке) и постоянной температуре.

Например, у сталей **ползучесть** наблюдается в интервале температур **350...400°С**. Она опасна тем, что может привести к недопустимым *остаточным изменениям расчетных размеров деталей*.

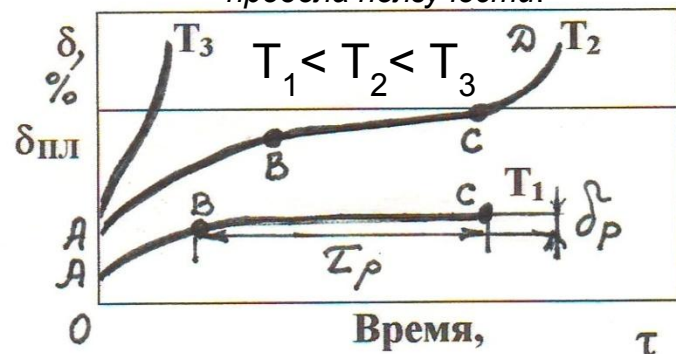
Например, между лопатками и корпусом паровой турбины должен быть очень небольшой зазор. Если вследствие ползучести хотя бы одна лопатка увеличится в размере настолько, что закроет этот зазор, то в связи с трением может произойти авария турбины.

Основным первичным результатом испытания на ползучесть при заданной температуре и постоянном напряжении $\tau > \tau_{кр}$, является **кривая ползучести в координатах относительная деформация – время**, которую строят по данным систематического измерения деформации (обычно относительного удлинения δ) образца в процессе испытания.

Основными стадиями ползучести являются:

- стадия нагружения;
- неустановившейся ползучести;
- установившейся (равномерной) ползучести ($V_p = \delta_p / \tau_p = \text{const}$);
- стадия разрушения.

Экспериментальная оценка
предела ползучести.



5.4. Жаропрочность материалов. Явление ползучести.

Экспериментальная оценка предела ползучести.

По основными стадиями ползучести оценивают сопротивление металла ползучести, определяют напряжения, вызывающие допустимую величину остаточной деформации детали за срок ее службы (см. табл.). (100000 ч. – 12 лет)

Назначение изделия	Допустимая степень деформации, $\epsilon, \%$, $[\delta]$	Срок службы, ресурс час, $[\tau]$	Допустимая скорость ползучести, $[V_p]$, $\% / \text{час}$
Детали моторов	0,1...1	50...1000	—
Трубы пароперегревателей	2,0	20.000	$1 \cdot 10^{-4}$
Паропроводы	0,3	100.000	$3 \cdot 10^{-6}$
Цилиндры паровых турбин	0,1	100.000	$1 \cdot 10^{-6}$

Величину **допустимой остаточной деформации** устанавливают в зависимости от условий эксплуатации оборудования и точности сохранения размеров деталей.

Испытания на ползучесть проводят на специальных **машинах**, в которых длительное время поддерживают постоянными нагрузку и температуру образца. Обычно эти машины с рычажным нагружением **усилием до 5000 кг**, что позволяет испытывать образцы до 10 мм. Температуру образца измеряют термопарой, и **постоянство температуры** поддерживают с помощью электронного потенциометра. Через определенные **промежутки времени** (например, через 2 или 4 часа) измеряют **деформацию** с помощью индикаторов с ценой деления 0,01...0,001 мм. **Длительность испытания** образца на ползучесть зависит от **срока службы детали или конструкции**:

- при **кратковременном сроке службы** деталей до 10.000 часов, база испытания образцов

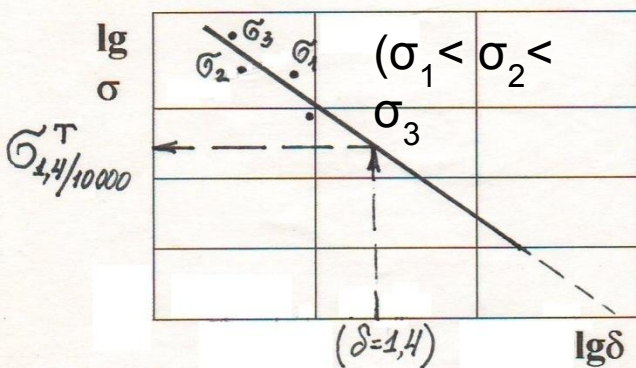
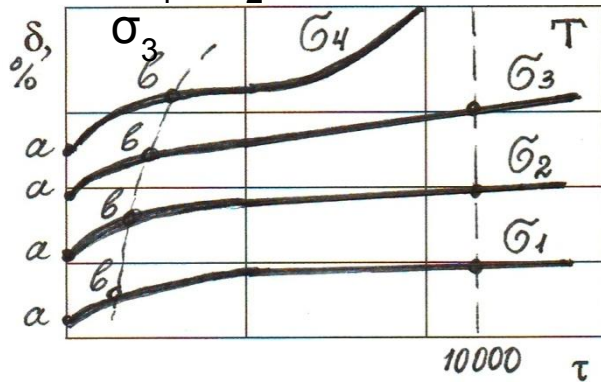
принимается **равной сроку службы** $t_{\text{исп.}} = 10.000 \text{ час.}$;

- при **длительном сроке службы** деталей **более 100.000 часов**, база испытания принимается $t_{\text{исп.}} = 10.000 \text{ час.}$;

5.4. Жаропрочность материалов. Явление ползучести. Экспериментальная оценка предела ползучести.

По результатам испытаний строят кривые ползучести в координатах **относительное удлинение – время**,

рис. ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$)



На кривой ползучести **определяют участок установившейся ползучести** и **скорость равномерной ползучести** на этом участке: $V_p = \delta_p / \tau_p$, % / час, где δ_p – относительная деформация на участке установившейся ползучести, τ_p – продолжительность этого участка. Чем выше **напряжение и температура**, тем интенсивнее ползучесть (больше скорость равномерной ползучести) и, следовательно, больше деформация детали за равный промежуток времени. При высоких напряжениях, обычно недопустимых в конструкциях, наблюдается **участок ускоренной ползучести, приводящий к разрушению**.

Критерием для оценки сопротивления металла ползучести служит так называемый **условный предел ползучести**.

Условным пределом ползучести – называется напряжение вызывающее заданную скорость ползучести или степень деформации детали за срок ее службы.

Например, $\sigma^{750}_{1,4/10000}$ – напряжение, вызывающее суммарную остаточную деформацию 1,4%, за 10000 часов при температуре 750°C.

Для определения предела ползучести при **заданной температуре** проводят испытания обычно **трех образцов** при разных напряжениях $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, строят **кривые ползучести** и определяют накопившуюся деформацию за **срок службы** – $\delta_1, \delta_2, \delta_3$. Построив график зависимости **напряжение – деформация** в логарифмических координатах (рис.), по **допускаемой деформации** $[\delta]$ **определяют величину условного предела ползучести** $\sigma_{[\delta]}$ **путем линейной экстраполяции.**

**Спасибо
за внимание**