

Лекция 4

Механические свойства материалов.

Содержание

1. Упругая деформация.
2. Пластическая деформация.
3. Возврат и рекристаллизация.

Введение

Механическими называют свойства, которые проявляются при действии на материал механической силы. Под действием внешней силы происходит изменение формы и размеров твердого тела. Эти изменения называют деформацией. Принято различать деформацию упругую и пластическую.

Под действием силы P в материале возникают внутренние силы, оказывающие сопротивление деформации. Мерой этих внутренних сил являются напряжения, которые подразделяют на нормальные σ и касательные τ .

$\sigma = P/F$ - условное нормальное напряжение,

$s = P/F_i$ - истинное нормальное напряжение.

$\varepsilon = \Delta l / l_0$ - относительная деформация.

$e = \ln l / l_0 = \ln(1 + \varepsilon)$ - истинная деформация (степень деформации).

Для изучения деформации твердых тел обычно прибегают к их испытаниям, состоящим в нагружении образцов стандартной формы. Различают испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение. Испытания могут быть статическими, динамическими, циклическими и могут происходить при различных температурах.

Испытательное оборудование Zwick/Roell



Техническая характеристика

- Максимальная нагрузка 100 кН
Нагружение осуществляется при помощи электромеханического привода высокой точности.
Замер деформаций может производиться по перемещению траверсы, контактными экстензометром или при помощи оптической системы измерения поверхностных деформаций Vic 3D.
- Машина укомплектована захватами на растяжение, сжатие, трехточечный изгиб, температурной камерой для испытаний в диапазоне температур от -80 до +200 °С, высокотемпературной трехзонной печью для испытаний в диапазоне температур от +100 до +1200 °С.
- Комплектация позволяет производить следующие виды лабораторных испытаний на прочность:
 - комнатная температура – растяжение, сжатие, трехточечный изгиб
 - температуры ниже нуля – растяжение, сжатие
 - температуры до +200 °С – растяжение, сжатие
 - температуры от +200 °С до +1200 °С – растяжениеПри этом может быть реализовано простое однократное нагружение, ступенчатое нагружение, малоцикловое нагружение без смены знака напряжения.

Образцы для испытаний на растяжение

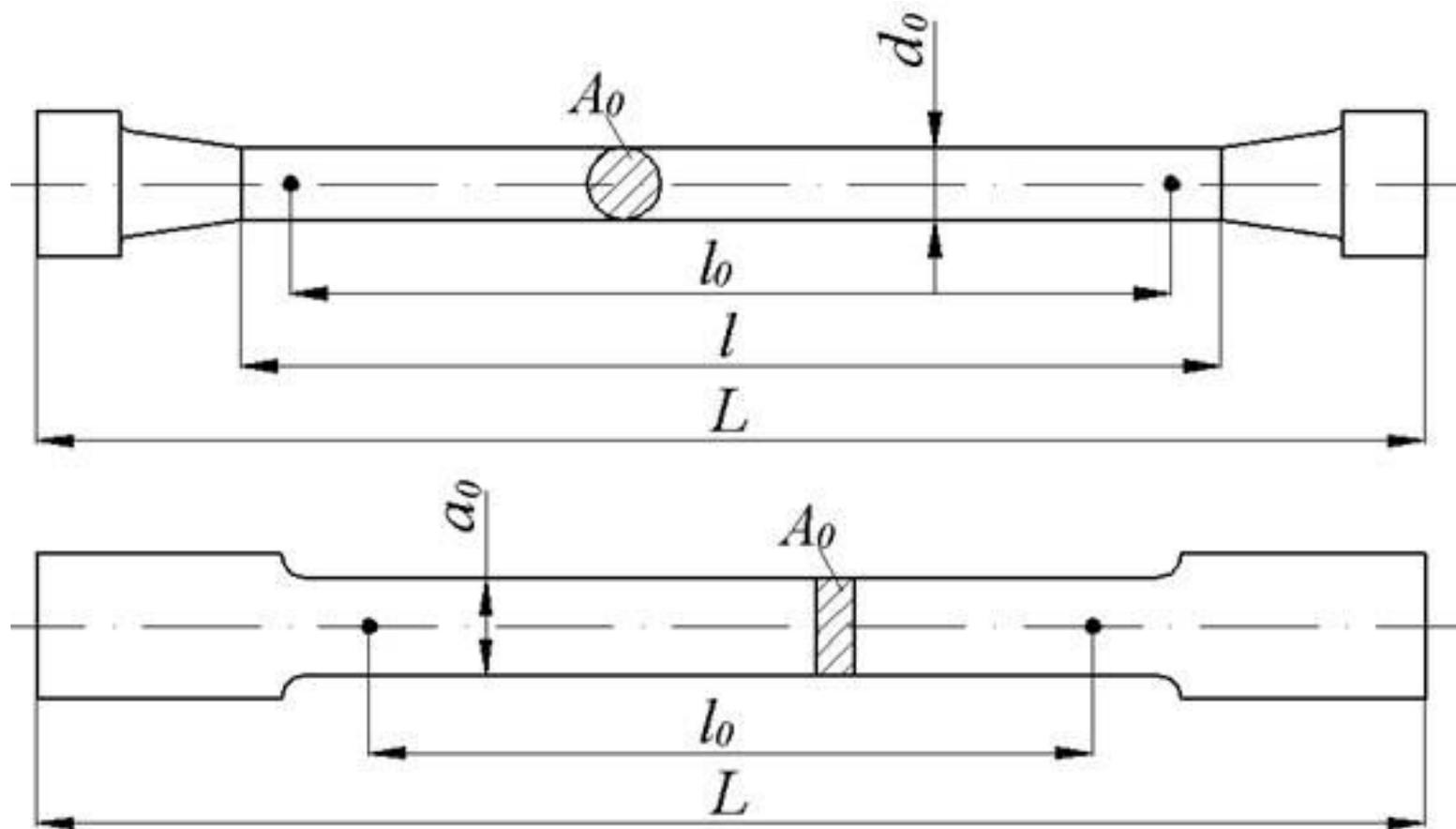


Диаграмма растяжения образца

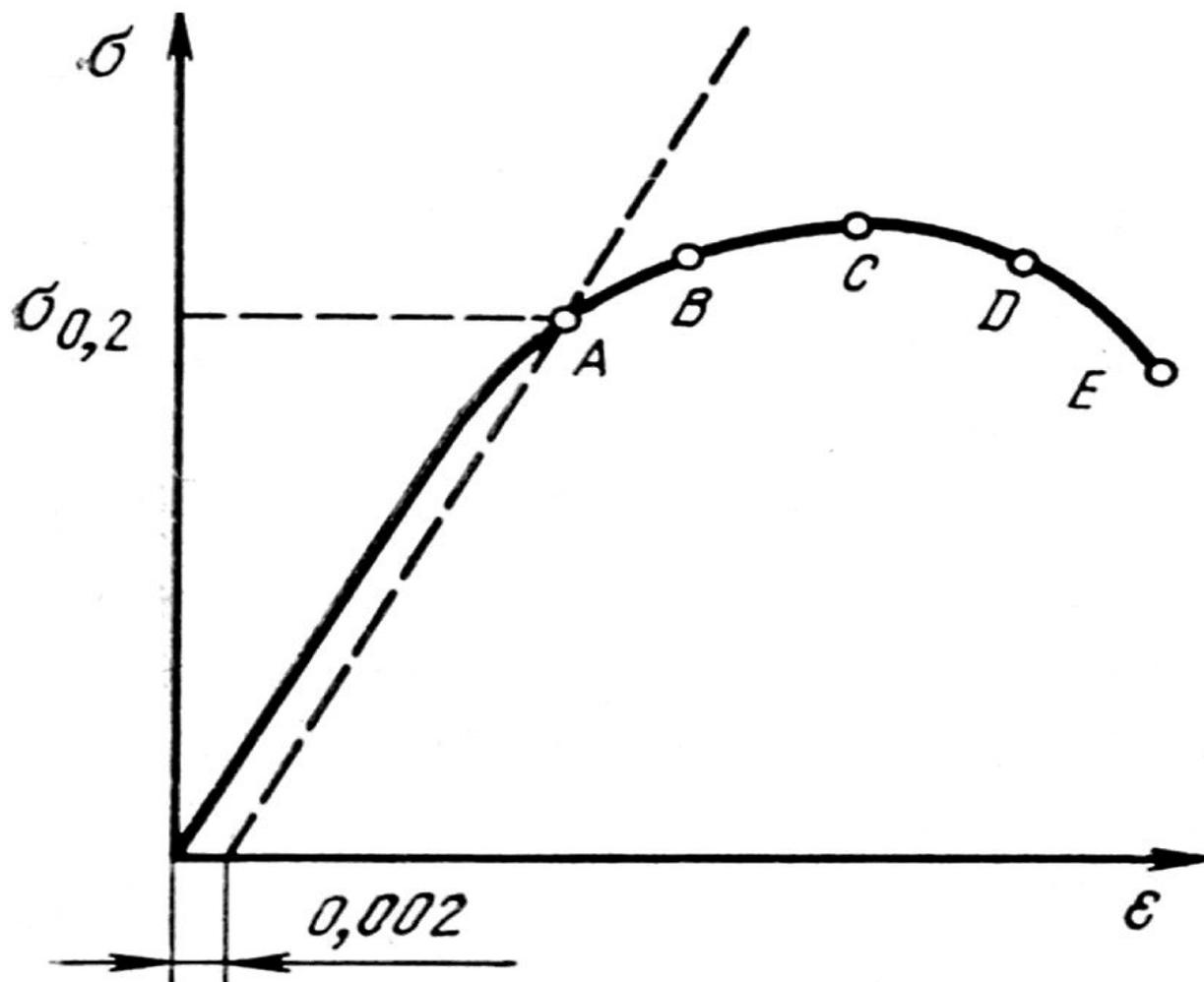
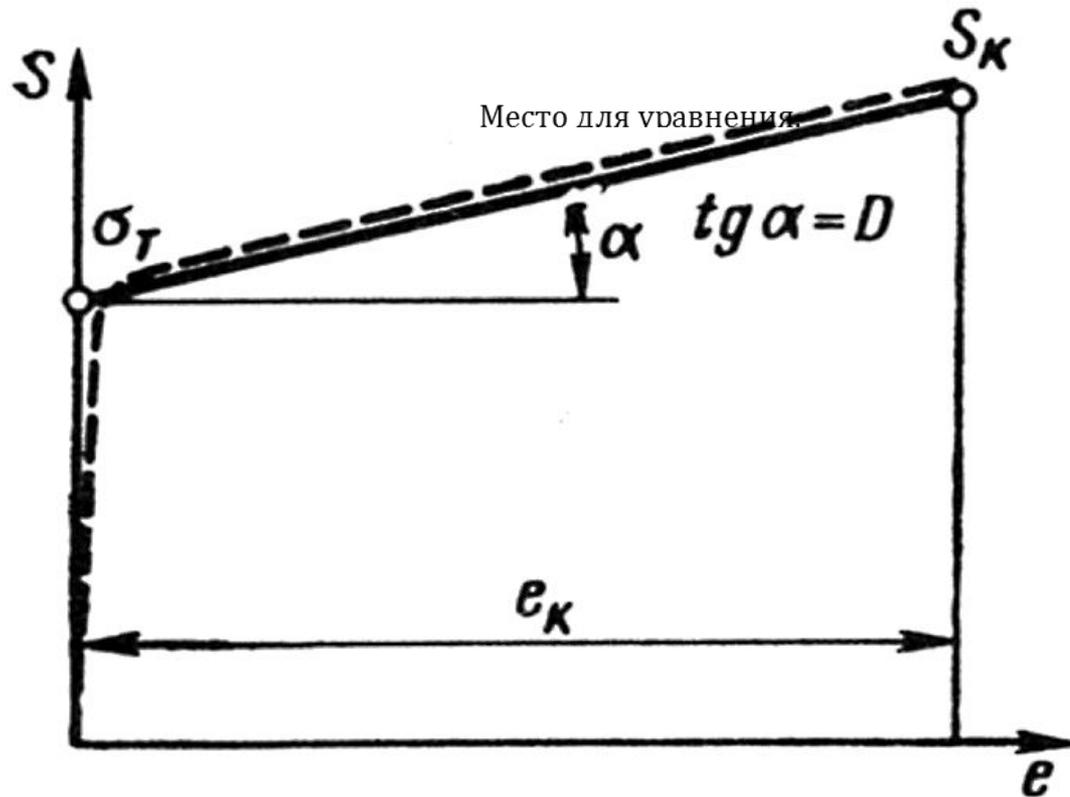


Диаграмма истинных напряжений



Упругая деформация

Упругая деформация описывается законом Гука: $\sigma = E\varepsilon$, где

E – модуль упругости (Юнга). Упругая деформация в одном направлении (ε_x) сопровождается изменением размеров в двух других ($\varepsilon_y, \varepsilon_z$). Отношение $\varepsilon_z / \varepsilon_x = \mu$ называется коэффициентом Пуассона (поперечного сжатия)

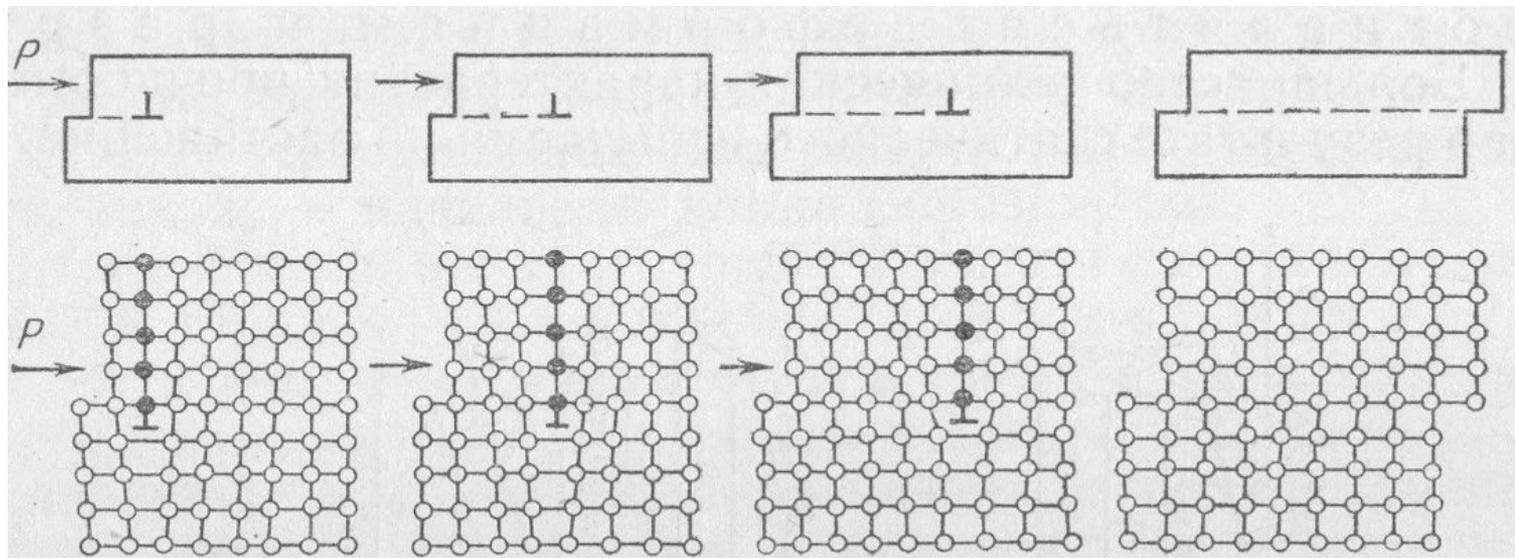
Под действием касательного напряжения возникает упругая деформация сдвига $\tau = G\gamma$. Модуль сдвига G и модуль упругости E связаны соотношением: $G = E / 2(1+\mu)$.

Следует иметь ввиду, что большинство твердых тел ведут себя упруго только при малых деформациях, не превышающих 0,001

	Материалы				
	Fe	Cu	Керамика	Полимеры	Композиты
E , ГПА	210	110	300-400	2 - 4	50 -200
$T_{пл}$, °C	1539	1083	2000-3000	-	-
μ	0,28	0,35	0,25	0,4	0,3

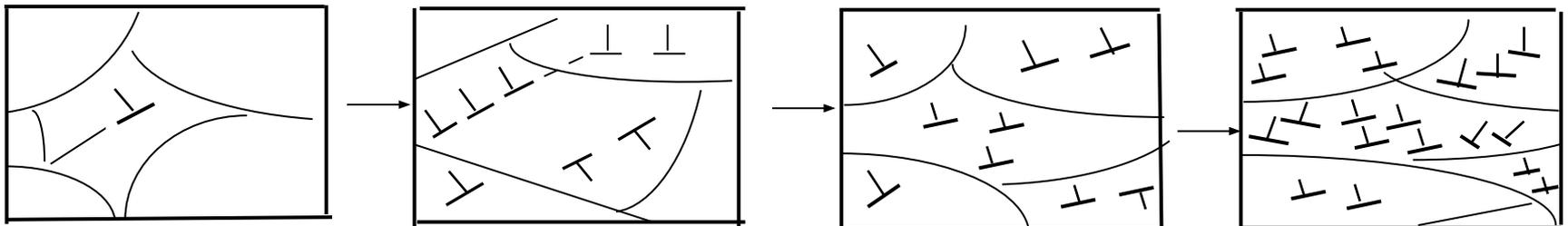
Пластическая деформация

В атомных масштабах пластическая деформация происходит путем скольжения или сдвига отдельных участков решетки по определенным плоскостям. Направление скольжения в кристалле представляет собой направление с наибольшей плотностью атомов, а плоскостями скольжения являются плоскости с наибольшим межплоскостным расстоянием.



Пластическая деформация поликристалла

Из-за разной ориентации зерен пластическая деформация в поликристаллическом твердом теле начинается неодновременно во всех зернах и развивается неоднородно. Величина деформации $\epsilon = b\rho$, b -вектор Бюргерса, d -длина свободного пробега, ρ -плотность дислокаций. Для продолжения деформации необходимо увеличивать плотность дислокаций за счет их размножения. Однако увеличение плотности дислокаций и образование их скоплений приводит к увеличению напряжения сдвига: $\Delta\tau = Gbr$. Таким образом прочность возрастает с увеличением деформации. Это явление называют деформационным упрочнением, которое описывается следующим эмпирическим соотношением, $\sigma = k\epsilon^n$, где n – показатель деформационного упрочнения.



Устойчивость пластической деформации

При деформации растяжением образца образуется шейка, что свидетельствует о потере устойчивости пластической деформации.

На участке деформационного упрочнения диаграммы растяжения:

$$dP = \sigma dF + F d\sigma,$$

Образование шейки начинается при $dP = 0$, тогда $d\sigma/\sigma = -dF/F$.

Так как $d\varepsilon = d\ell/\ell = -dF/F$, то $d\varepsilon = d\sigma/\sigma$, $\sigma = d\sigma/d\varepsilon$.

Аппроксимируем участок деформационного упрочнения: $\sigma = k\varepsilon^n$

тогда $k\varepsilon^n = kn\varepsilon^{n-1}$ откуда $\varepsilon = n$.

Пластическая деформация при растяжении образца в момент потери устойчивости (образование шейки) численно равна показателю деформационного упрочнения. Если скорость деформационного упрочнения $d\sigma/d\varepsilon$ недостаточна для поддержания устойчивого деформирования, то шейка начинает развиваться все быстрее, вплоть до разрушения образца.

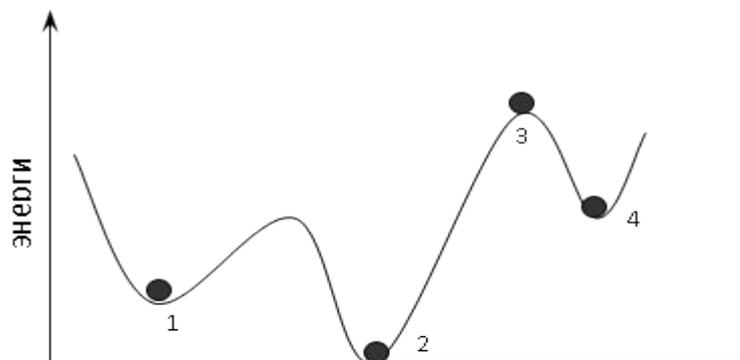
Величина показателя n составляет 0,1 – 0,5 и зависит от структуры материала.

Влияние температуры на структуру и механические свойства металлов

- Деформированный металл находится в неравновесном состоянии. Переход к равновесному состоянию связан с уменьшением искажений в кристаллической решетке, снятием напряжений, что определяется возможностью перемещения атомов.
- При повышении температуры металла в процессе нагрева после пластической деформации диффузия атомов увеличивается и начинают действовать процессы разупрочнения, приводящие металл в более равновесное состояние – возврат и рекристаллизация.

Возврат и рекристаллизация

При пластической деформации металлов плотность дефектов сильно возрастает. Так общая энергия дислокаций в кубическом метре металла составляет около 2 МДж, что эквивалентно 15 Дж/моль. Поэтому состояние деформированного (наклепанного) металла термодинамически нестабильно. На рисунке представлена модель для отображения различных видов равновесия : 1, 4 – метастабильное, 2 – стабильное (устойчивое) и 3 – нестабильное (лабильное) равновесие. Необходимую тепловую энергию для удаления и перераспределения структурных дефектов (вакансий, дислокаций, границ), возникающих при пластической деформации называют энергией активации соответствующего процесса Q . Для точечных дефектов значение Q минимально и много меньше, чем для удаления дислокаций и миграции границ.



Возврат и рекристаллизация

При нагреве деформированных металлов можно выделить три процесса: возврат, полигонизация и рекристаллизация.

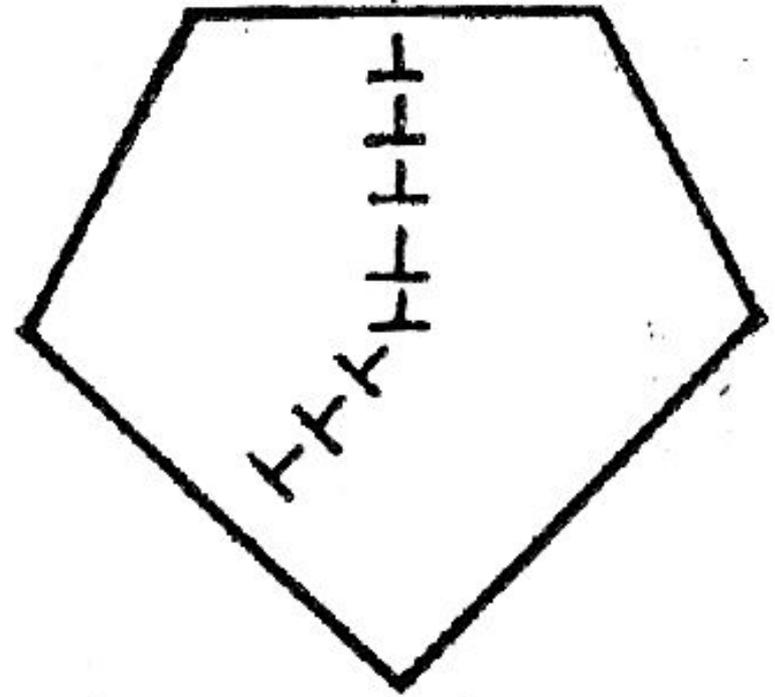
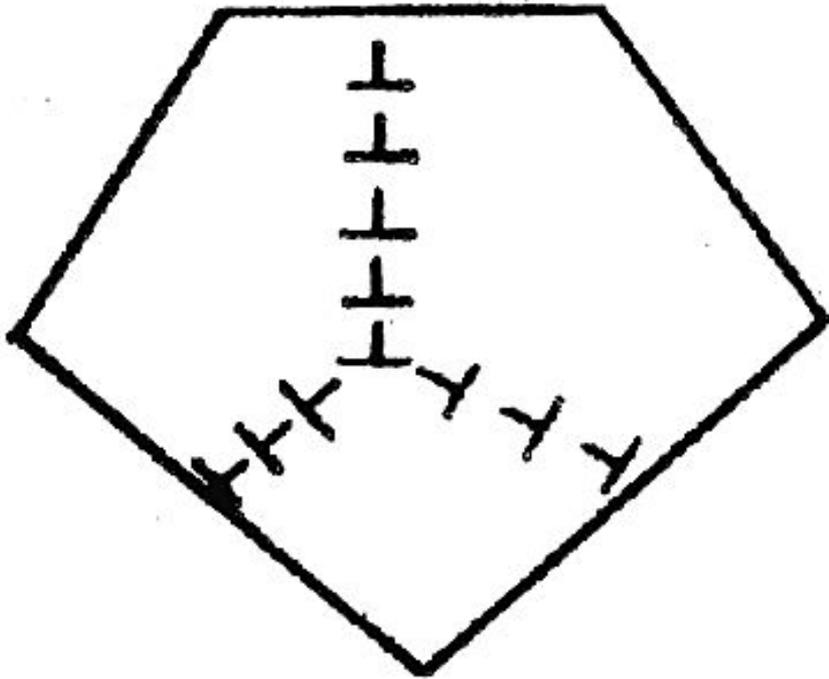
1. **Возврат** - это низкотемпературная стадия перераспределения точечных дефектов. Основными механизмами, идущими при возврате, являются аннигиляция точечных дефектов и образование их скоплений (кластеров) с образованием дефектов упаковки. ($T_v = (0,1 - 0,2) T_{пл}$, $Q \sim 0,5$ эВ).

2. **Полигонизация** – это процесс движения и перераспределения дислокаций, сопровождающийся их аннигиляцией и образованием дислокациями малоугловых границ. ($T_p = (0,2 - 0,25) T_{пл}$, $Q \sim 1,2$ эВ).

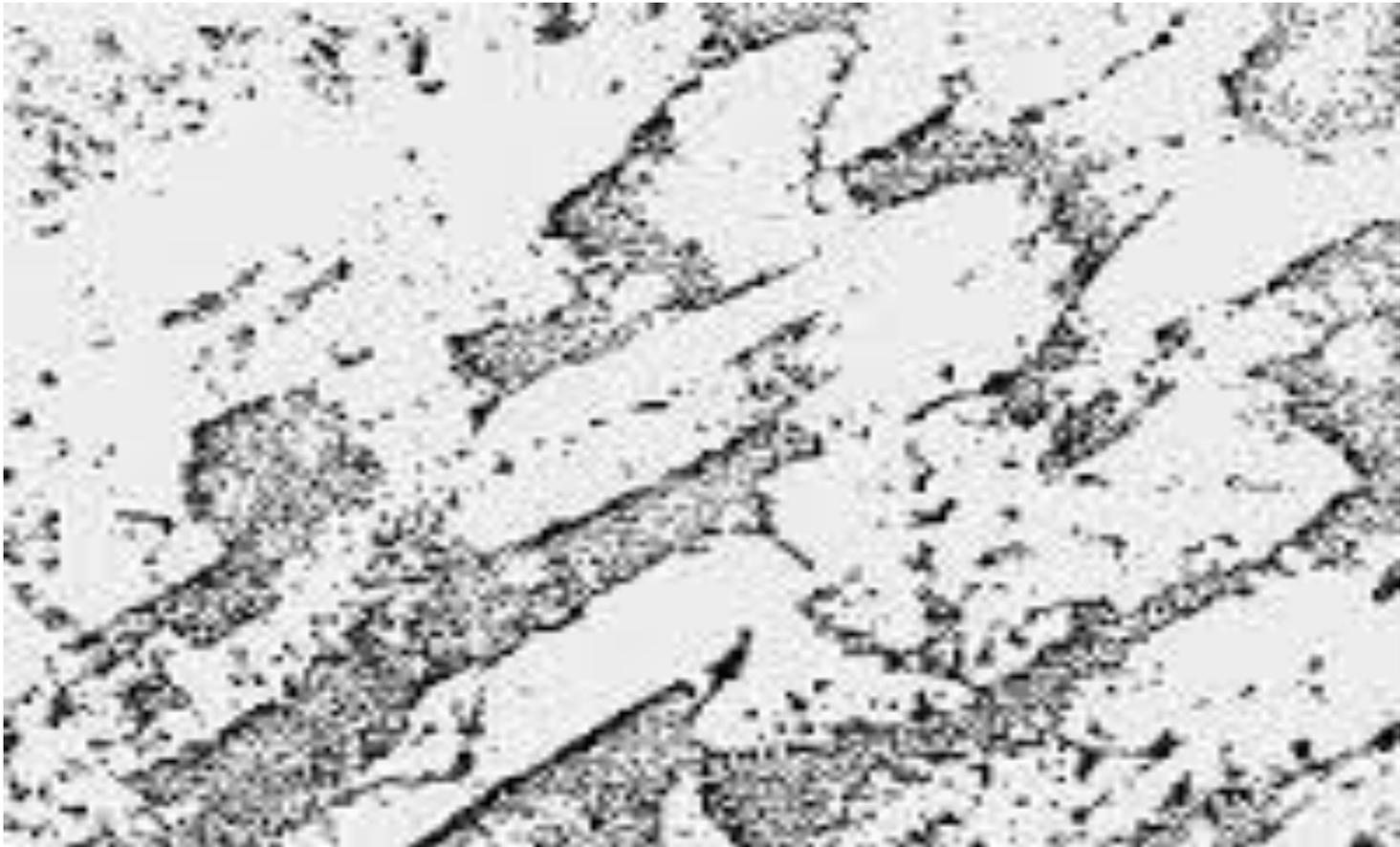
3. **Рекристаллизация** – это процесс зарождения и рост новых свободных от деформации зерен, постепенно охватывающий весь объем. ($T_R > 0,4 T_{пл}$, $Q \sim 0,02$ Дж/моль).

Полигонизация

Малюугловые границы

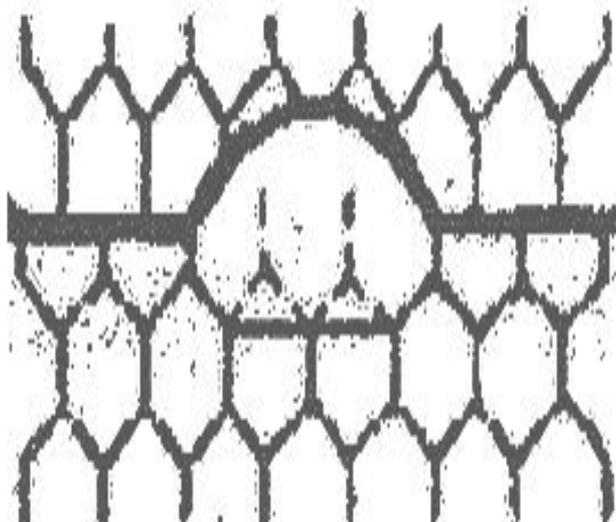
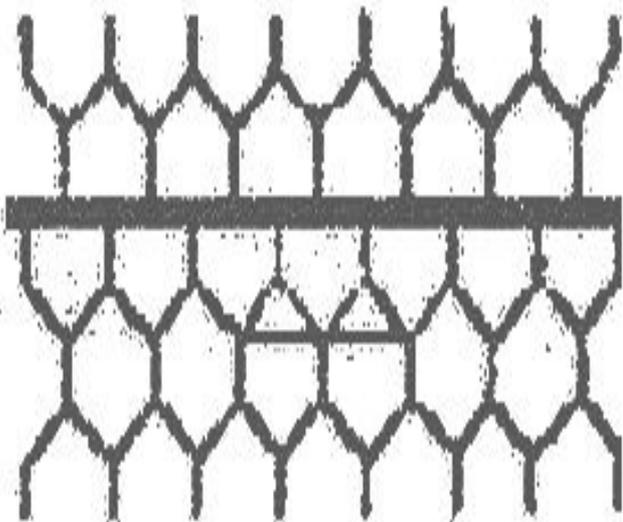


Структура стали после полигонизации



Рекристаллизация

Образование зародыша рекристаллизации



Микроструктура железа после пластической деформации и рекристаллизации

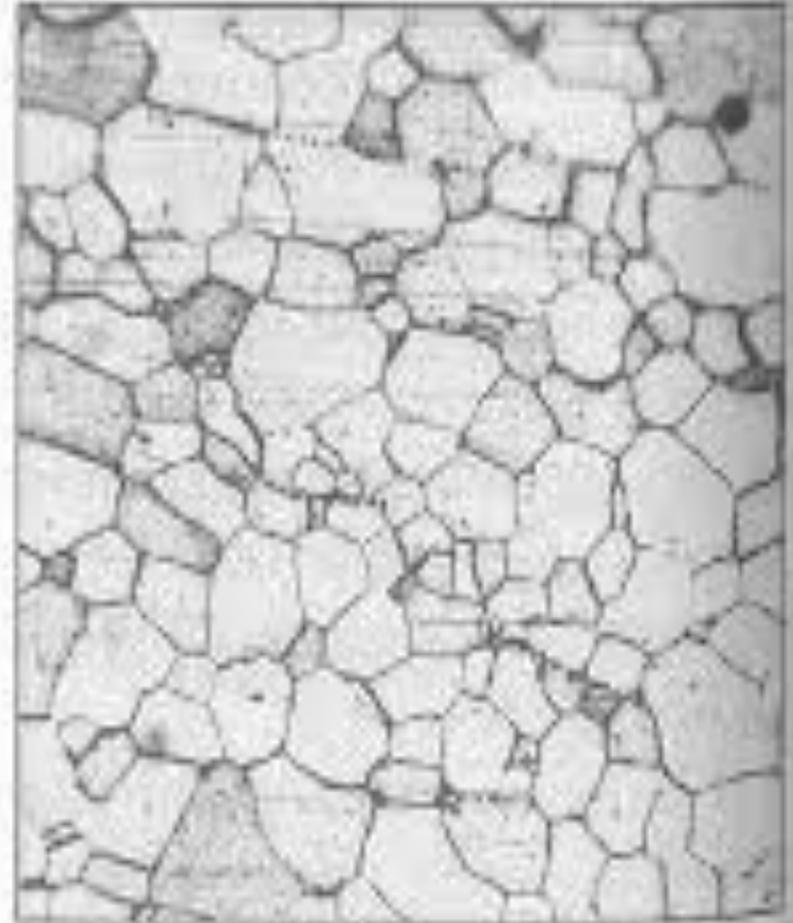
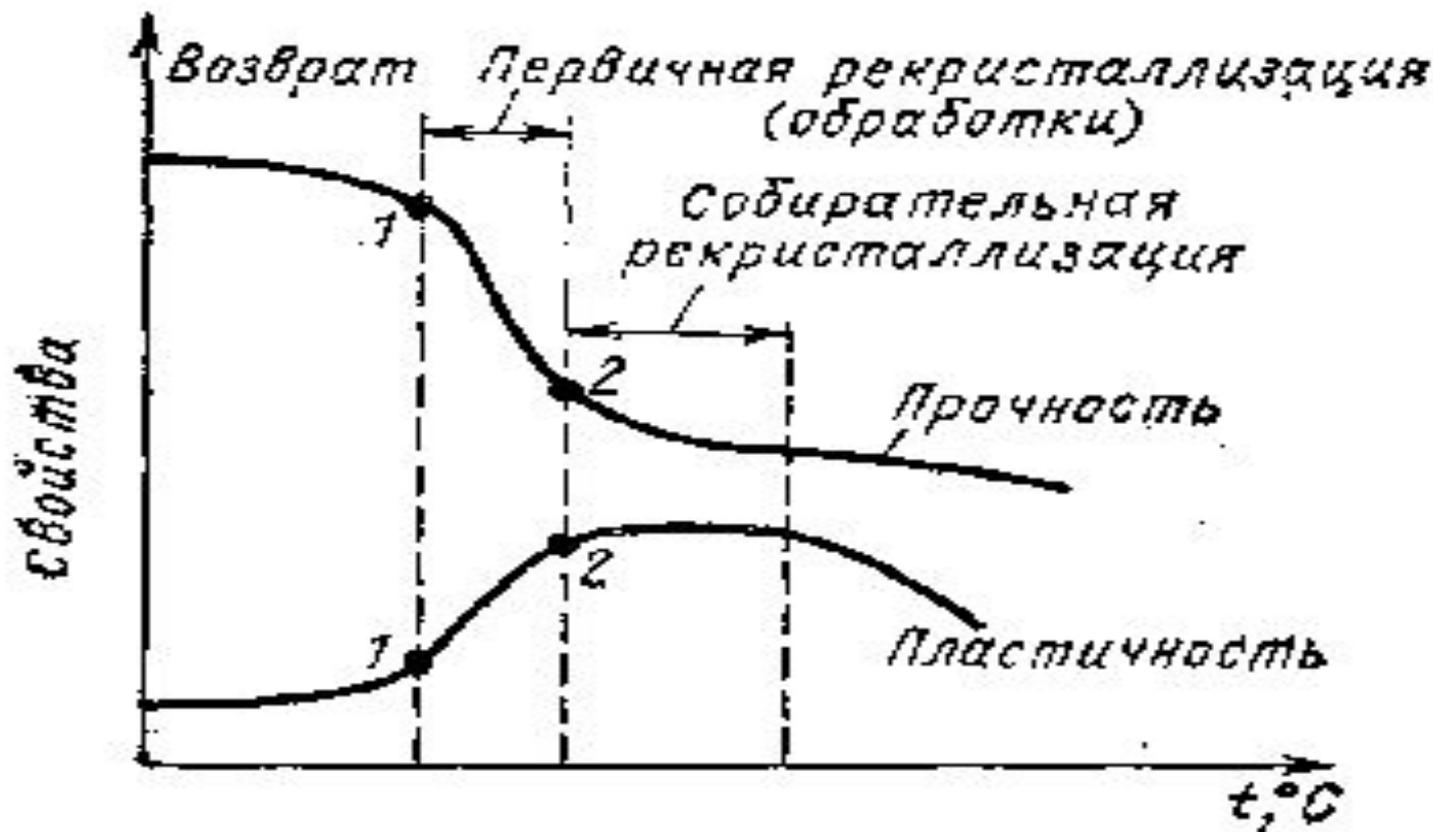


Схема зависимости свойств металла от температуры нагрева после холодной пластической деформации



Горячая пластическая деформация.

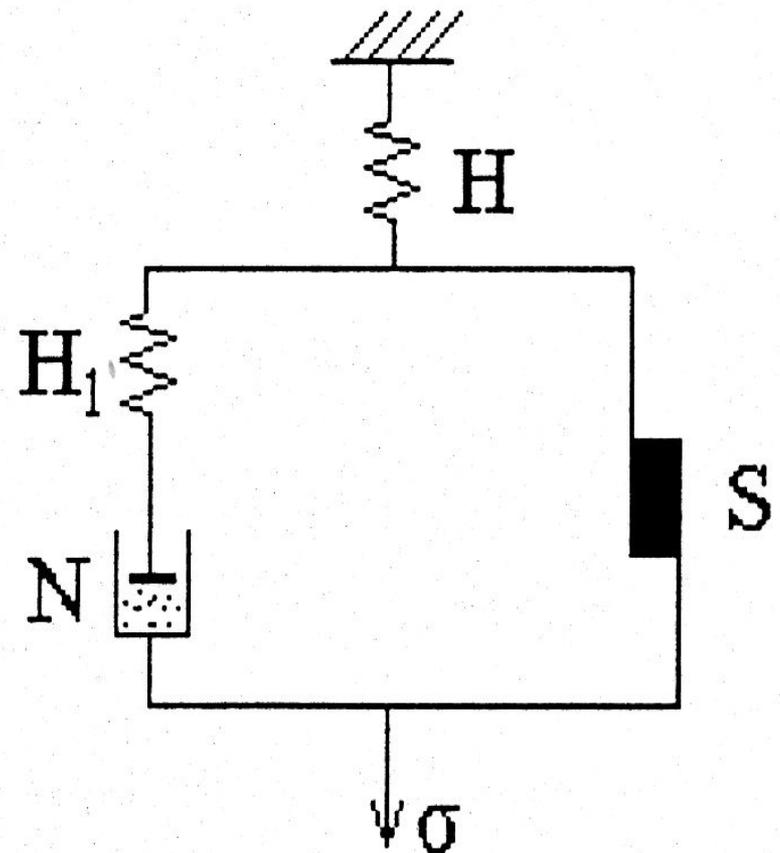
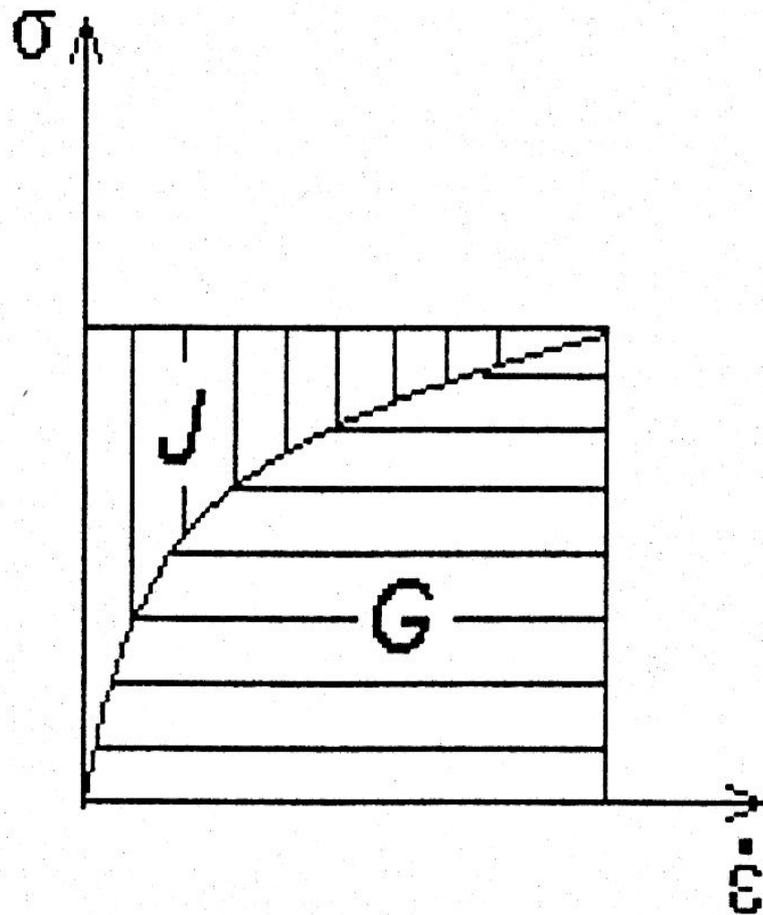
Важнейшим отличием деформации при повышенных температурах ($> 0,5T_{пл}$) является то, что с повышением температуры, во-первых, снижается модуль упругости из-за увеличения межатомного расстояния, а во-вторых, в отличие от холодной, при горячей деформации в металле имеют место два конкурирующих процесса – упрочнение и интенсивное разупрочнение. Упрочнение вызывается увеличением плотности дислокаций под влиянием в основном внешних сил. Процессы разупрочнения заключаются в уменьшении плотности дислокаций, а также в их перераспределении с образованием более стабильных конфигураций, например, границ. Основными процессами разупрочнения при горячей деформации являются динамическая полигонизация и динамическая рекристаллизация. Оба процесса приводят к рассеянию (диссипации) накопленной (латентной) энергии.

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m$$

$$P = G + J = \int \sigma d\dot{\epsilon} + \int \dot{\epsilon} d\sigma$$

Реологическая модель материала при горячей деформации

$$\sigma = H - [S | (H - N)]$$



Коэффициент эффективности диссипации
энергии.

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = \int \sigma d\dot{\epsilon} + \int \dot{\epsilon} d\sigma = G + J$$

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m$$

$$J = \sigma \dot{\epsilon} m / m + 1$$

$$J_{\max} = \sigma \dot{\epsilon} / 2 \quad \text{при } m = 1.$$

$$\eta = J / J_{\max}$$

$$\eta = 2m / m + 1$$

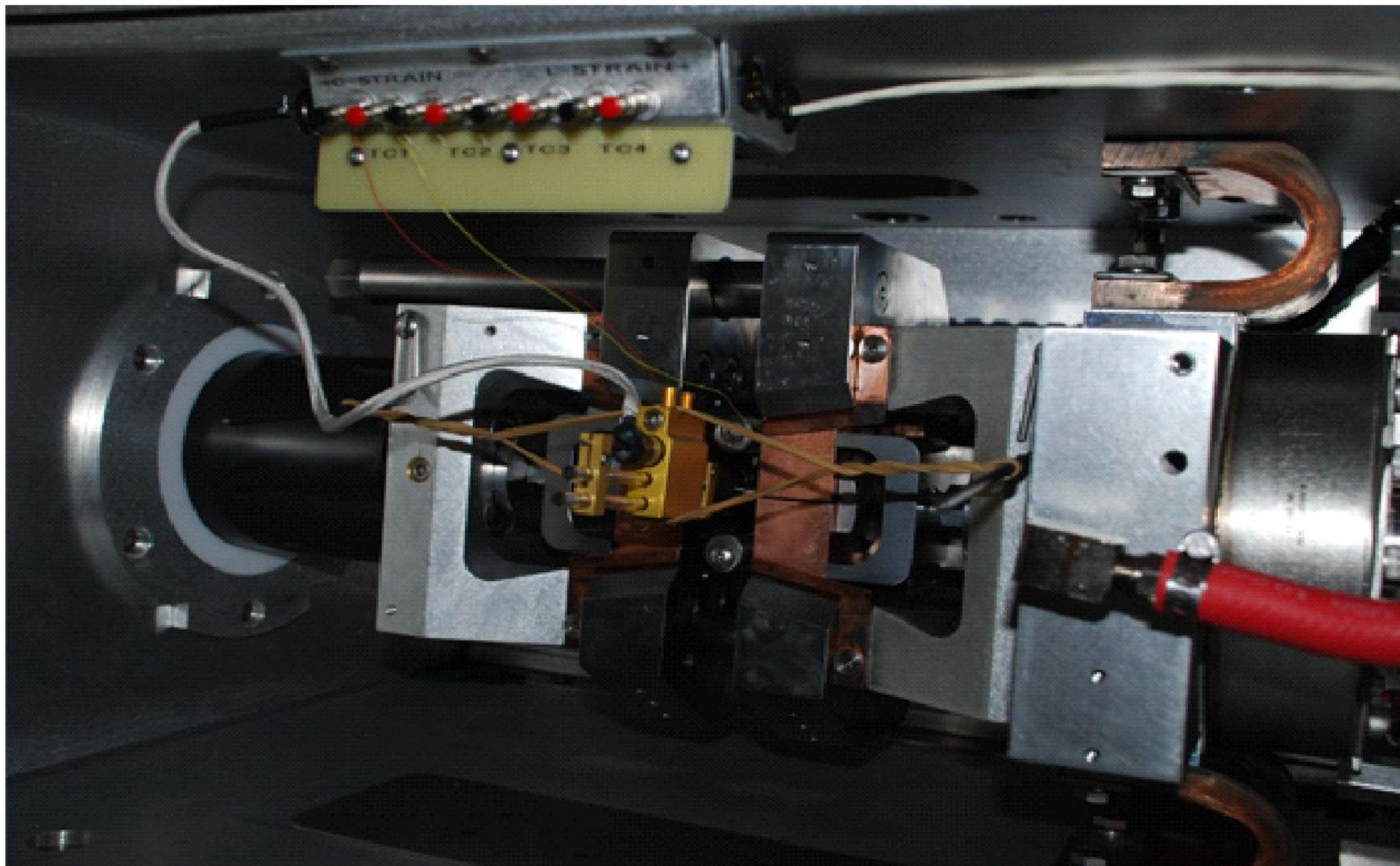
Испытательный комплекс Gleeble-3800



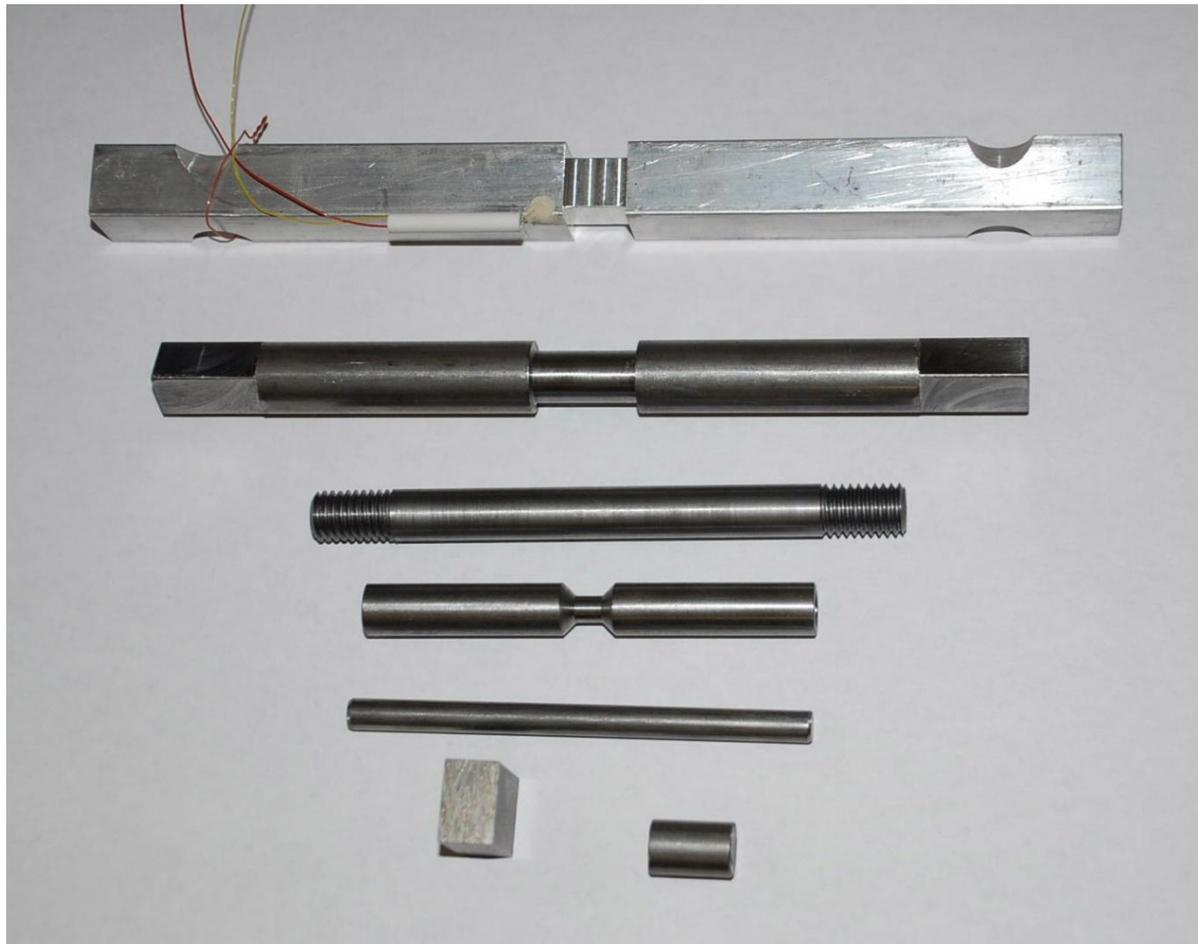
Возможности Gleeble-3800

- Испытания металлов в вакууме, воздухе, инертном газе.
- Способ испытания: растяжение-сжатие, кручение, 2-D ковка.
- Способ нагрева образцов: пропусканием электрического тока.
- Температура испытаний: 20 - 2000°C.
- Охлаждение образцов: обдув газом, водой.
- Достигнутая скорость нагрева: 13500 °C/с.
- Достигнутая скорость охлаждения: 9500 °C/с.
- Максимальная скорость деформирования: 2,5 м/с.
- Программное управление операциями нагрева, деформации и охлаждения.

Рабочая камера модуля Rocket Jaw.

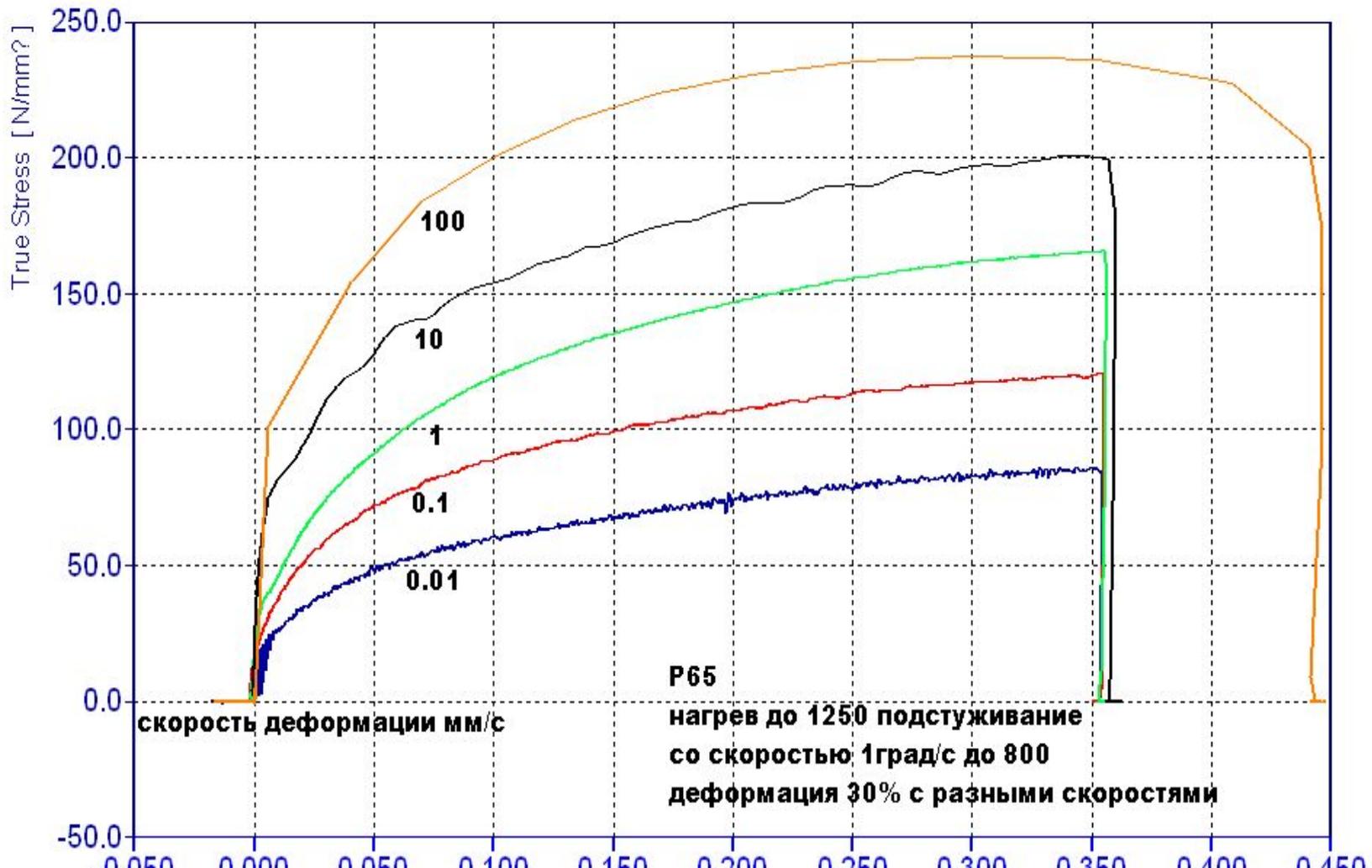


Типы образцов для испытаний



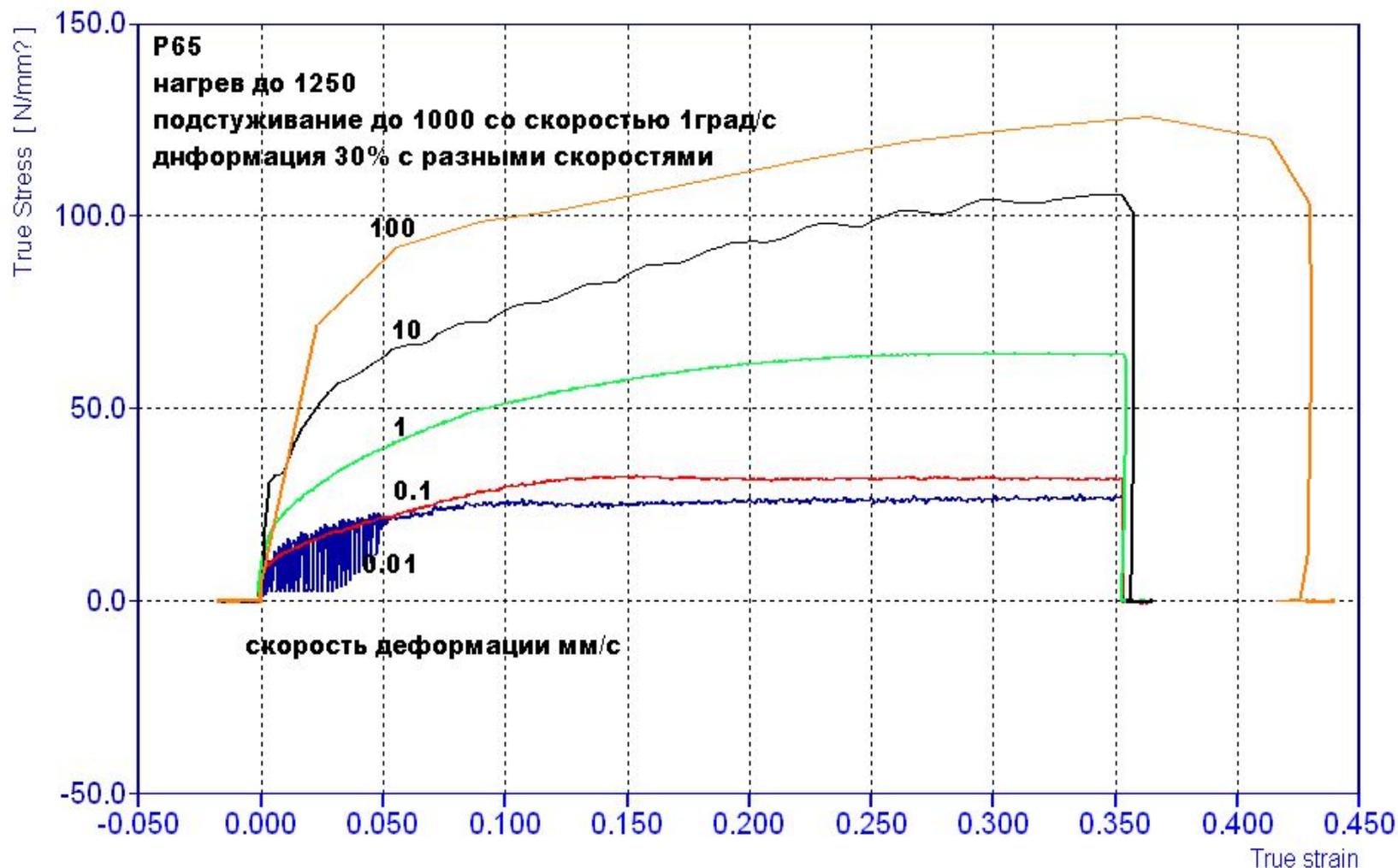
Влияние температуры на механические свойства

- Температура испытания на сжатие 800°C

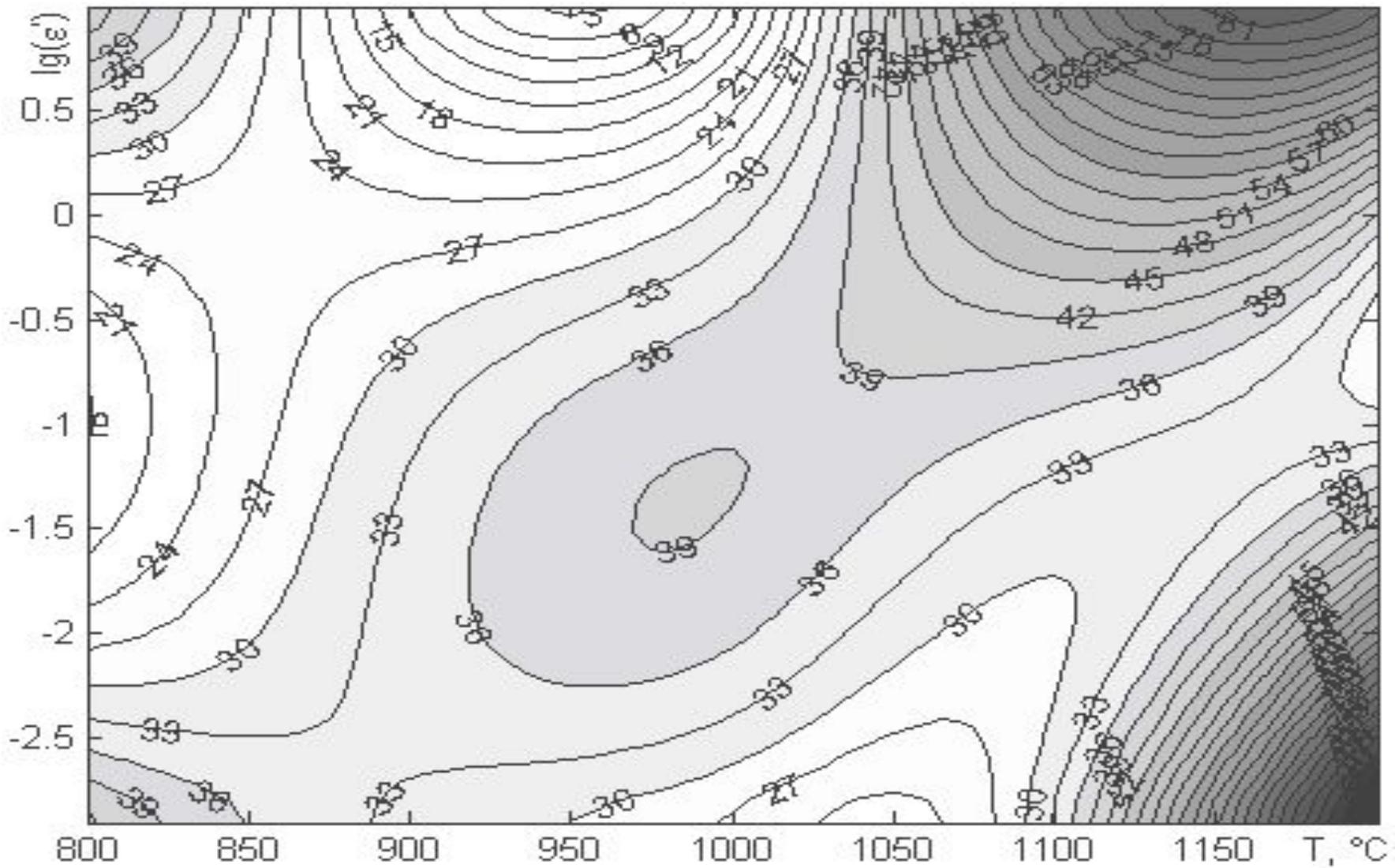


Влияние температуры на сопротивление деформации

- Температура испытания на сжатие 1000 °С



Карта эффективности диссипации энергии ($\epsilon=0,3$).



Выводы

1. На основании экспериментальных данных имитационного моделирования могут быть построены карты эффективности диссипации энергии, которые отражают процессы происходящие при различных температурно-скоростных условиях деформирования.

2 Каждая из областей на карте эффективности диссипации энергии представляет микроструктурный механизм, который вносит свой вклад в диссипацию энергии:

$\eta < 20\%$ – неустойчивое структурное состояние;

$\eta = 20 - 30\%$ – динамическая полигонизация;

$\eta = 30 - 50\%$ – динамическая рекристаллизация;

$\eta > 50\%$ – сверхпластическая деформация.

3. Можно считать надежно установленным, что наибольшая величина коэффициента эффективности диссипации соответствует достижению однородного распределения стабильного зерна.

Ползучесть кристаллических материалов

При комнатной температуре деформация кристаллических материалов зависит только от напряжения:

$$\varepsilon = f(\sigma).$$

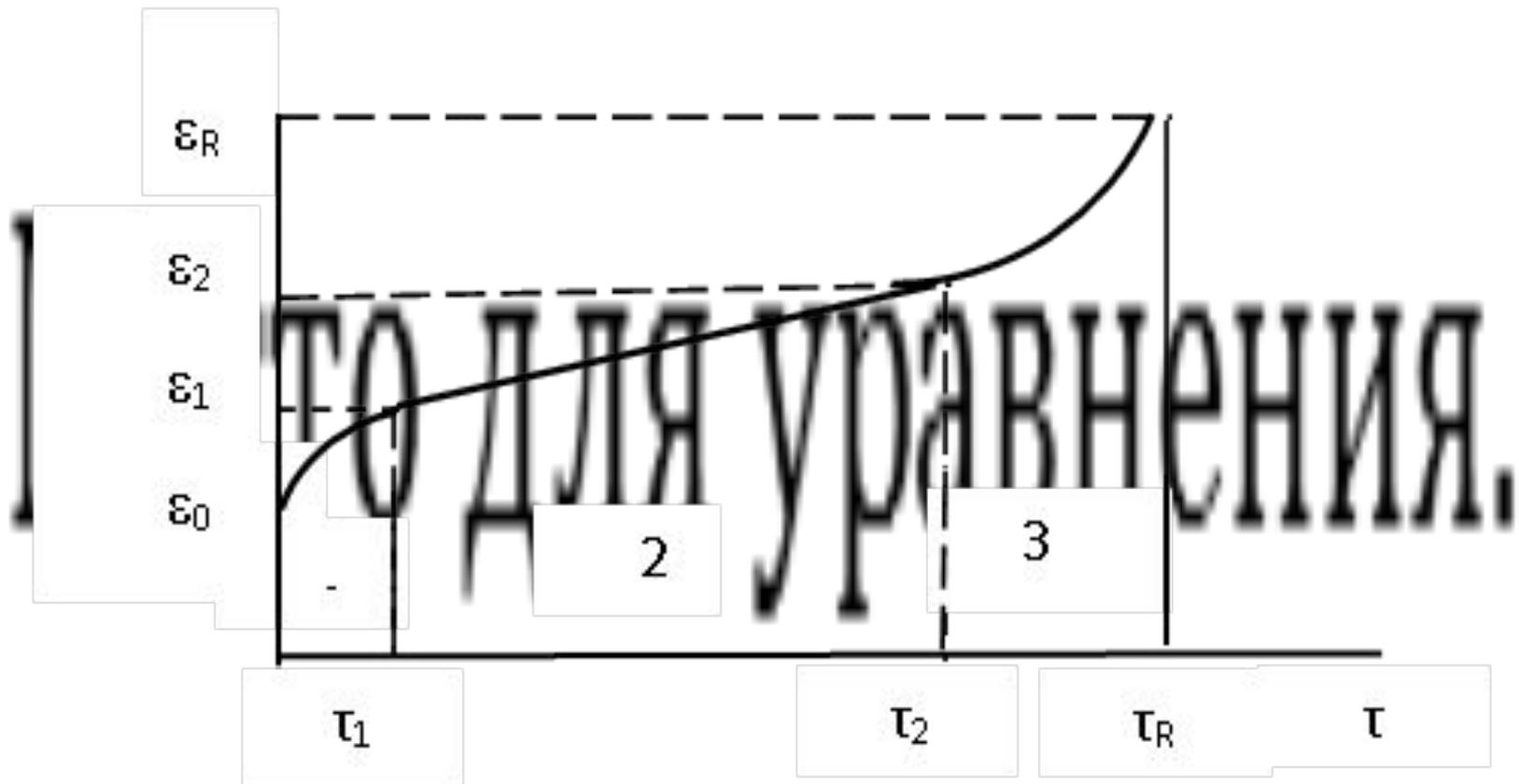
При повышенной температуре напряжение вызывает ползучесть материала, которая представляет собой медленное удлинение под нагрузкой. Деформация в этом случае зависит также от температуры и времени:

$$\varepsilon = f(\sigma, t, T).$$

Испытания на ползучесть требуют тщательного контроля температуры. Обычно образец подвергают растягивающей или сжимающей нагрузке в печи при постоянной температуре. Удлинение образца измеряют в зависимости от времени. По результатам испытания строят кривую ползучести.

Диаграмма ползучести.

-



Скорость и механизмы ползучести.

$$d\varepsilon/dt = C \sigma^n e^{-Q/RT}$$

Где Q – энергия активации ползучести, R – газовая постоянная.

1. Переползание дислокациями препятствий.

Преодоление препятствий (атомов примесей, частиц выделений) дислокациями при участии вакансий.

2. Диффузионная ползучесть. Удлинение зерен за счет диффузии атомов от продольных границ к поперечным.

3. Зернограничное проскальзывание. Происходит потому, что прочность границ при высокой температуре становится меньше прочности зерен.

4. Образование пор. Поры возникают в начале третьей стадии, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения образца, увеличению напряжения и скорости ползучести.