

**№1**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. С.АМАНЖОЛОВА  
Кафедра физики

Слайд-лекции по дисциплине

# «МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ»

для специальности: 050710 - «Материаловедение и технология  
новых материалов»

Курс 2

форма обучения: очная

Разработал: ст. преподаватель  
Ерболатулы Досым

Усть-Каменогорск, 2007

## №2 Цель курса:

Обеспечение студентов знаниями, умениями и навыками, предусмотренной учебной программой.

## Задачи курса:

- Изучение теоретических и практических вопросов об основных конструкционных материалах, классификации их по механическим свойствам; деформационных процессах в монокристаллах и поликристаллах;
- Изучение основных механических свойств материалов и методов их определения;
- Освоение правил работы на приборах и методик проведения механических испытаний материалов;
- Овладение достаточными знаниями для правильного выбора материала, методов его упрочнения при одновременном достижении наиболее высокой технико-экономической эффективности.

# №3 1.Календарно-тематический план и график прохождения форм контроля

Темы	Формы проведения занятий					Литература (№№)	Формы контроля	Макси м. балл	Срок сдач и
	Лек ции	Пра кт.	Лаб ор.	СРС П	СРС				
Классификация механических свойств материалов. Деформация монокристаллов и поликристаллов. Упругие свойства. Закон Гука. Коэффициенты упругости.	2	1		4	4	1,2, 3,4, 5, 17	Дом.задание	4	1
Пластическая деформация материалов. Теоретическая и реальная прочность материалов.	1	1		4	4	1, 3, 4, 6	Дом.задание	6	4
Прочностные свойства материалов при растяжении. Предел пропорциональности. Предел упругости. Предел текучести. Предел прочности. Определение истинных деформирующих напряжений. Пластичность металлов и сплавов.	2	2	4	5	5	1,2, 3,4,5,7,8, 9	Тестировани е	4	6
Разрушение материала.	1	1		4	4	1, 5, 6, 18, 19	Реш. задач	4	7
Сверхпластичность. Условия проявления и механизмы сверхпластической деформации. Методы исследования сверхпластичности материалов.	2	2	5	6	6	10, 11, 12, 13	Тестировани е	4	9
Явление ползучести материалов. Испытание материалов на ползучесть. Испытания на длительную прочность.	2	2		4	4	1,2, 9, 11	Реферат	4	11
Твердость и микротвердость.	2	2	2	6	6	1, 2, 14	Дом.задание	4	13
Усталостные свойства материалов при циклическом нагружении. Методика проведения усталостных испытаний.	1	2	2	4	4	1, 2, 15	Реш.задач	4	15
Испытания материалов на износ и трение.	1	1		4	4	2,	Реферат	4	16
Динамические испытания. Испытания на ударную вязкость. Работа маятникового копра.	1	1	2	4	4	1,2,9	Дом.задание	4	17
<b>ВСЕГО:</b>	15	15	15	45	45			60	

# **№4** Классификация механических испытаний

По характеру действующих нагрузок:

- 1 Статические (растяжение, сжатие, изгиб, кручение)
- 2 Динамические (растяжение, изгиб, удар)
- 3 Циклические-усталостные (изгиб, растяжение-сжатие, кручение)

Две специфические испытания:

1. Испытание на твердость (микротвердость);
2. Испытание на ползучесть, длительную прочность и сверхпластичность

### *1. Испытания на растяжение*

Испытания на одноосное растяжение — наиболее распространенный вид испытаний для оценки механических свойств металлов и сплавов. Оно легко подвергается анализу, позволяет по результатам одного опыта определять сразу несколько важных механических характеристик. Методы испытания на растяжение стандартизованы, при комнатной температуре (ГОСТ 1497—61), при повышенных — до 1473°К (ГОСТ 9651—61) и пониженных — от 273 до 173°К (ГОСТ 11150—65) температурах.

## Образцы для испытаний на растяжение

Для испытаний на растяжение используют образцы с рабочей частью в виде цилиндра (цилиндрические образцы) или стержня с прямоугольным сечением (плоские образцы).

Между размерами образца должны существовать определенные соотношения. В частности, рабочая длина у плоских образцов при толщине более 3 мм от  $l_0 + 1.5F_0$  до  $l_0 + 2.5F_0$ , при толщине менее 3 мм  $l_0 + 1.5b_0$  до  $l_0 + 2b_0$ . Расчетная длина  $l_0 = 5.65F_0$  («короткие» образцы) или  $l_0 = 11.3F_0$  («длинные» образцы). Литые образцы и образцы из хрупких материалов допускается изготавливать с  $l_0 = 2.82F_0$ . Абсолютные размеры образцов могут меняться в широких пределах. Из плоских наибольшее распространение получили образцы с конфигурацией, показанной на рис.2 для которого о указаны основные размеры.

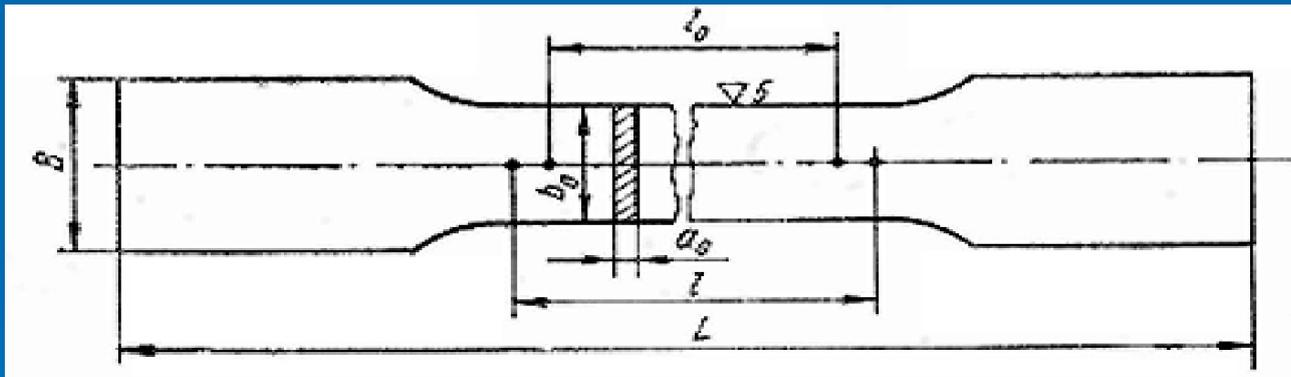


Рис. 1 - Эскиз стандартных плоских образцов, для испытаний при комнатной температуре

## **№6** *Машины для испытаний на растяжение*

Основные узлы любой испытательной машин:

- приводное устройство, обеспечивающее плавное деформирование образца;
- силоизмерительный механизм для измерения силы сопротивления образца создаваемой деформации.

В последнее время в испытательных машинах основными стали электротензометрические силоизмерители. Основными элементами силоизмерителя являются упругий элемент и тензодатчик, который представляет собой тензочувствительную проволоку, уложенную на бумажную подкладку. Тензодатчик наклеивают на упругий элемент, к которому крепится неподвижный захват машины.

Все силоизмерительные механизмы позволяют не только визуально фиксировать силу сопротивления образца, но и записывать кривую изменения этой силы в зависимости от величины деформации (абсолютного удлинения) образца.

## Испытательная машина типа «Поляни»:

На рис. 2 показана схема испытательной машины типа «Поляни» на одноосное статическое растяжение плоских образцов. В этой машине активный захват (2) через рабочий цилиндр (23) связан с грузовым винтом (22), находящемся в зацеплении с гайкой (4). Движение от электродвигателя (5) передается через пятиступенчатый редуктор (6) к системе передач гайке (4), которая, вращаясь, перемещает винт с захватом, растягивая при этом образец (1). Двигатель (5) связан с пером самописца. Перо перемещается и записывает диаграмму растяжения. Электродвигатель (14) служит для быстрого поднятия или спуска винта на установку захватов (2,3) с образцом (1).

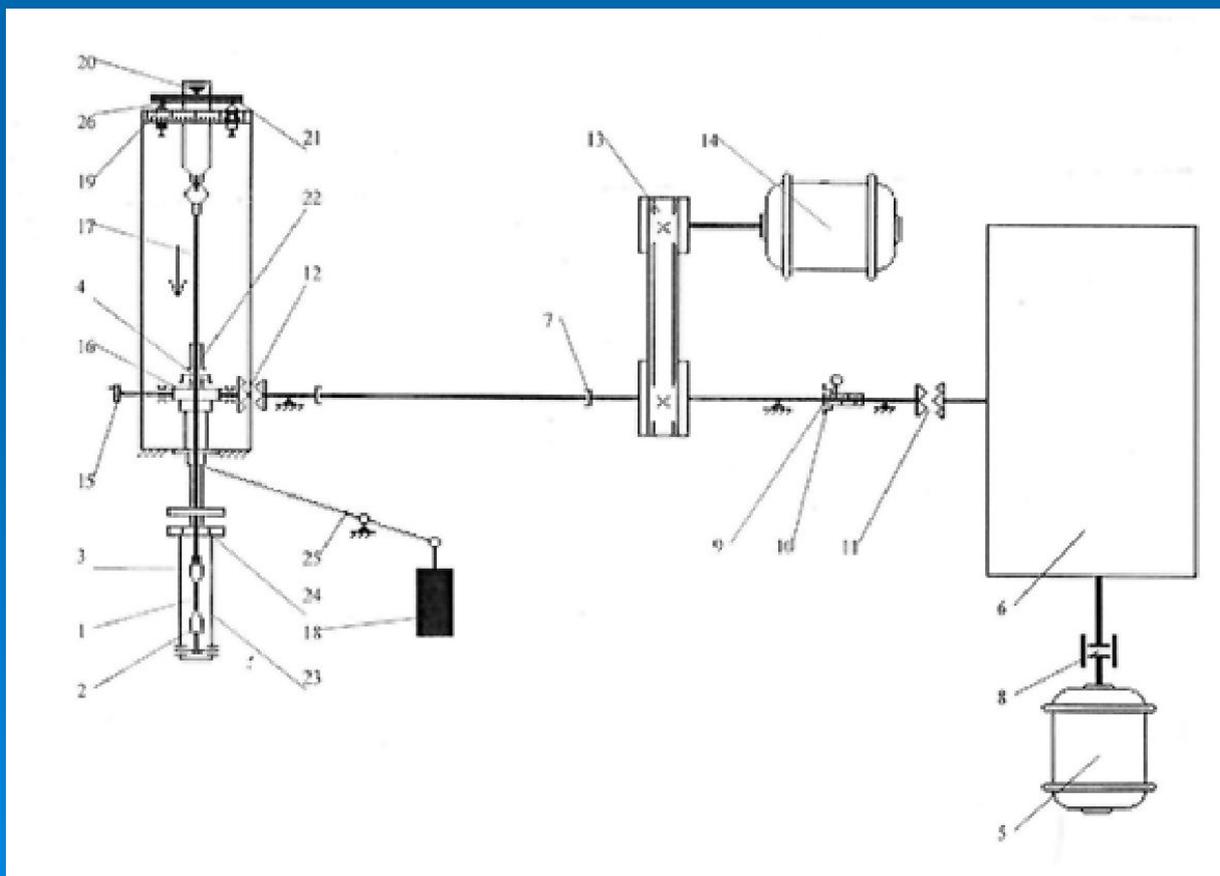


Рис.2 Схема машины типа «ПОЛЯНИ»

## Подготовка образцов для испытаний на растяжение

1. С помощью резака по металлу вырезать пластинки заготовок
2. Вставить несколько заготовок в шаблон и тщательно закрепить болты.
3. Шаблон с заготовками закрепить в тисках.
4. С помощью напильника и надфилей выточить образцы.
5. Отшлифовать края образцов с помощью наждачной бумаги
6. На головках образцов проставить номера и занести номера в отчет с указанием направления резки
7. С готовых образцов необходимо снять размеры и занести их в отчет, каждый размер следует измерять несколько раз:
8. Ограничить начальную расчетную длины образца  $l_0$  в пределах рабочей длины неглубокими кернами или рисками с точностью до 1% от величины  $l_0$ .

# Деформация образца при статическом растяжении

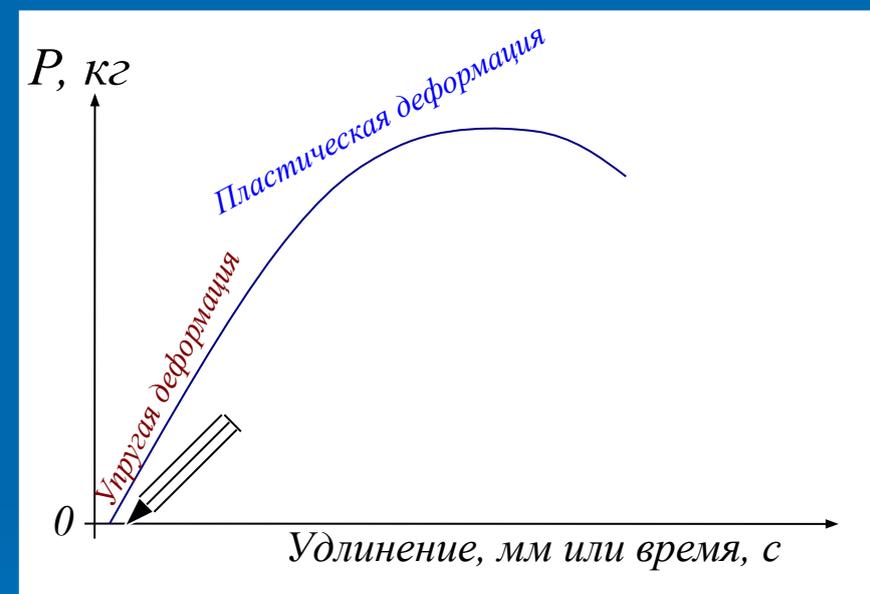
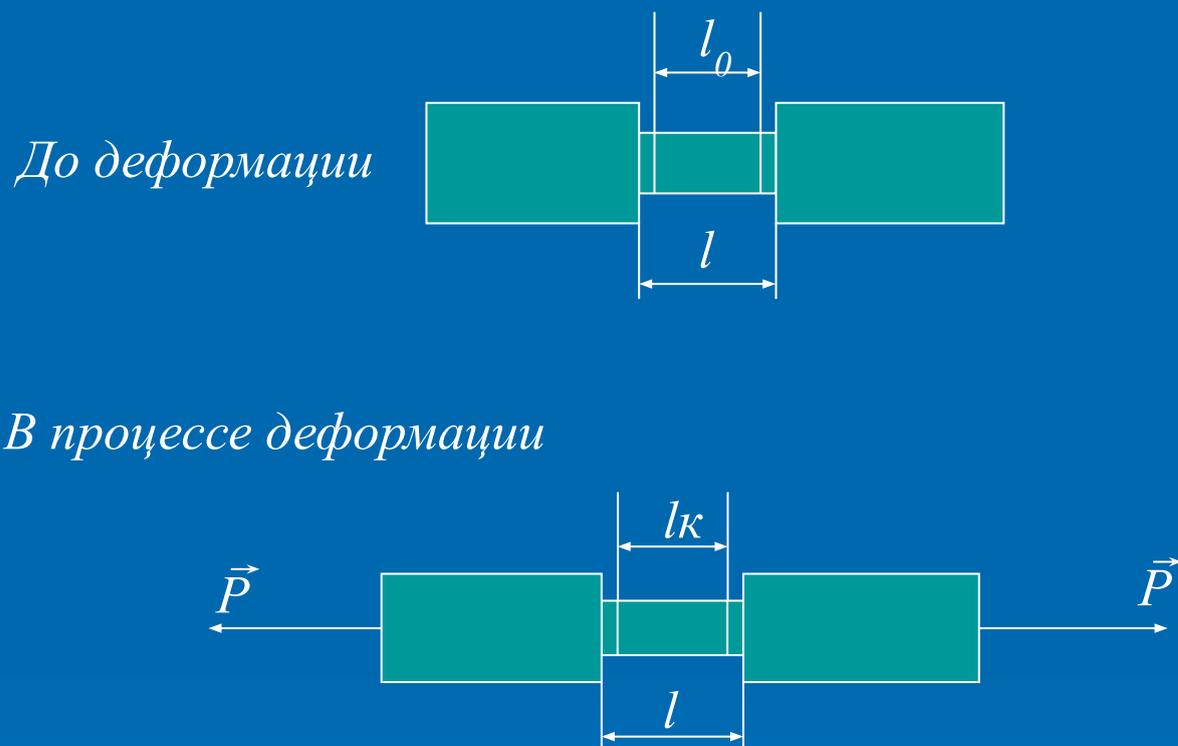


Диаграмма растяжения

При статистических испытаниях на растяжение образец деформируется при плавно возрастающей нагрузке вплоть до разрыва. При этом на диаграммном приборе автоматически вычерчивается кривая, показывающая зависимость между силой, действующей на образец, и вызываемой его деформацией.



## №10

Предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$ . Первая характерная точка на диаграмме растяжения – точка  $p$ , усилие  $R_{пц}$  определяют величину *предела пропорциональности - напряжения, которые материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука..* Приблизительно величину  $R_{пц}$  можно определить по точке, где начинается расхождение кривой растяжения и продолжения прямолинейного участка.

При достаточно большом масштабе первичной диаграммы растяжения величину предела пропорциональности можно определить графически прямо на этой диаграмме. В первую очередь продолжают прямолинейный участок до пересечения с осью деформаций в точке  $O$ , которую и принимают за новое начало координат, исключая искаженный из-за недостаточной жесткости машины начальный участок диаграммы.

Предел упругости  $\sigma_{0,05}$ . Следующая характерная точка на первичной диаграмме растяжения – точка  $e$ . Ей отвечает нагрузка, по которой рассчитывают условный *предел упругости — напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,05%, иногда меньше - вплоть до 0,005%.*

Предел упругости характеризует напряжение, при котором появляются первые признаки макропластической деформации. В связи с малым допуском по остаточному удлинению даже трудно с достаточной точностью определить по первичной диаграмме растяжения. Поэтому в тех случаях, когда высокой точности не требуется, предел упругости принимается равным пределу пропорциональности.

Предел текучести  $\sigma_{0,2}$ . При отсутствии на диаграмме растяжения зуба и площадки текучести рассчитывают *условный предел текучести* напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины обычно 0,2%.

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$$

Предел текучести характеризует напряжение, при котором происходит более полный переход к пластической деформации. Напряжение, необходимое для начала пластической деформации, оцениваемое через условный предел текучести, определяется силами сопротивления движению дислокаций внутри зерен, легкостью передачи деформации через их границы и размером зерен. Эти же факторы определяют и величину *физического предела текучести* - напряжения, при котором образец деформируется под действием практически неизменной растягивающейся нагрузки. Предел текучести определяют по явно выраженной остановке стрелки силоизмерительного устройства испытательной машины, обусловленной деформацией образца без заметного увеличения нагрузки

Предел прочности  $\sigma_B$ . После прохождения точки s на диаграмме растяжения в образце развивается интенсивная пластическая деформация. До точки b рабочая часть образца сохраняет первоначальную форму. Удлинение здесь равномерно распределяется по расчетной длине. В точке b эта макроравномерность пластической деформации нарушается. В какой-то част образца, обычно вблизи концентратора напряжений, который был уже в исходном состоянии или образовался при растяжении (чаще всего в середине расчетной длины), начинается локализация деформации. Ей соответствует местное сужение поперечного сечения образца - образование шейки. Шейка развивается от точки b вплоть до разрушения в точке k, одновременно снижается действующее на образец усилие. По максимальной нагрузке  $P_b$  на первичной диаграмме растяжения рассчитывают временное сопротивление.

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}$$

$\sigma_B$  - условное напряжение, характеризующее сопротивление равномерной максимальной деформации.

Относительное удлинение при разрыве образцов определяли по изменению расстояния между контрольными метками с использованием выражения

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

где  $l_K$  - расчетная длина образца после испытания.

### Методика вычисления погрешности определения $\sigma_{0,2}$

1. Находим: среднее арифметическое величин  $\langle \sigma_{0,2} \rangle$  для 3-6 значений
2. Абсолютную ошибку:  $\Delta \sigma_{0,2i} = \langle \sigma_{0,2} \rangle - \sigma_{0,2i}$
3. Абсолютную ошибку квадратов отклонения  $(\Delta \sigma_{0,2i})^2$
4. Среднеквадратичную ошибку среднего арифметического  $S_n$
5. Доверительную вероятность  $\alpha$
6. Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n}$ ,  $n$  по таблице.
7. Доверительный интервал  $\sigma_{0,2} = t_{\alpha, n} S_n$
8. Относительную ошибку:  $(\Delta \sigma_{0,2} / \langle \sigma_{0,2} \rangle) \cdot 100\%$
9. Аналогично рассчитываем погрешности для других величин.

# Общая характеристика и признаки сверхпластичности материалов

В 40-е годы XX века в работах академика А.А. Бочвара было открыто явление СП двухфазных цинк-алюминиевых сплавов, введено в науку само это понятие и выдвинута гипотеза о механизме СПД.

В 50-60-х годах XX века А.А. Пресняков со своими сотрудниками установили принципиально важный факт, что относительное удлинение проходит через максимум с увеличением скорости деформации.

Большое сопротивление образованию шейки было объяснено высокой чувствительностью напряжения течения  $\sigma$  к скорости деформации:

$$\sigma = k \cdot m, \quad (1)$$

где  $k$  - эмпирическая константа;

$m$  - показатель скоростной чувствительности напряжения течения.

Различают два вида СП: СП под влиянием особых внешних условий (СП превращения) и структурная (изотермическая) СП.

СП превращения наблюдается в процессе фазового превращения при деформации полиморфных металлов и сплавов.

Структурная СП также представляет интерес, поскольку она позволяет рассматривать СП как универсальное состояние материалов, наблюдающееся при УМЗ структуре ( $d < 10$  мкм), температуре (0,5-0,8Тпл), скоростном интервале (10<sup>-5</sup>-10<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>). Это явление родственно ползучести, однако, отличается от нее большей чувствительностью напряжения течения к скорости деформации. Главным отличием СПД от обычной пластической деформации является высокая устойчивость течения, поэтому рассмотрим вначале феноменологические параметры, которые обуславливают поведение материала.

$$m = \frac{d \log \sigma}{d \log \dot{\epsilon}}$$

Физический смысл влияния показателя  $m$  на способность СП-ых материалов к равномерной деформации состоит в том, что локальное повышение скорости деформации в шейке требует повышения напряжения для дальнейшего её развития из-за высокой скоростной чувствительности напряжения течения. Приложенное напряжение оказывается меньше требуемого для развития шейки, поэтому течение концентрируется в другой части образца.

Высокая чувствительность показателя  $m$  к разным изменениям структуры подтверждает, что он является определяющим признаком СП-го состояния. Однако показатель  $m$  служит мерой сопротивления материала развитию шейки и не может быть критерием пластичности вязких материалов.

Для СП-ых материалов характерно сочетание трех свойств: большого относительного удлинения  $\delta$ , низкого напряжения течения и высокого показателя  $m$ . Поэтому к показателям, по которым оценивают СП материалов, относят относительное удлинение образцов до разрыва  $\delta$  и показатель скоростного упрочнения  $m$ .

# Условия проявления и методы изучения эффекта сверхпластичности материалов

Экспериментальная процедура определения показателя  $m$  состоит в том, что образец растягивают до максимума усилия, а затем на участке пологого снижения нагрузки, называемым стадией установившегося течения, резко увеличивают скорость растяжения с  $v_1$  до  $v_2$ . По достижении нового максимума усилия и начала установившегося течения вновь изменяют скорость траверсы в 2-2,5 раза, уменьшая или увеличивая ее (рисунок 1) [9, 16, 17]. Разработаны разные способы расчета, использующих разные точки кривой на рис. 4.

Первый способ предложен Бэкофеном:

$$m_B = \frac{\lg(P_A / P_B)}{\lg(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)}$$

где  $P_A$  - максимальное усилие при  $v_2$ ;

$P_B$  - усилие, полученное экстраполяцией участка CD при скорости  $v_1$  до деформации, равной деформации в точке A при скорости  $v_2$ .

Второй способ расчета  $m$  не требует экстраполяции, так как  $m$  определяется по уравнению:

$$m_M = \frac{\lg(S_A / S_C)}{\lg(\dot{\epsilon}_A / \dot{\epsilon}_C)}$$

где  $S_A$  и  $S_C$  - истинные напряжения течения в точках максимальных усилий сравниваемых скоростей.

Третий способ - способ Бэкофена-Хедворса-Стоуэлла обеспечивает одинаковые результаты независимо от знака изменения скорости:

$$m_{HB} = \frac{\lg(P_E / P_D)}{\lg(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)}$$

Преимущество третьего способа состоит в том, что он частично исключает влияние изменений микроструктуры при деформации с другой скоростью.

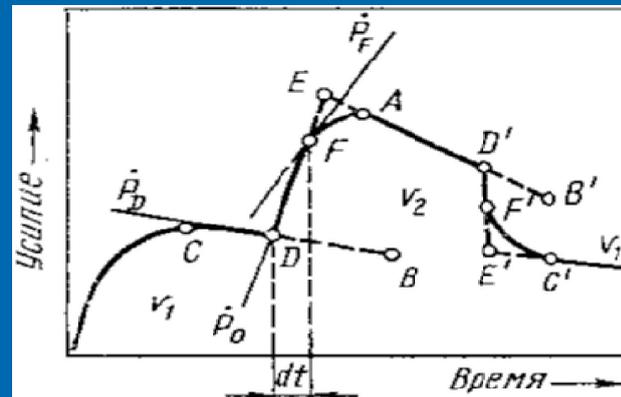


Рис.4 - Схема кривой усилие-время для определения показателя  $m$  методом ступенчатого изменения скорости движения подвижного захвата машины

Полагая, что на прямолинейном участке DF структура еще не успевает измениться, Хедворс-Стоуэлл предложили четвертый способ расчета:

$$m_H = \frac{\lg(P_F / P_D)}{\lg(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)}$$

Пятый способ расчета, предложенный Катлером, является производным от первых трех:

$$m_C = \frac{\lg(S_A / S_D)}{\lg(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)}$$

Здесь сравниваются напряжения течения и скорости в точке максимума усилия при  $v_2$  (точка A) и в момент переключения скоростей (точка D).

По существу, первый, второй, третий и пятый способы дают близкие результаты, так как все они в той или иной степени допускают установление нового структурного состояния при новой скорости деформации. Такие способы расчета приемлемы в основном для сопоставления различных материалов между собой или для выяснения влияния внешних условий, например, температуры, на чувствительность сплава к скорости деформации, если используются одинаковые способы расчета при одинаковых степенях деформации. Для анализа механизмов деформации можно использовать способ Хедворса - Стоуэлла.

Относительное удлинение образцов при сверхпластической деформации определяют также как при обычном растяжении по изменению расстояния между контрольными метками с использованием выражения

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

где  $l_K$  - расчетная длина образца после испытания.

В кривой зависимости напряжения течения СП-го материала от скорости деформации можно условно выделить три интервала (рисунок 2) [8, 9]. При низких скоростях деформации наблюдается относительно слабая зависимость  $\sigma$  от  $\dot{\epsilon}$  и низкие значения  $m$  и  $\bar{\delta}$  (рисунок 2, I - интервал). С повышением скорости зависимость  $\sigma$  от  $\dot{\epsilon}$  становится более резкой, величины  $m$  и  $\bar{\delta}$  возрастают и происходит переход в интервал II, где СП достигает максимума. Интервал II, несколько отличается у разных сплавов, но обычно находится в диапазоне  $10^{-4}$  -  $10^{-2}$  с $^{-1}$  [7-16]. Результаты, полученные при испытаниях многих сплавов, показывают, что переход к СП течению происходит, при  $m > 0,3$ , а при меньших значениях  $m$  идет обычная деформация, при которой  $\bar{\delta}$  и  $\sigma$  слабо зависят от скорости деформации.

Согласно оценкам по уравнению (13) временная стабилизация течения возможна при  $m \geq 0,6$ , а полное исчезновение шейки в ходе деформации наступает при  $m \geq 0,8$  [41].

Тем не менее, как было отмечено, практически у всех металлов и сплавов в СП состоянии установлена качественная взаимосвязь между  $\bar{\delta}$  и  $m$ , который является важнейшей характеристикой СП материалов. При измельчении зерен оптимальный интервал II сдвигается в сторону более высоких скоростей, причем максимальная величина  $\bar{\delta}$  возрастает.

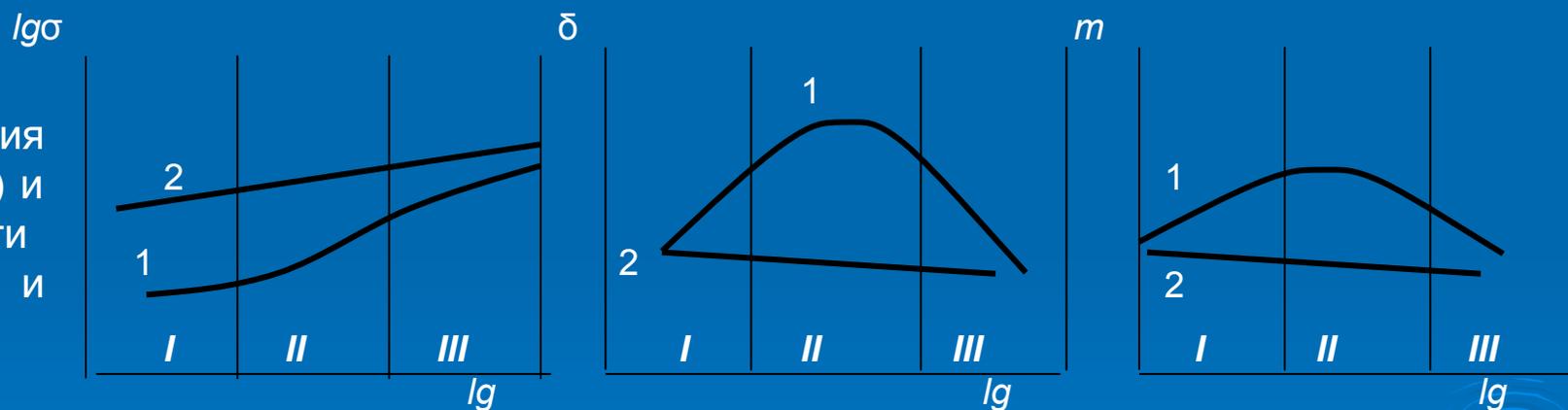


Рис. 2 - Зависимости напряжения течения  $\sigma$  (а), пластичности  $\bar{\delta}$  (б) и параметра  $m$  (в) от скорости деформации сплавов в СП (1) и обычных (2) состояниях

Для получения структурной СП важно, чтобы зерна имели равноосную форму, а их размеры в процессе нагрева существенно не изменялись. Наилучшие условия для предотвращения роста зерен имеют двухфазные сплавы.

Все двухфазные СП-ые сплавы можно разделить на два типа: с микродуплексной и матричной структурой. В сплавах с дуплексной структурой перемежаются две фазы. В случае мелкого равноосного зерна каждой из фаз структуру называют микродуплексной. Каждая из фаз в микродуплексной структуре затрудняет рост зерен другой фазы. В СП-ых сплавах с матричной структурой матричная фаза имеет непрерывную сетку границ, рост зерен матрицы сдерживается частицами второй фазы, находящимися в объеме зерен матрицы.

# Общие сведения о механизмах сверхпластической деформации

Установлено, что в СП состоянии в материалах действуют следующие механизмы деформации [7-9, 13, 16, 22]: зернограничное скольжение (ЗГС), внутризеренное дислокационное скольжение (ВДС) и диффузионная ползучесть (ДП), а СП появляется при их благоприятной комбинации. Сложность явления СП не позволяет в одном эксперименте однозначно определить действующие механизмы деформации. Поэтому приходится применять комплекс взаимодополняющих методик.

**Зернограничное скольжение.** ЗГС - вид деформации поликристаллических материалов, обуславливающий относительные перемещения зерен по поверхности их общей границы. Проскальзывание зерен может происходить вследствие их смещения вдоль границы или в узкой приграничной зоне.

Величина ЗГС при СП-ом течении зависит от скорости деформации. Величина проскальзывания максимальна во II-ом скоростном интервале (с. 17) и уменьшается в I-ом и III-м скоростных интервалах, то есть изменяется подобно характеристикам пластичности. Эти результаты типичны для различных материалов и свидетельствуют о тесной связи между СП и ЗГС. При пластической деформации и рекристаллизации дислокации могут входить в границы зерен. Эти решеточные дислокации становятся нестабильными и диссоциируются (релаксируются) на зернограничные дислокации [8]. В соответствии с этим различают два вида проскальзывания: “чистое” ЗГС, происходящее без участия решеточных дислокаций и обусловленное движением зернограничных дислокаций (ЗГД), которые генерируются в области границ зерен, и “стимулированное” ЗГС, связанное с движением ЗГД, образующихся при диссоциации в границе решеточных дислокаций. В момент диссоциации граница переходит в неравновесное (возбужденное) состояние, становится легко подвижной и способствует легкому осуществлению ЗГС. Здесь роль аккомодационных процессов играет ДМП и ВДС [13].

**Внутризеренное дислокационное скольжение.** В условиях СП наряду с ЗГС происходит и ВДС, обусловленное движением решеточных дислокаций в объеме зерен [7-9, 16]. Изучение текстурных изменений дает информацию о кристаллографическом скольжении как результате коллективного движения дислокаций. Однако оказалось, что в СП-ых сплавах с исходной текстурой - размытие полюсной плотности обусловлено и одновременным развитием ряда процессов - поворотом зерен, их ростом и др., поэтому лучше изучать формирование текстуры в материале с исходным бестекстурным состоянием. В работе [7] на различных материалах обнаружена скоростная зависимость текстурообразования при СПД. Это объясняется развитием внутризеренного скольжения, а также увеличением числа действующих систем скольжения при повышении скорости СПД.

В работе [40] установлено, что при СПД отдельные компоненты исходной текстуры размываются с различной скоростью, причем некоторые из них могут сохраняться. В сплавах Zn-40%Al и Al-33%Cu кристаллографическое скольжение развивается при всех скоростях деформации, но множественное скольжение имеет место только в III скоростном интервале. Механизм ВДС был исследован также с использованием дифракционной электронной микроскопии [63]. Исчезновение дислокаций из объема зерен, в период разгрузки и охлаждения образца, может быть предотвращено дисперсными выделениями в объеме зерен и быстрым охлаждением образца от температуры СПД. Однако лишь некоторые СП-ые материалы содержат выделения, стабильные при температуре деформации и способные эффективно фиксировать дислокации. Более универсально применение "мгновенной" закалки в момент окончания деформации. Так в работе [51] исследование сплава Zn-22% Al с применением этого метода позволило выявить с помощью электронного микроскопа дислокации в теле зерен. Причем дислокации были зафиксированы даже при скоростях деформации в интервале I, тогда как после обычного охлаждения они отсутствуют и при более высоких скоростях деформации.

Таким образом, несмотря на сложность трактовки экспериментов, имеется большое количество данных, доказывающих, что во всех трех областях СП-го течения в той или иной мере имеет место движение дислокаций.

**Диффузионная ползучесть.** СПД связана с активизацией диффузионных процессов. Согласно классическим представлениям направленный ДМП обусловлен градиентом концентрации вакансий, возникающим между различно ориентированными относительно оси растяжения границами под действием приложенных напряжений. Различают два вида ДП - ползучесть Набарро-Херринга, при которой диффузионные потоки направлены по объему зерен, и ползучесть Кобла, когда эти потоки идут по границам зерен.

Скорость ползучести Набарро-Херринга описывается уравнением

$$U_{HX} = B \frac{\sigma \cdot \Omega}{kT} \cdot \frac{D_{об}}{\langle d \rangle^2}, \quad (22)$$

где  $B$  - постоянная, зависящая от формы зерен;  $\Omega$  - атомный объем;  $D_{об}$  - коэффициент объемной диффузии;  $\langle d \rangle$  - средний размер зерен;  $k$  - постоянная Больцмана.

Скорость ползучести Кобла  $U_K$  можно описать уравнением [70]

$$U_K = B \frac{\sigma \cdot \Omega}{kT} \cdot \frac{\omega D_{гp}}{\langle d \rangle^3}, \quad (23)$$

где  $\omega$  - ширина границы;  $D_{гp}$  - коэффициент зернограницной диффузии.

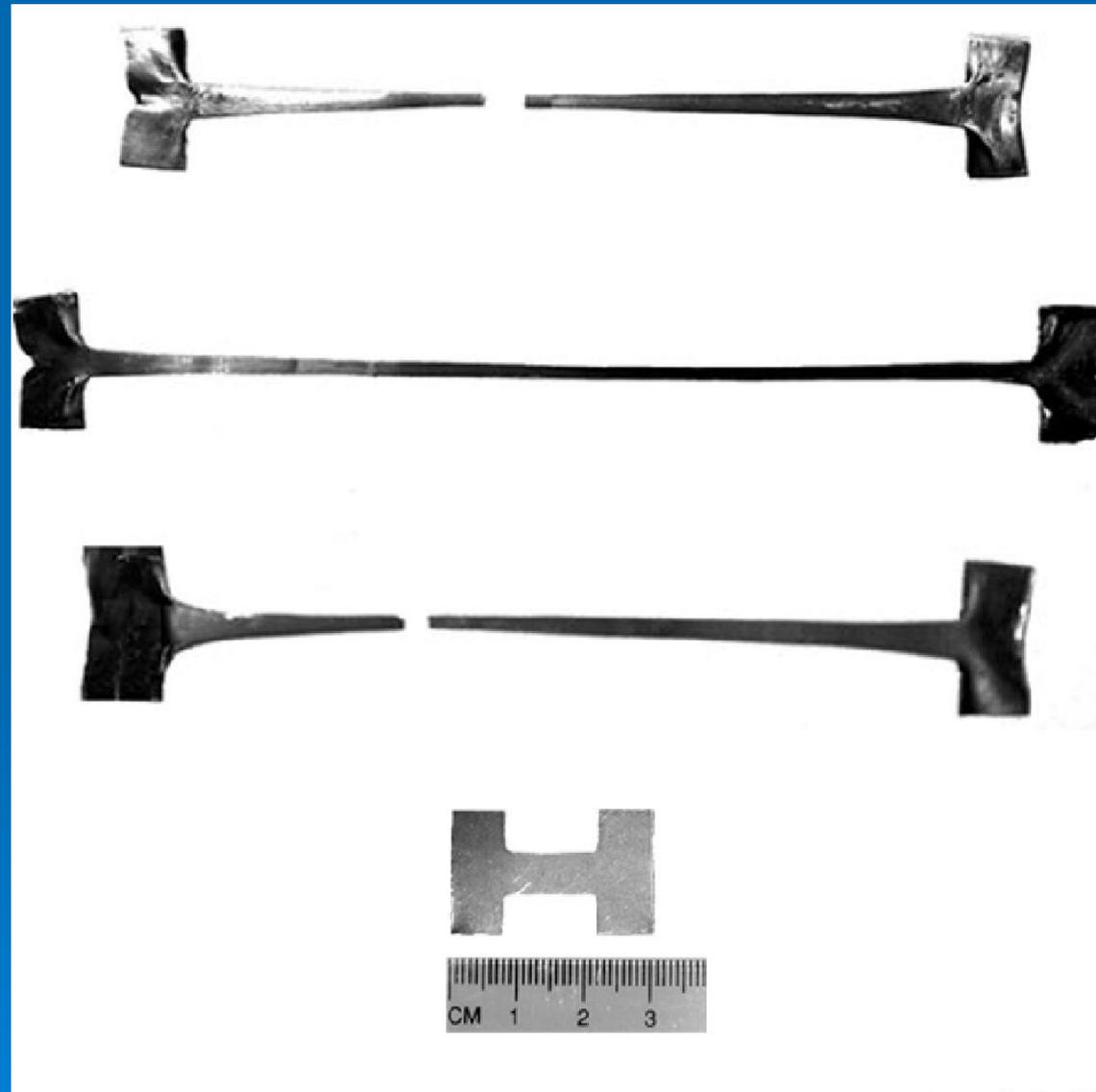
Поскольку скорость ползучести Кобла имеет более сильную зависимость от размера зерен, действие её в УМЗ СП-ых материалах более значимо.

Развитие ДП при СПД изучают в основном двумя методами: либо по инертным меткам, которыми могут быть частицы выделений, либо по деформационным (полосчатым) зонам, которые при СПД образуются у границ зерен. Таким образом, перераспределение дисперсных выделений дает однозначное доказательство действия ДП в условиях СП. Однако эту методику можно использовать только в материалах, содержащих стабильные частицы.

В работе [70] роль диффузии при СПД объясняют тем, что под действием напряжений возникают направленные диффузионные потоки атомов, обеспечивающих залечивание дефектов деформации и тем самым, препятствуя образованию несплошностей и преждевременному разрыву.

В согласии с проведенными оценками во многих работах вклад ДП в общую деформацию незначителен и составляет несколько процентов, хотя и увеличивается при понижении скорости деформации. В условиях СП-го течения ДМП осуществляется не под действием приложенных напряжений, а в поле локальных внутренних напряжений на границах зерен, величина и направление которых непрерывно изменяются в процессе СПД.

# Внешний вид образцов сплава 67КН5Б до и после сверхпластической деформации при различной температуре



900°C

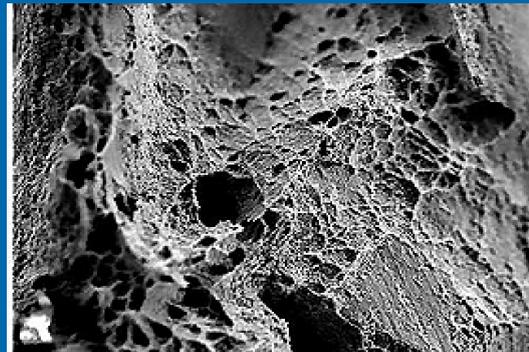
870°C

850°C

**№12** Влияние степени прокатки на структуру и СП сплава 67КН5Б при высокотемпературном растяжении



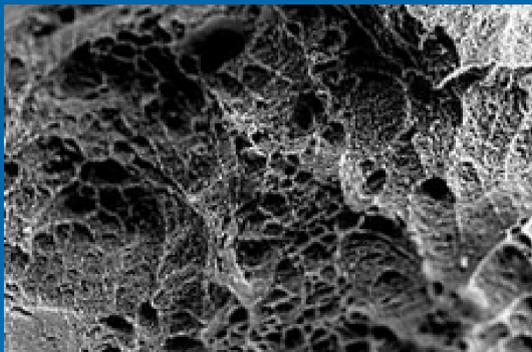
а X150



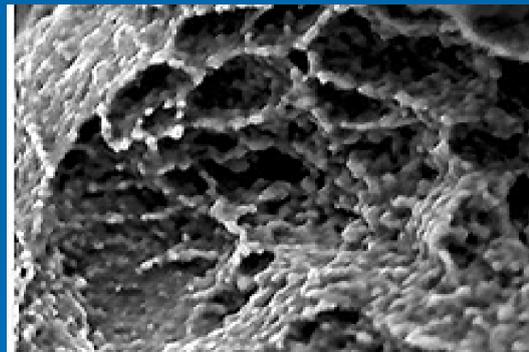
б X300



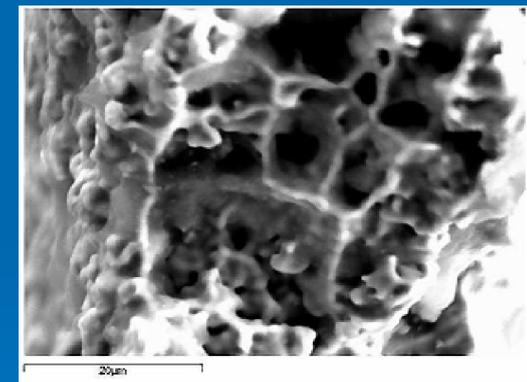
в X300



г X 300



д X1500

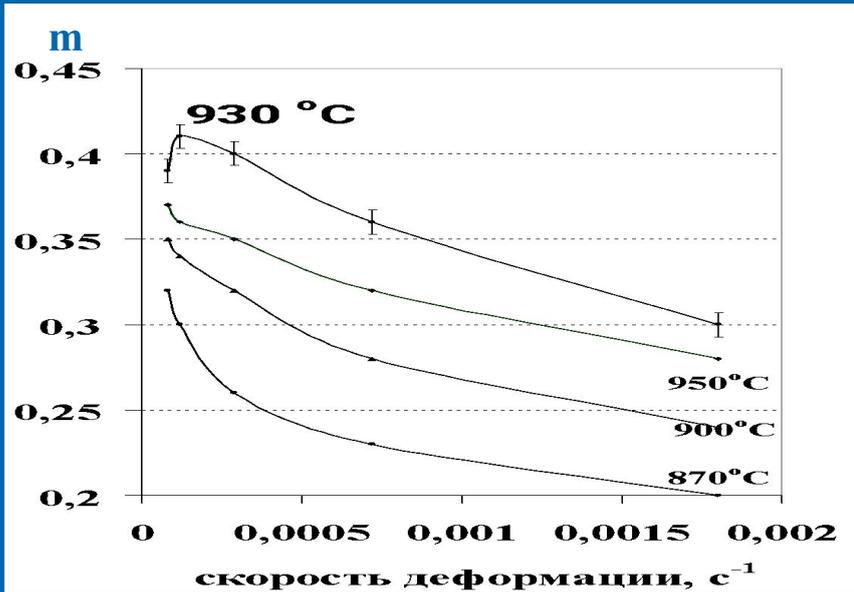


е X1500

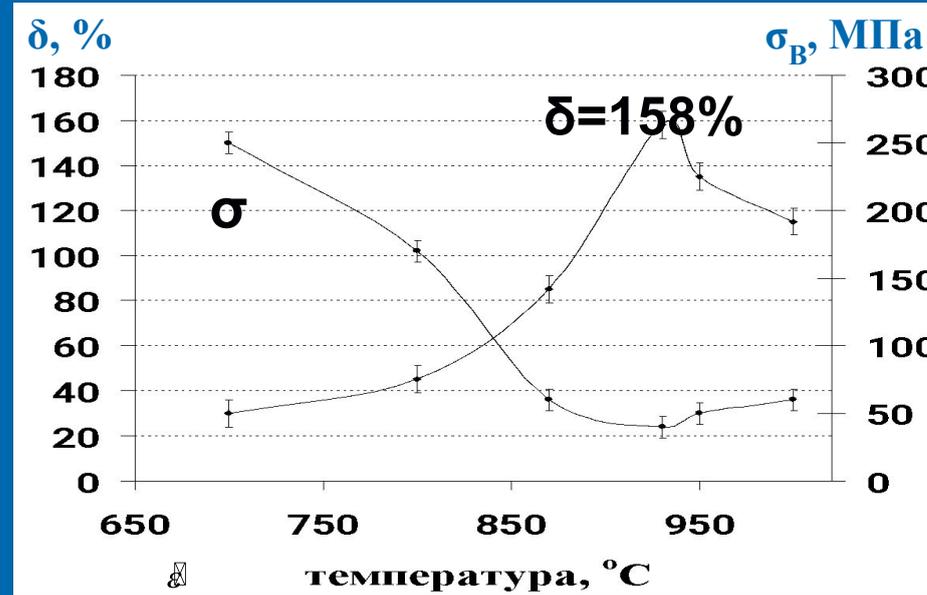
а , б - прокатка на 20% и растяжение при 870°С; в , г, д - прокатка на 40% и растяжение при 870°С; е – прокатка на 90% и растяжение при 870°С

Микроструктура и поверхности разрушения сплава 67КН5Б

# №13 1.3 Влияние температурно-скоростных условий деформации на показатели СП сплава 67КН5Б



а) предварительно прокатан на 60%



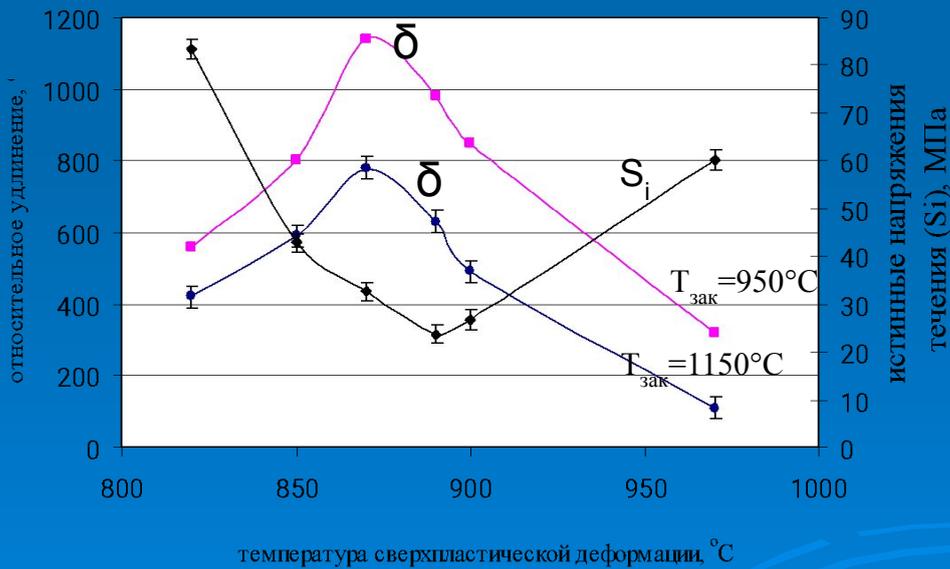
б) прокатан на 60%

950°C+90%

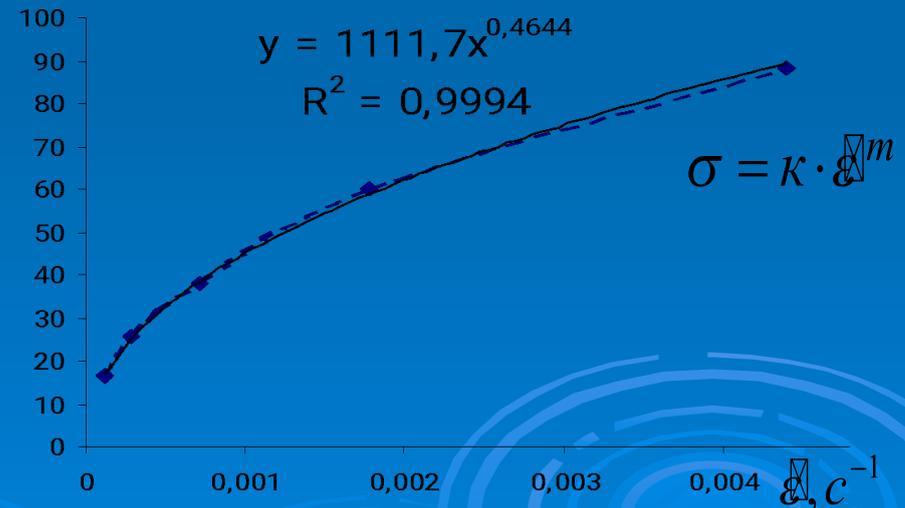
$T_{\text{спд}}=870^\circ\text{C}$

$\dot{\epsilon}_{\text{спд}}=10^{-3} \text{ c}^{-1}$

$\delta=1140\%$



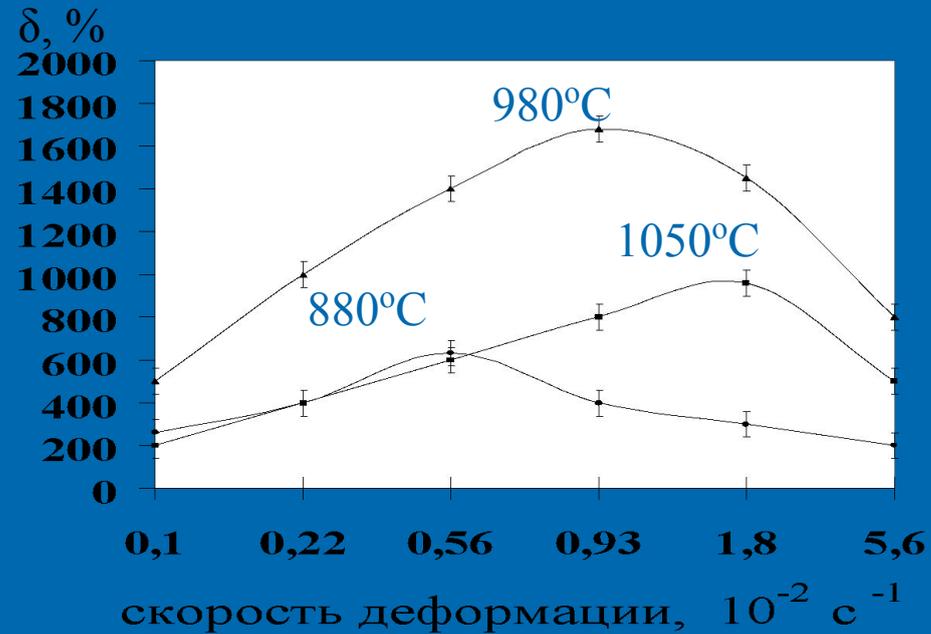
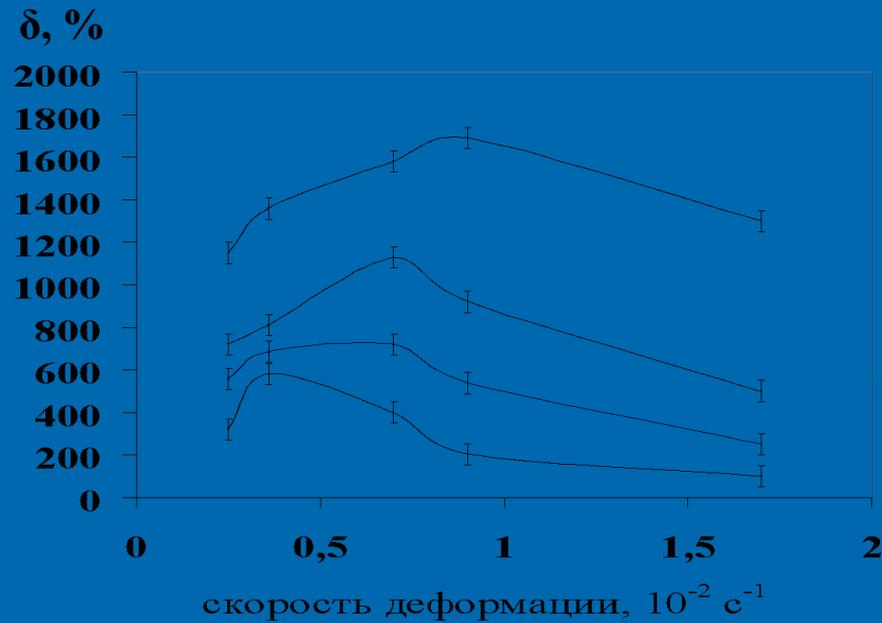
в) предварительно прокатан 90%



г) предварительно прокатан 90%

Механические свойства сплава 67КН5Б при сверхпластической деформации

# №14 Сверхпластическая деформация сплава 40ХНЮ



1200°C+90%

$T_{\text{СПД}} = 980^\circ\text{C}$

$\dot{\epsilon}_{\text{СПД}} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$

$\delta = 1730\%$

## Механические свойства сплавов 40ХНЮ при СПД

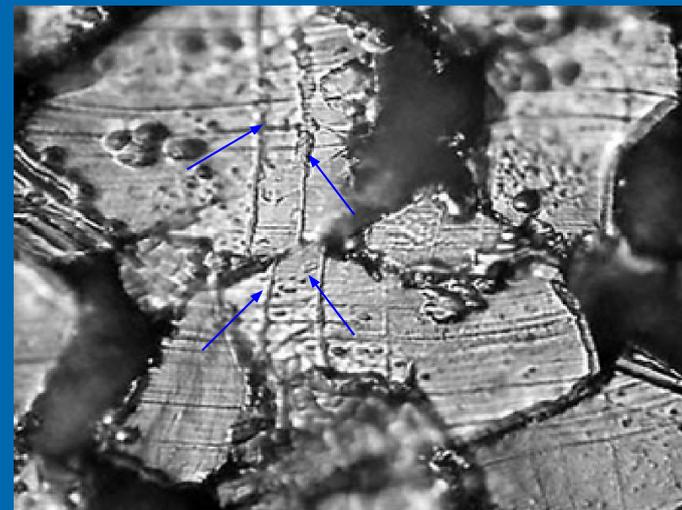
# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩЕГО СПЛАВА 67КН5Б.



а X870



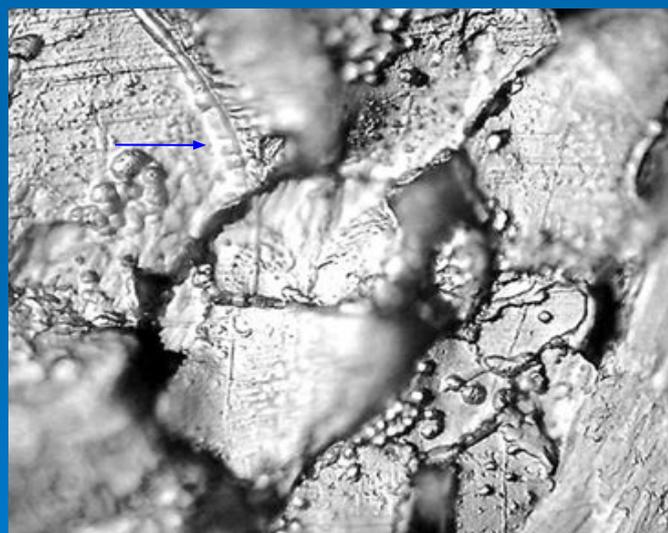
б X1500



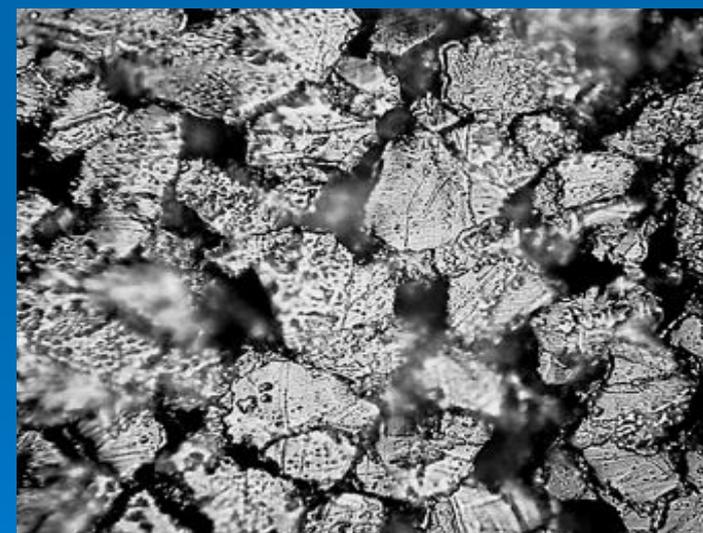
в X1500



г X1500



д X1500



е X700

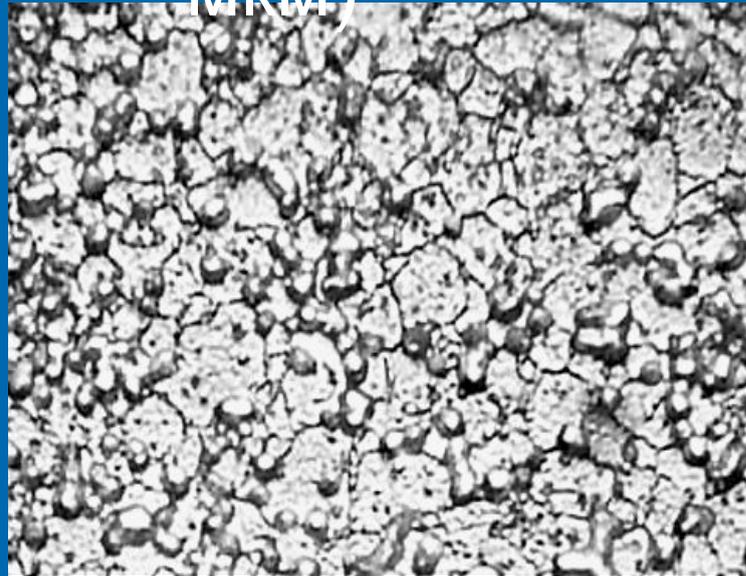
а – до деформации; б, в – смещение рисок на границах зерен после деформации (ЗГС)

г, д – искривления рисок внутри зерен, показывающие действие ВДС;

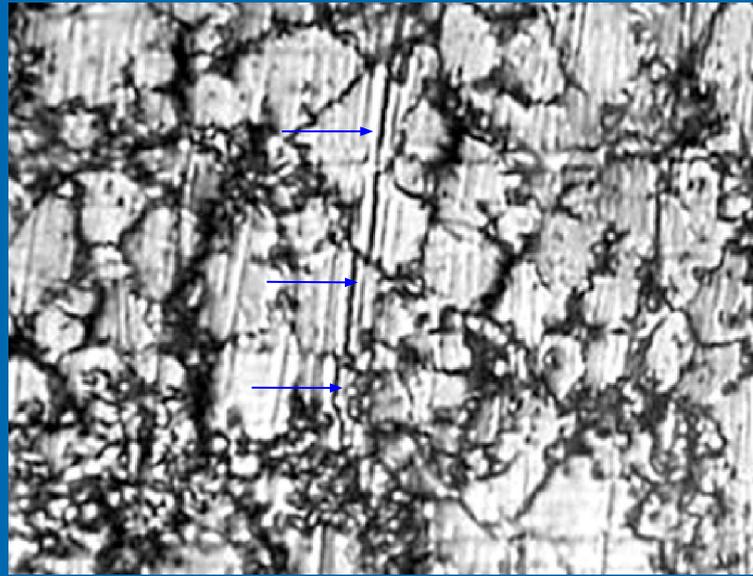
в – разворот зерен после деформации и ЗГС

Структура сплава 67КН5Б до и после деформации при  $T=870^{\circ}\text{C}$  и скорости  $1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  ( $d_0=12 \text{ мкм}$ )

**№20** Структура сплава 67КН5Б до и после сверхпластической деформации при  $T=870^{\circ}\text{C}$  и  $\dot{\epsilon}=1\cdot 10^{-3}\text{ c}^{-1}$  ( $d_0=2,7\text{ мкм}$ )



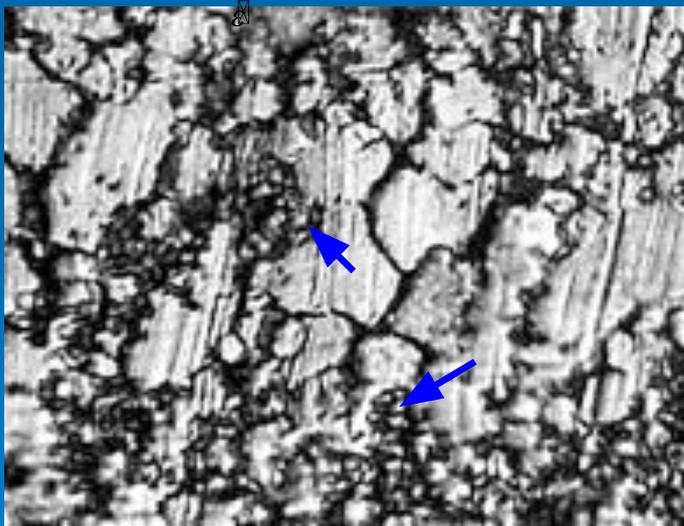
а) X2000



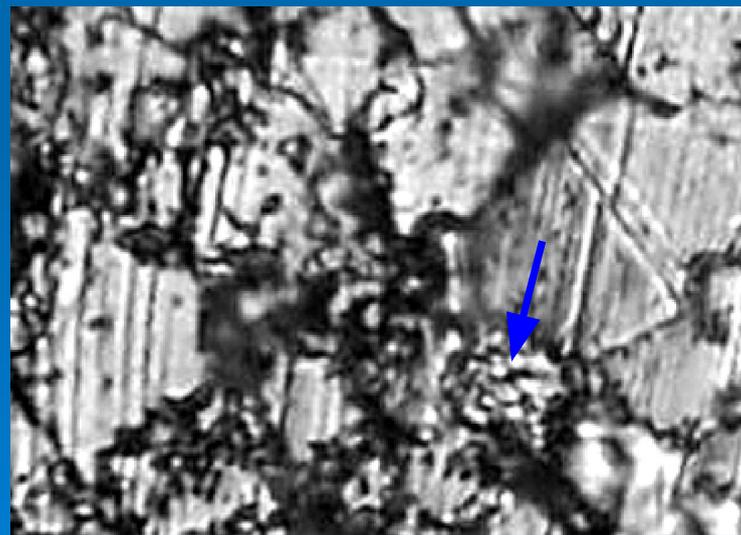
б) X2000



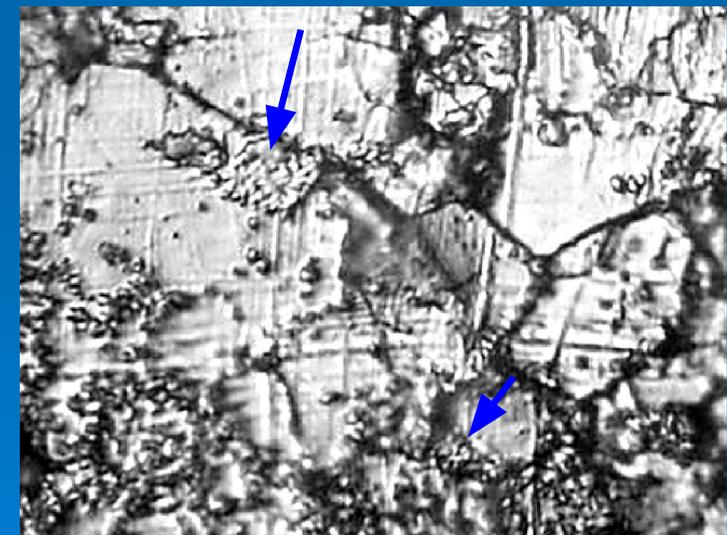
в) X2000



г) X2000



д) X2000

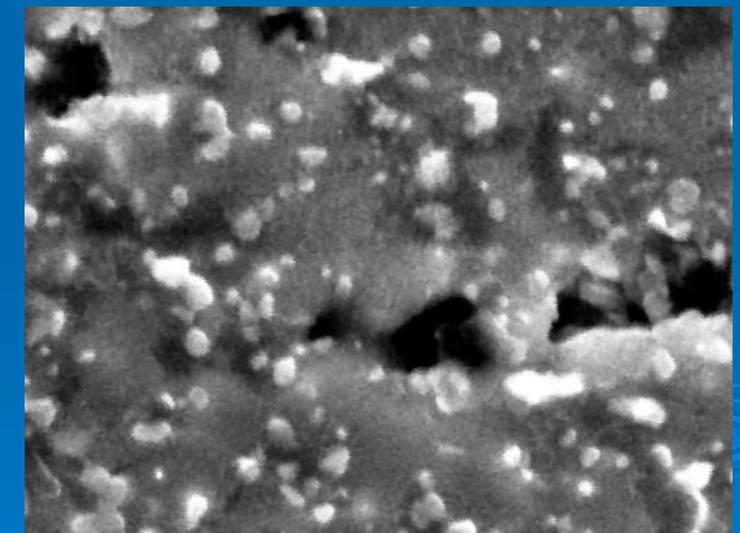
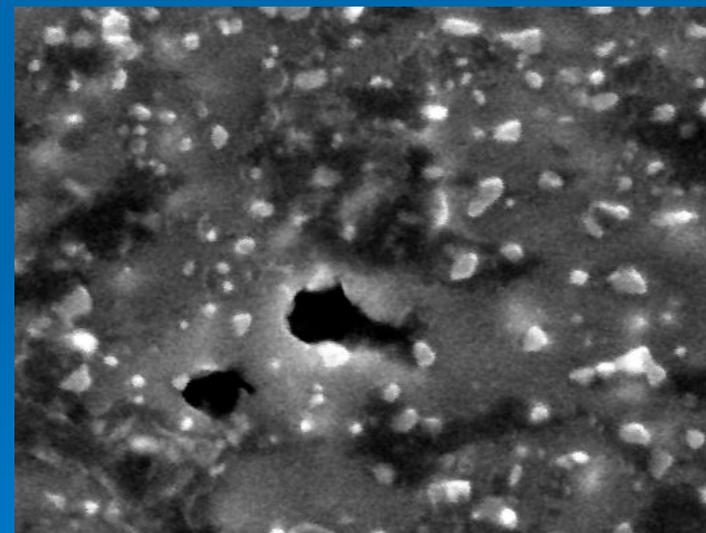
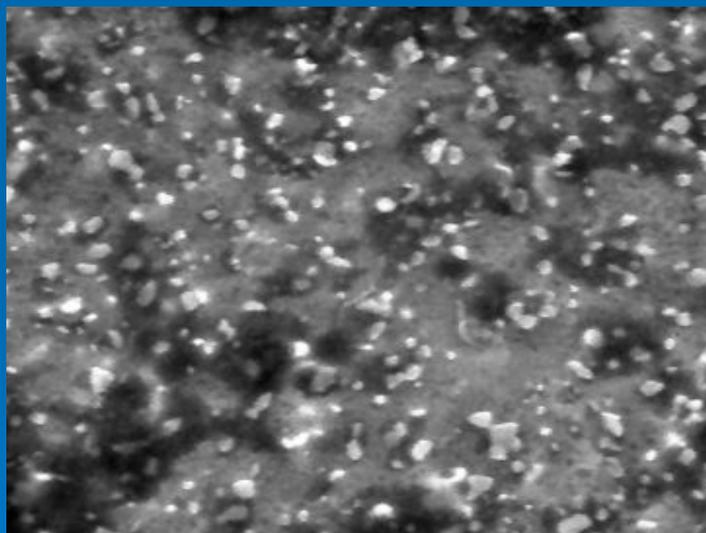
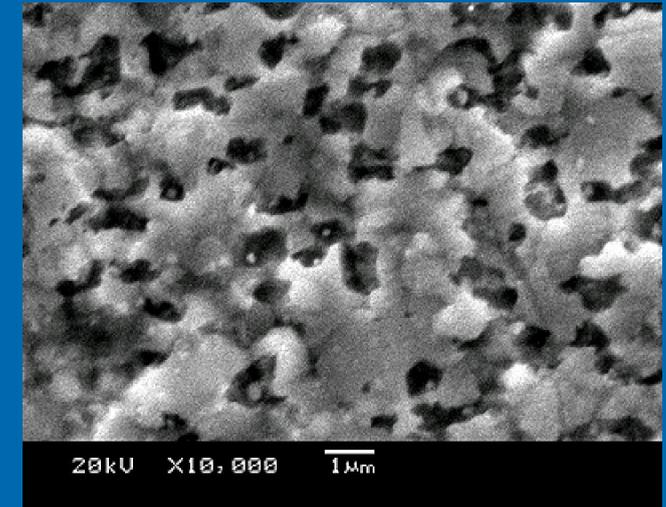
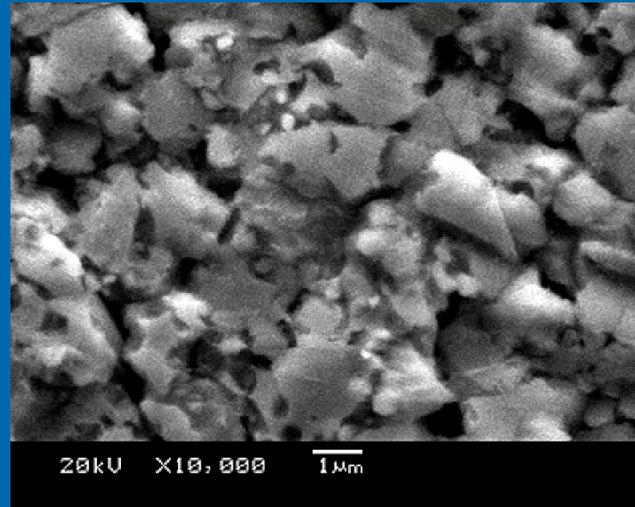
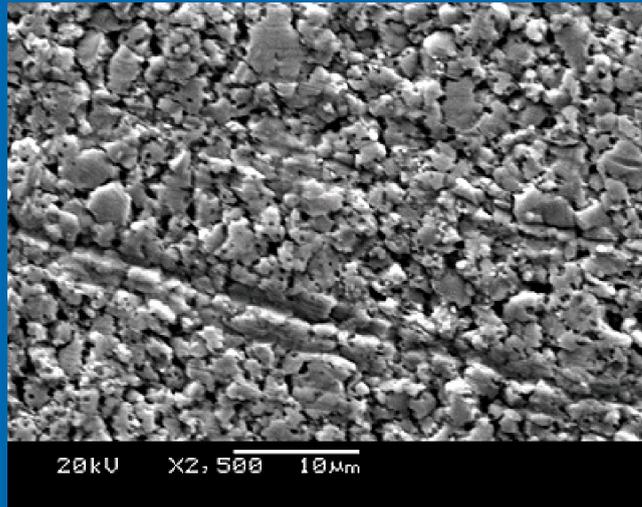


е) X2000

*a* – до деформации; б, в – смещение рисок на границах зерен после деформации (ЗГС); г, д, е – структура с диффузионными зонами

**№21**

# Особенности деформации и порообразования сплава 67КН5Б ( $d_0=2,7$ мкм) при сверхпластической деформации при $T=870^\circ\text{C}$ и скорости $1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$



**ж  $\epsilon_{\text{СПД}} = 750\%$ , X 3000**

**з  $\epsilon_{\text{СПД}} = 800\%$ , X3000**

**и  $\epsilon_{\text{СПД}} = 850\%$ , X3000**

Таким образом в случае начального размера зерен  $d=12$  мкм вклады различных механизмов относительно общей деформации:

$$\gamma_{\text{ОБЩ}} = 100\% = \gamma_{\text{ЗГС}} + \gamma_{\text{ВДС}} + f_{\text{ПОРЫ}} + \Delta d = 60\% + 15\% + 20\% + 5\%$$

В случае начального размера зерен  $d=2,7$  мкм вклады различных механизмов относительно общей деформации:

$$\gamma_{\text{ОБЩ}} = 100\% = \gamma_{\text{ЗГС}} + \gamma_{\text{ДМП}} + \Delta d = 68\% + 15\% + 17\%$$

# №15 ЯВЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Любой материал под действием постоянного напряжения может в определенных условиях прогрессивно деформироваться с течением времени. *Явление непрерывной деформации под действием постоянного напряжения называется ползучестью.*

В зависимости от температуры и уровня приложенного напряжения ползучесть протекает по разным законам. Наиболее известны четыре вида ползучести, области реализации которых в функции температуры и напряжения приведены на рис.

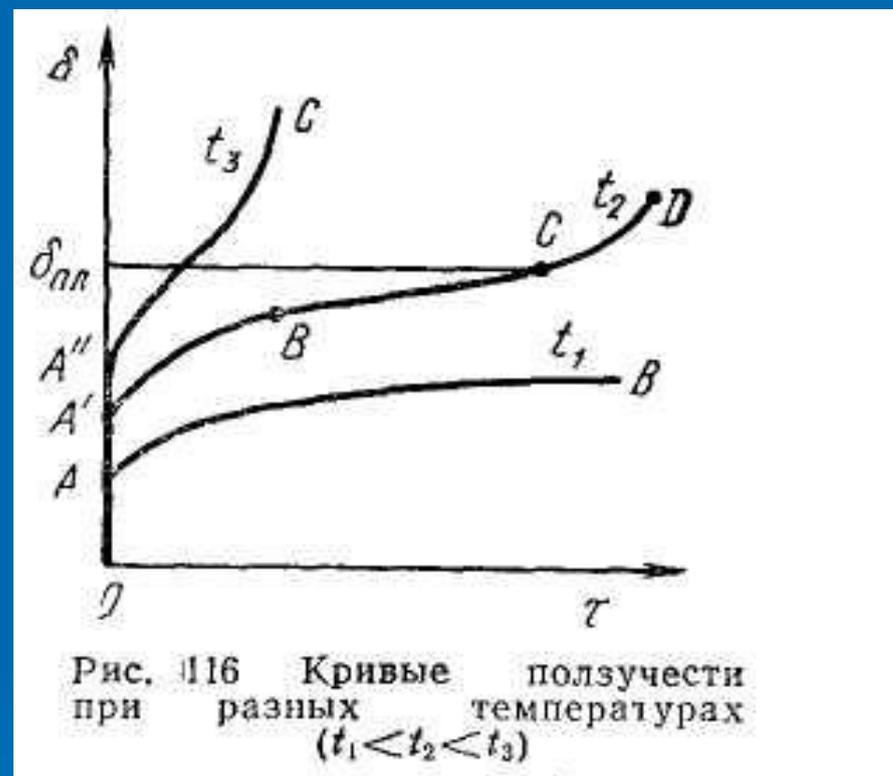
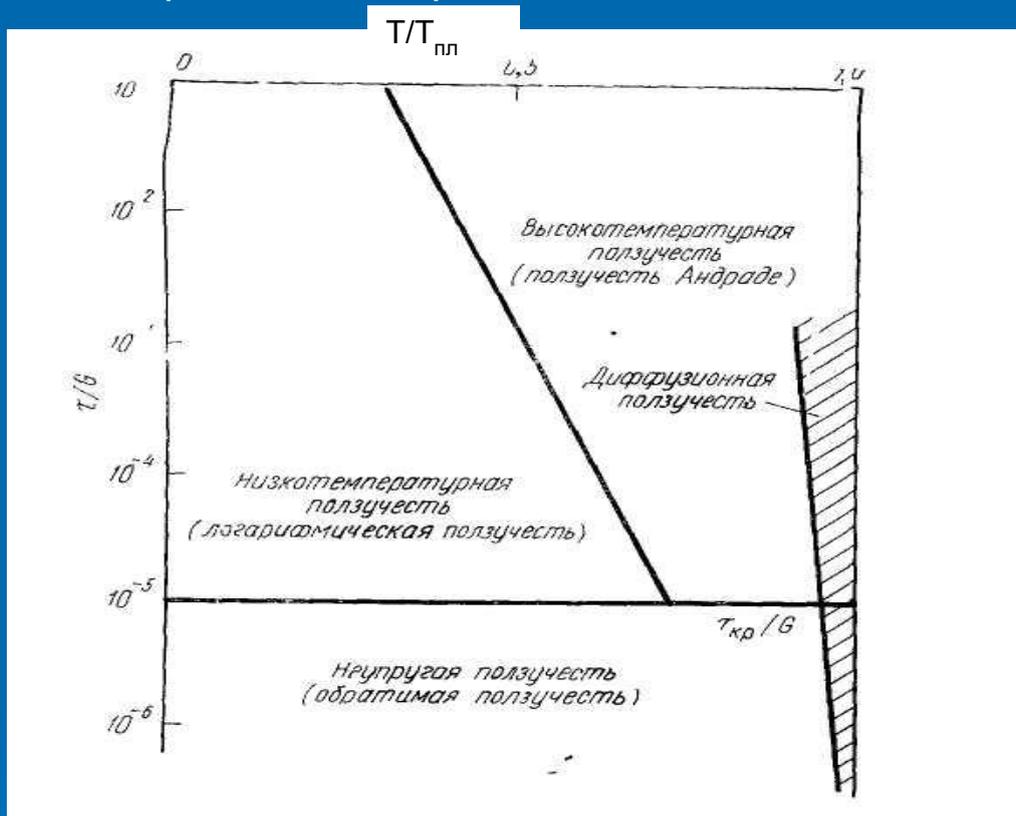


Рис. 116 Кривые ползучести при разных температурах ( $t_1 < t_2 < t_3$ )

При напряжениях ниже критического напряжения сдвига  $t_{кр}$  протекает неупругая обратимая ползучесть. При напряжениях выше  $t_{кр}$  в области относительно низких температур идет **логарифмическая**, а при высоких ( $>0,4—0,6 T_{пл}$ ) - так называемая **высокотемпературная ползучесть**. Следует подчеркнуть, что низко- и высокотемпературная ползучесть могут протекать при напряжениях, значительно меньших макроскопического предела текучести поликристаллического материала. Для практики наиболее важна высокотемпературная ползучесть. Стандартные испытания проводят именно в этой области. Наконец, при очень высоких температурах ( $>0,8—0,9 T_{пл}$ ) реализуется **диффузионная ползучесть**.

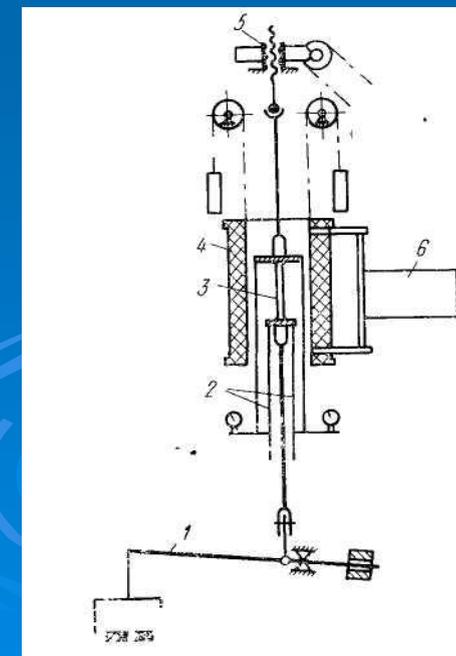
Основным первичным результатом испытания на ползучесть при заданной температуре и постоянном  $t > t_{кр}$  является кривая ползучести в координатах *относительная деформация — время* (рис. ).

Стандартные испытания на ползучесть при растяжении (ГОСТ 3248—60) проводят с целью определения предела ползучести материала. **Предел ползучести** — это наибольшее условное растягивающее напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенное время достигает заданной величины. В случае высокотемпературной ползучести имеется в виду скорость на установившейся стадии.

Если допуск дается по скорости ползучести, то предел ползучести обозначается буквой  $\sigma$  с двумя индексами — нижний соответствует заданной  $un$  в процентах в час (%/ч), а верхний — температуре испытания в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ). Например,  $\sigma_{1/10^{-4}}^{1100}$  — это предел ползучести при  $1100^{\circ}\text{C}$  и  $un=1 \cdot 10^{-4}$  %/ч. Если задается относительное удлинение и время его достижения, то в обозначение предела ползучести вводят три индекса: один верхний соответствует температуре испытания, а два нижних — деформации и времени. Например,  $\sigma_{1/1000}^{800}$  — предел ползучести при  $800^{\circ}\text{C}$ , когда  $\delta=1\%$  достигается за 1000 ч.

Испытания проводят на образцах, рабочая часть которых имеет круглое или прямоугольное сечение. Цилиндрический образец имеет диаметр 10 и расчетную длину 100 или 200 мм, плоский — ширину 15 и расчетную длину 100 мм. Допускается использование других образцов с диаметром  $d_0 \geq 5$  мм и расчетной длиной  $l_0 = 5d_0$  или  $10d_0$ . Форма и размеры головок определяются конструкцией захватов испытательной машины. Как и при кратковременных высокотемпературных испытаниях на растяжение, головки делают резьбовыми, что обеспечивает наиболее прочное крепление образца в захватах.

Испытательная машина состоит из следующих основных блоков: нагружающего устройства, нагревательной печи с терморегулятором, приборов для измерения температуры, и деформации. Нагрузка на образец обычно подается через рычажную систему. На рис. показана схема машины для испытаний на ползучесть марки ИП-2. Нагружение образца 3 производится рычажной системой 1, соединенной с нижним захватом. Верхний захват связан с механизмом 5, обеспечивающим перемещение образца вдоль вертикальной оси печи. В этой и многих других машинах во время испытания постоянной поддерживается нагрузка, а не напряжение, которое со временем может несколько повышаться из-за сужения образца. Для обеспечения постоянства напряжения необходимо использовать специальные устройства, автоматически уменьшающие нагрузку по мере удлинения образца.



Замер удлинения образца производится с точностью не менее 0,002 мм. Для этого используют специальные индикаторы с ценой деления 0,001 мм (2, рис. 118), катетометры, зеркальные тензометры и другие измерители деформации.

Испытание проводят в следующей последовательности. Устанавливают образец в захватах, закрепляют на нем термопары и измеритель деформации, а затем упруго нагружают его при комнатной температуре для проверки правильности центровки в захватах. После этого надвигают на образец печь, где он постепенно (не более 8 ч) нагревается до заданной температуры и выдерживается при ней не менее 1 ч. Затем подают предварительную нагрузку, равную ~ 10% от общей, и в течение 5 мин следят за показаниями измерителя деформации. Если показания остаются постоянными, производят плавную догрузку образца до заданной величины. Через определенные промежутки времени фиксируют величину удлинения и по результатам этих замеров строят первичную кривую ползучести. В наиболее совершенных установках кривая ползучести записывается автоматически во время испытания.

При определении предела ползучести допуск на удлинение обычно составляет от 0,1 до 1% за 100, 300, 500 или 1000 ч. Однако в некоторых случаях, например для жаропрочных материалов, используемых в энергомашиностроении, это время может быть больше — вплоть до 100 000 ч. Задаваемая скорость ползучести в большинстве случаев колеблется в пределах  $10^{-3}$ — $10^{-6}$  %/ч, чаще всего — от  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  %/ч.

Для расчета предела ползучести испытывают как минимум четыре образца при разных нагрузках (напряжениях). Для сокращения времени испытаний эти напряжения выбирают заведомо большими предела ползучести. Испытания прекращают на стадии установившейся ползучести, когда ее длительность будет достаточной для точного определения  $u_{n.уст}$ . Это условие необходимо, поскольку допуск при определении предела высокотемпературной ползучести дается именно по величине  $u_{n.уст}$ .

В результате получают серию первичных кривых ползучести при разных напряжениях (рис. 119,а) и для каждой из них подсчитывают  $u_{n.уст}$ . Затем в логарифмических координатах строят зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения. Исходя из уравнения (149), эта зависимость должна быть линейной (см. рис. 119,б). Интерполируя прямую, построенную по экспериментальным точкам при относительно высоких  $\sigma$ , до заданного значения  $u_{n.уст}$ , определяют предел ползучести.

Если допуск задается по величине удлинения за определенное время, то по первичным кривым ползучести строят зависимость времени достижения заданного значения  $\delta$  от напряжения и по ней определяют предел ползучести.

Предел ползучести характеризует напряжение, под действием которого материал может длительное время работать, не подвергаясь значительной деформации. Однако он ничего не говорит о сопротивлении материала разрушению при длительном воздействии температуры и напряжения. Для оценки этой сопротивляемости проводят специальные испытания на длительную прочность. В результате испытаний определяют **предел длительной прочности** — условное наибольшее напряжение, под действием которого материал при данной температуре разрушается через заданный промежуток времени. Методика проведения испытания близка к методике испытаний на ползучесть. Используются те же схемы нагружения (обычно растяжение) и те же испытательные машины. Основные цилиндрические образцы стандартизованы. Они должны иметь рабочую часть диаметром  $d_0 = 5; 7$  или  $10$  мм и расчетную длину  $l_0 = 5d_0$  или  $10d_0$ . Допускается использовать другие пропорциональные образцы, но их диаметр должен быть не меньше 3 мм. У плоских образцов  $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$  — начальная площадь поперечного сечения. Конструкция головок и способ их крепления в захватах аналогичны тем, которые применяются при испытании на ползучесть. Для определения предела длительной прочности необходимо провести испытание нескольких, по крайней мере 5—6 образцов при разных напряжениях. Основным результатом испытания каждого образца является время до разрушения  $t_p$  при заданном напряжении  $\sigma$ . Связь между  $t_p$  и  $\sigma$  хорошо аппроксимируется уравнением

$$\tau_p = A \cdot \sigma^{-n}, \quad (158)$$

где  $A$  и  $n$  — коэффициенты.

В логарифмических координатах эта зависимость прямолинейна и, следовательно, дает возможность экстраполировать результаты на более длительное время. Определив время до разрушения образцов, находившихся под напряжениями, заведомо большими предполагаемого предела длительной прочности (чтобы сократить время испытания), строят по экспериментальным точкам прямую  $\lg \sigma - \lg t_p$  и после ее экстраполяции до заданного времени оценивают величину этого предела (рис. 125, кривая 1). По стандарту рекомендуемый допуск по времени составляет от 50 до 10000 ч и определяется, как и в случае предела ползучести, требованиями к испытываемому материалу.

Построение прямых в логарифмических координатах ( $\lg \sigma$ — $\lg t_{п.уст}$ ,  $\lg \sigma$ — $\lg t_p$ ) нужно выполнять методом наименьших квадратов с оценкой величины доверительного интервала.

Обозначение предела длительной прочности  $\sigma$  сопровождаются двумя индексами: сверху записывают температуру испытания в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ), внизу — заданную продолжительность испытания до разрушения в часах (ч). Например,  $\sigma_{900^{\circ}\text{C}}^{1000\text{ч}}$  — предел 1000ч прочности при  $900^{\circ}\text{C}$ .

Помимо предела длительной прочности, в этих испытаниях оценивают характеристики пластичности — относительное удлинение и сужение. Часто деформация фиксируется и в процессе испытания. В результате может быть построена полная кривая ползучести, а по ней определена величина относительного удлинения к концу стадии установившейся ползучести (дпл, рис. 116).

Эту величину считают характеристикой запаса длительной пластичности материала. Она обычно значительно меньше конечного удлинения на стадии разрушения. При высокотемпературных испытаниях на длительную прочность, когда образцы доводят до разрушения, каждый из них последовательно проходит все три стадии ползучести. Однако величина предела длительной прочности в первую очередь определяется поведением материала на третьей стадии — стадии разрушения. Все факторы, препятствующие развитию пор и трещин, способствуют повышению предела длительной прочности. Таким образом, предел длительной прочности характеризует способность материала противостоять разрушению при длительном воздействии температуры и напряжений.

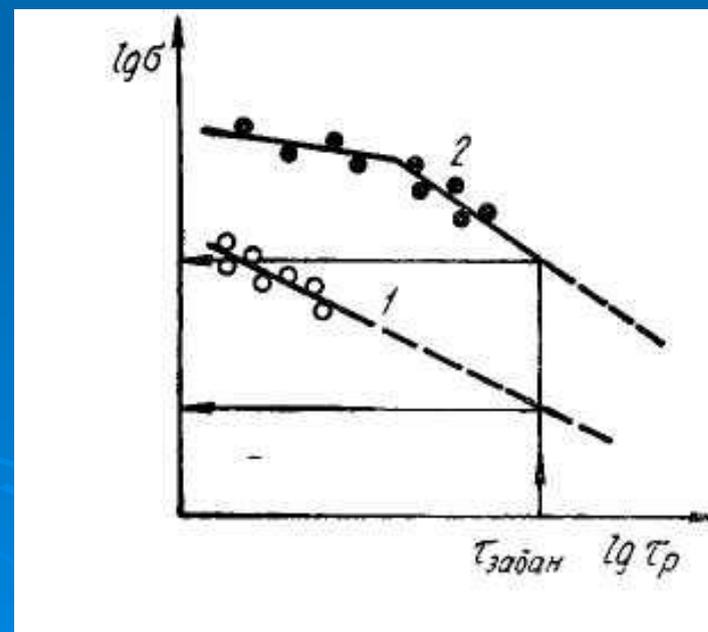


Рис. Схемы определения предела длительной прочности

## №26 УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И СВОЙСТВА

В условиях действия циклических (повторно-переменных) напряжений в металлах и сплавах происходит зарождение и постепенное развитие трещин, вызывающее в конечном итоге полное разрушение детали или образца. Это разрушение особенно опасно, так как может происходить под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к уменьшению долговечности из-за образования трещин и разрушения, называют **усталостью**, а свойство противостоять усталости — **выносливостью**.

Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях и затем развивается вглубь образца или детали, образуя острый надрез. Процесс распространения усталостной трещины весьма длителен. Он продолжается до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие. Тогда произойдет быстрое разрушение, как правило, хрупкое из-за наличия острого надреза. Задача усталостных испытаний — дать количественную оценку способности материала работать в условиях циклического нагружения без разрушения.

### 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Современные методы испытаний на усталость (выносливость) очень разнообразны. Они отличаются характером изменения напряжений во времени, схемой нагружения (изгиб, растяжение — сжатие, кручение), наличием или отсутствием концентраторов напряжений. Как и другие виды, усталостные испытания проводятся при различных температурах и в разных средах. Основные требования к методике усталостных испытаний обобщены в ГОСТ 2860—65.

В процессе любого усталостного испытания на образец действуют циклические напряжения, непрерывно изменяющиеся по величине и часто — по знаку.

Типичные примеры используемых циклов напряжений показаны на рис. 129. Цикл напряжений — это совокупность переменных значений напряжений за один период их изменения. Каждый цикл характеризуется несколькими параметрами. За максимальное напряжение цикла ( $\sigma_{max}$ ) принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение. Минимальное напряжение цикла  $\sigma_{min}$  — наименьшее по алгебраической величине напряжение.

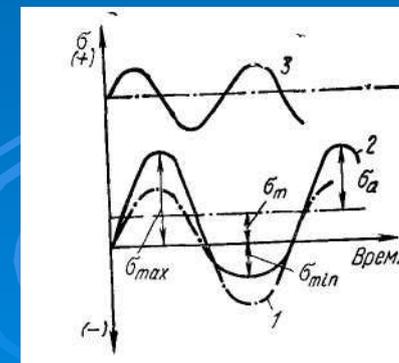


Рис. Разновидности циклов напряжений

# №27 Среднее напряжение цикла

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad ()$$

Амплитуда напряжений цикла

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad ()$$

Сложение и вычитание максимальных и минимальных напряжений в формулах (165) и (166) производят с учетом их знака. Из рис. 129 ясно, что

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad ()$$

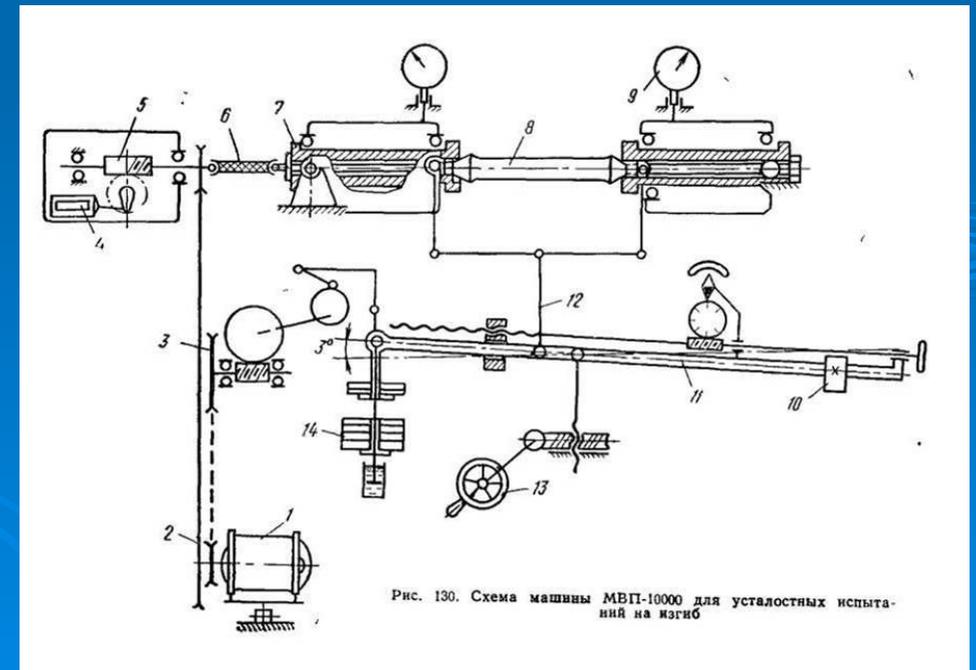
Цикл характеризуется также коэффициентом асимметрии:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad ()$$

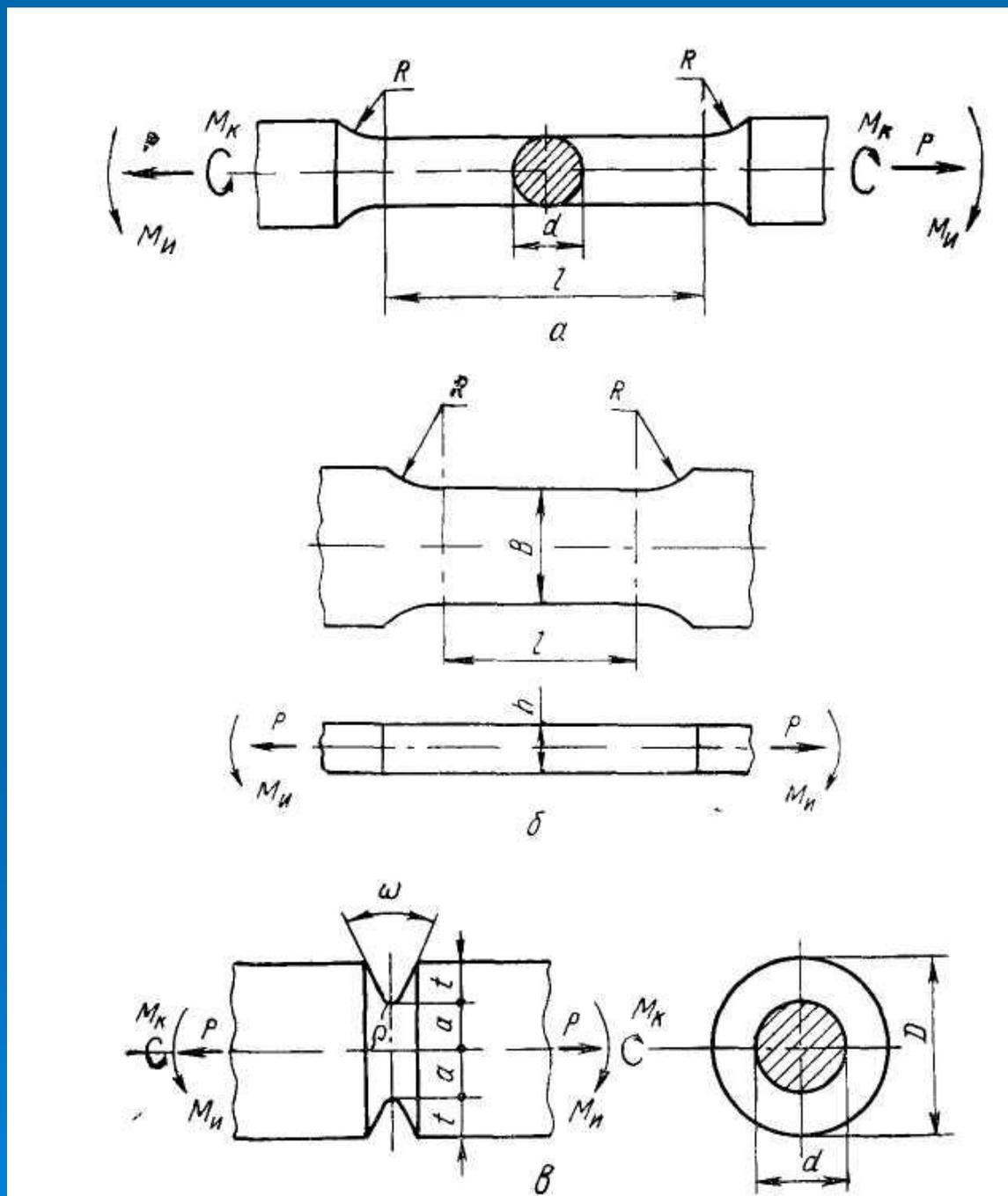
Если  $R_\sigma = -1$ , то такой цикл называют **симметричным** (рис. 129, кривая 1). Если же минимальное и максимальное напряжения цикла не равны по величине, то он называется **асимметричным** (рис. 129, кривые 2 и 3). Когда напряжения меняются по величине и знаку, цикл считается **знакопеременным** (рис. 129, кривые 1 и 2), если только по величине — **знакопостоянным** (рис. 129, кривая 3). Для испытаний чаще всего используют симметричные знакопеременные циклы с  $R_\sigma = -1$ .

Наиболее распространенная схема нагружения при усталостных испытаниях — изгиб. Эта схема может реализоваться по-разному. Особенно проста и чаще всего применяется схема чистого изгиба образца при вращении. Нагрузка здесь прилагается в двух точках, что обеспечивает постоянство изгибающего момента на всей рабочей длине образца.

На рис 130 показана схема машины. Образец 8 вращается электродвигателем 1 через двухступенчатый шкив 2 и шкив 3 программного устройства. Нагрузка на образец подается рычагом 11 с перемещающимся грузом 10 и съемными грузами 14. Рычажная система с грузами подвешена к образцу на тросах 12. Грузовой рычаг устанавливается в рабочее положение маховиком 13. Биение (деформация) образца фиксируется на индикаторах 5. Количество циклов нагружения регистрирует счетчик 4, который соединен со шпинделем 7 через редуктор 5 и гибкий вал 6. Программное устройство позволяет изменять нагрузку в процессе испытания по заданной программе.



Некоторые из стандартных образцов, рекомендуемых для усталостных испытаний, показаны на рис. 136. Их рабочая часть имеет круглое или прямоугольное сечение. Диаметр цилиндрической части гладких образцов  $d$  обычно составляет 5—10 мм



## **Основная литература**

1. Золоторевский В.С. Механические испытания и свойства металлов. - М.: Metallurgy, 1974.- 302 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов // - М.: Metallurgy, 1977. - 495 с.
3. Материаловедение. Под ред.Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. –М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648 с.
4. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. Учеб. пособие для вузов. - М.: Metallurgy, 1982.-548 с.
5. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов. /Под ред. Трефилова В.И. Киев: Наукова думка, 1987.
6. Масленников Ф.И. Лабораторный практикум по материаловедению// Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы Москва, 1961. – 268 с.
7. Практические вопросы испытания металлов перевод с немецкого под редакцией О.П. Елютина // М.: Metallurgy, 1979. – 280 с.
8. Гуляев А.П. Материаловедение. - М.: Metallurgy, 1976. - 480 с.
9. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов (справочное пособие) Под общей редакцией чл.-корр. АН СССР А.Т. Туманова Том I Физические методы исследования металлов // М.: Машиностроение, 1971. – 552 с.
10. Суховаров В.Ф. Прерывистое выделение фаз в сплавах. – Новосибирск: Наука, 1983. -164 с.
11. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М: Metallurgy, 1984.- 263 с.
12. Новиков И.И., Портной В.К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном.- М.: Metallurgy, 1981.- 479 с.
13. Техническое описание и инструкция по эксплуатации высокотемпературной установки для механических испытаний 1246P-2/2300.
14. Техническое описание и инструкция по эксплуатации микротвердомера ПМТ-3.
15. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. – М.: Metallurgy, 1976. –456с.
16. Виноградов В.Н. Изнашивание при ударе. – М.: машиностроение, 1982.

## **Дополнительная литература**

17. Задачи по физике твердого тела. Под ред. Г.Дж. Голдсмида. – М.: Наука, 1976.- 431 с.
18. Пикеринг Ф.Б. Физическое материаловедение и разработка сталей. - М.: Metallurgy,1982.-184 с.
19. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Metallurgy, 1986. – 224 с.