

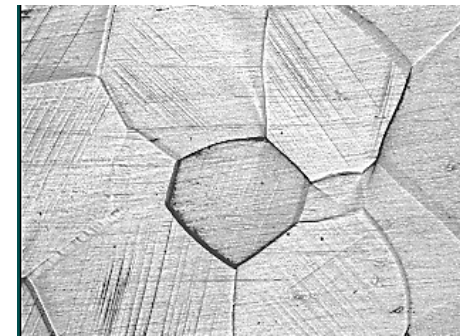
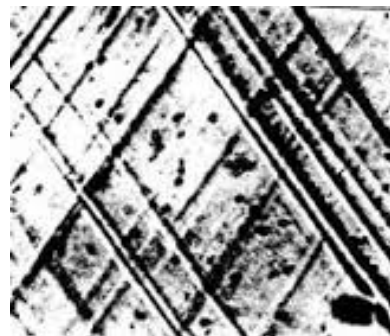
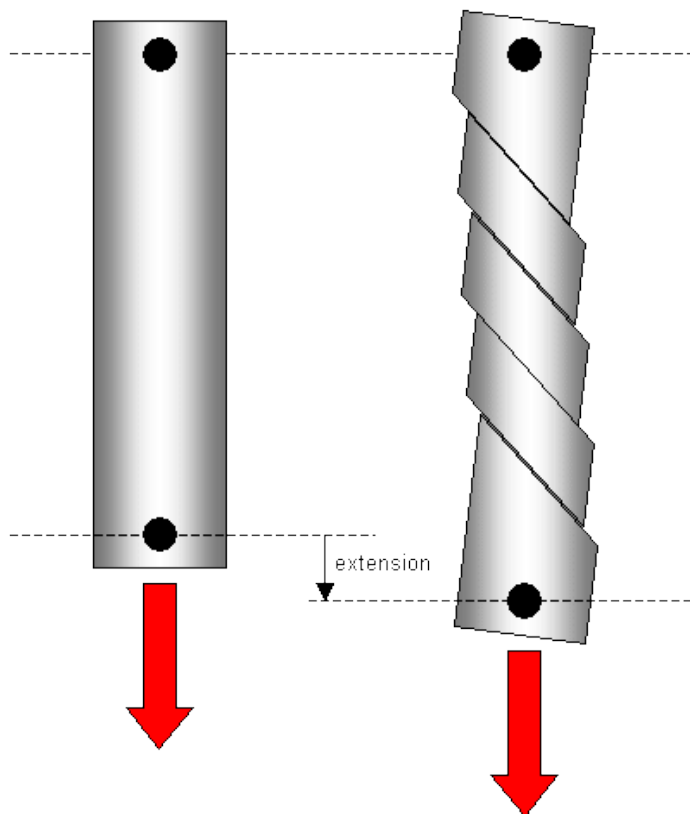
# МЕТАЛЛЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ: ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЦЕССЫ

## МОДУЛЬ 2. Процессы и методы формирования наноструктурных состояний в конструкционных материалах

### Лекция 9

Механические свойства наноструктурных материалов. Механизмы деформации и разрушения.

Пластическая деформация в кристалле осуществляется путем сдвига одной его части относительно другой.



полосы скольжения в моно- и поликристаллах

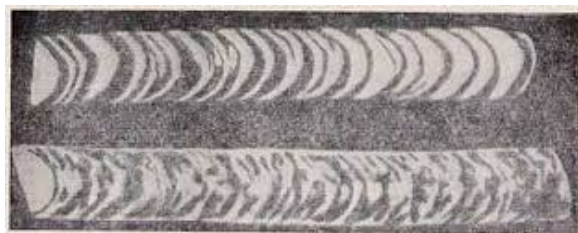
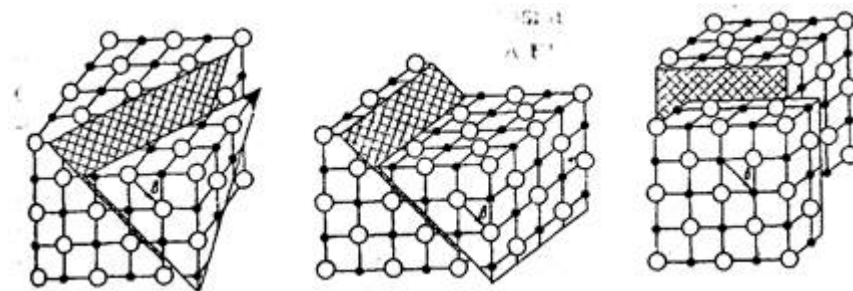


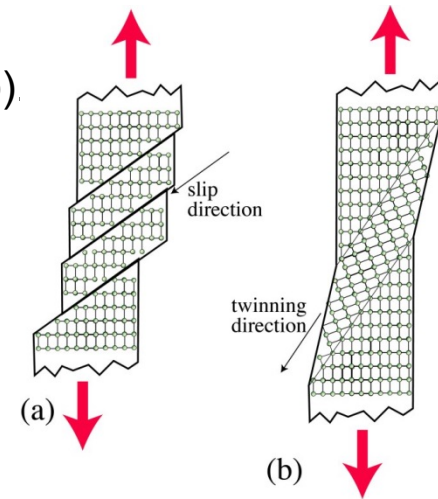
Рис. 26. Сдвиги в монокристалле олова при растяжении (по П. А. Ребиндеру и В. И. Лихтману)



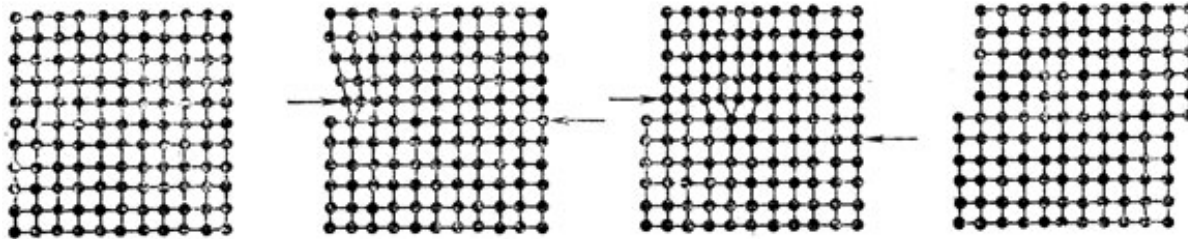
Системы скольжения в кристаллах типа NaCl

Имеется две разновидности сдвига: скольжение (а) и двойникование (б).

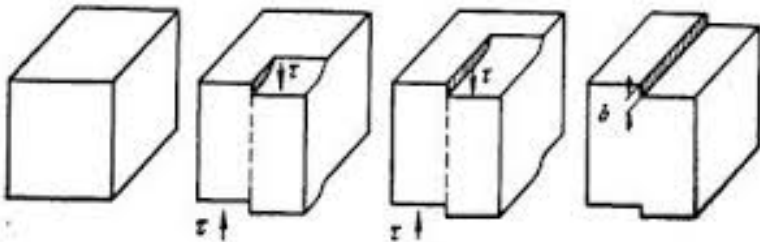
**Элементарный акт сдвига** – это смещение одной части кристалла относительно другой на одно межатомное расстояние, которое осуществляется путем последовательного перемещения дислокаций (или образования двойника).



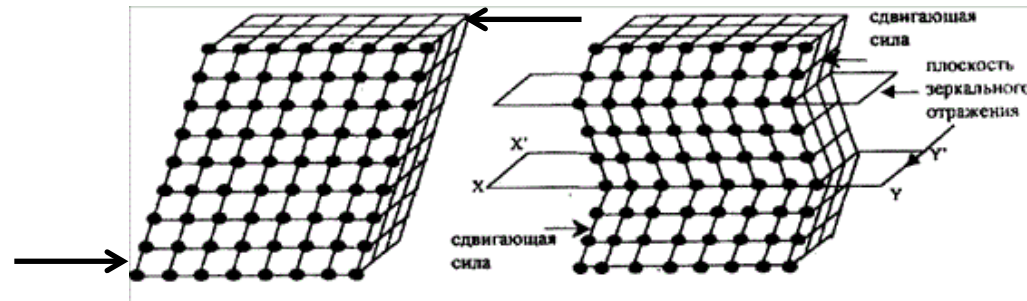
*Пластическая деформация кристалла с **краевой дислокацией***



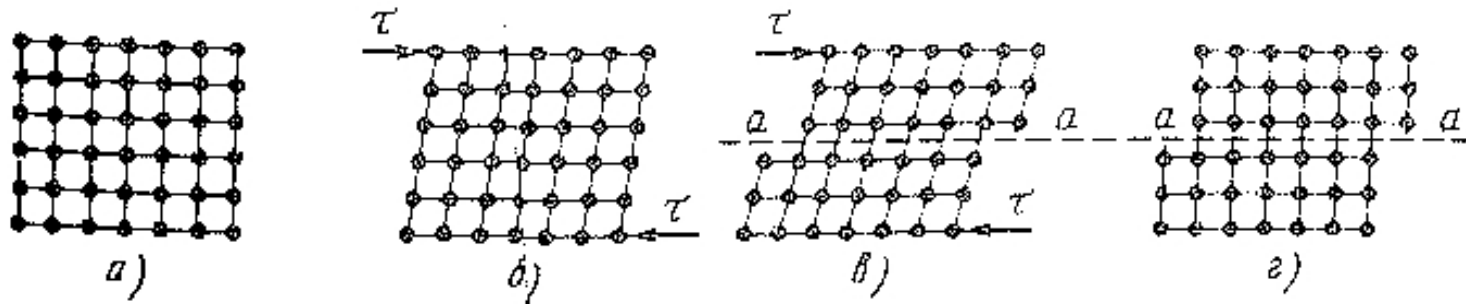
*Пластическая деформация кристалла с **винтовой дислокацией***



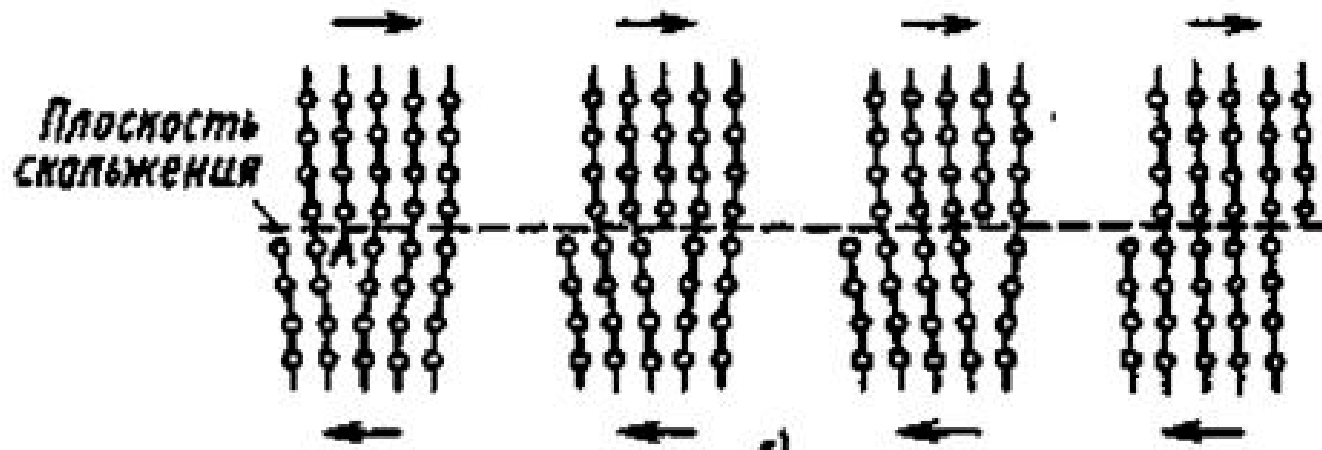
*Пластическая деформация кристалла **двойникованием***



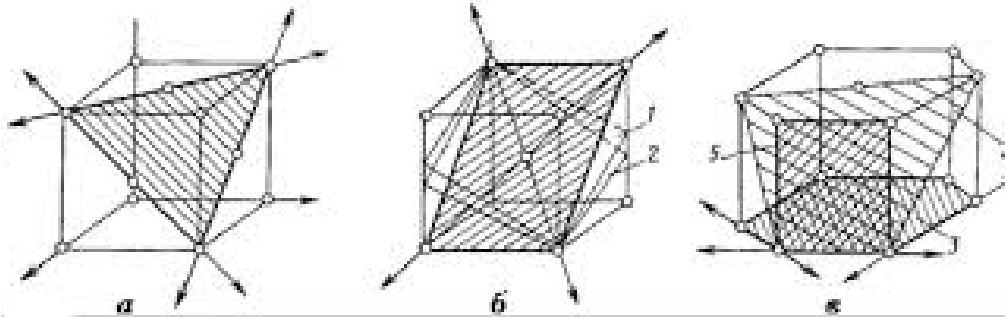
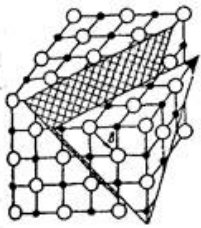
## Модель сдвига, соответствующая теоретической прочности кристалла



## Модель сдвига путем движения дислокации при существенно меньших напряжениях



# Сдвиги в монокристалле и поликристалле

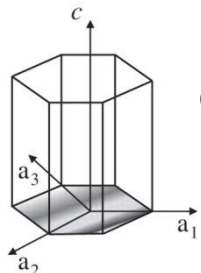


Системы скольжения в металлах с ГЦК (а), ОЦК (б) и ГПУ (в) решетками; заштрихованы плоскости наиболее легкого скольжения:

- 1 - плоскость (1Ц); 2 - плоскость (123); 3 - плоскость базиса;
- 4 - пирамидальная плоскость скольжения; 5 - призматическая плоскость скольжения

**Деформация скольжением развивается по плоскостям и направлениям, на которых плотность атомов максимальна!**

Плоскость скольжения вместе с направлением скольжения, принадлежащим этой плоскости, образует **систему скольжения**.



Например, в Титане плоскость {0001} может скользить в 3 направлениях ( $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$ )

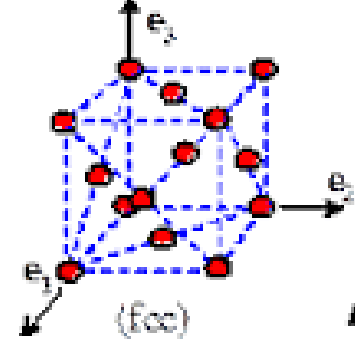
Число систем скольжения неодинаково в металлах с разным типом решеток



## Основные системы скольжения

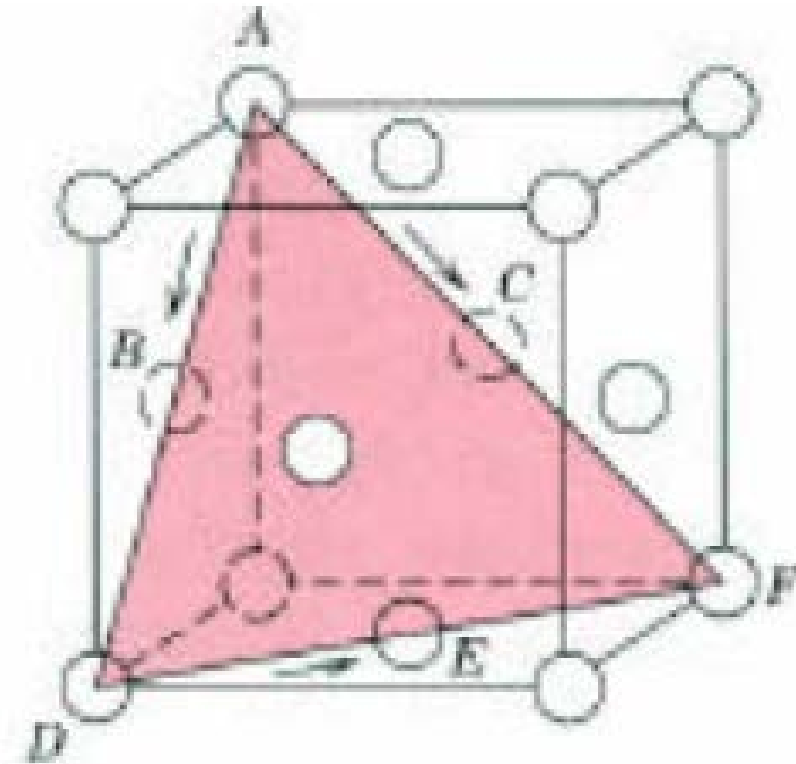
Metals	Slip Plane	Slip Direction	Number of Slip Systems
Cu, Al, Ni, Ag, Au	FCC {111} ★	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W, Mo	BCC {110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	HCP {0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	{10 $\bar{1}$ 0}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	{10 $\bar{1}$ 1}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

## Системы скольжения в ГЦК



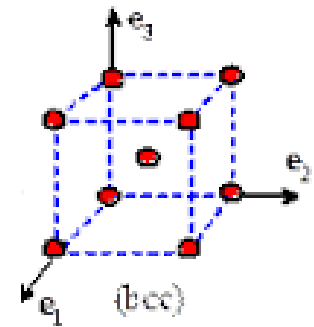
У металлов с **ГЦК** решеткой (Cu, Al, Ni и др.) 4 различных плоскости семейства плоскостей  $\{111\}$  – то есть плоскостей с максимальной плотностью узлов и максимальным межплоскостным расстоянием.

Эти 4 плотноупакованные плоскости типа (111) могут скользить в 3 направлениях, поэтому в **ГЦК** металлах  $3 \cdot 4 = 12$  **систем скольжения**.



Metals	Slip Plane	Slip Direction	Number of Slip Systems
Cu, Al, Ni, Ag, Au	<b>FCC</b> $\{111\}$ ★	$\langle \bar{1}10 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W, Mo	<b>BCC</b> $\{110\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	<b>HCP</b> $\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

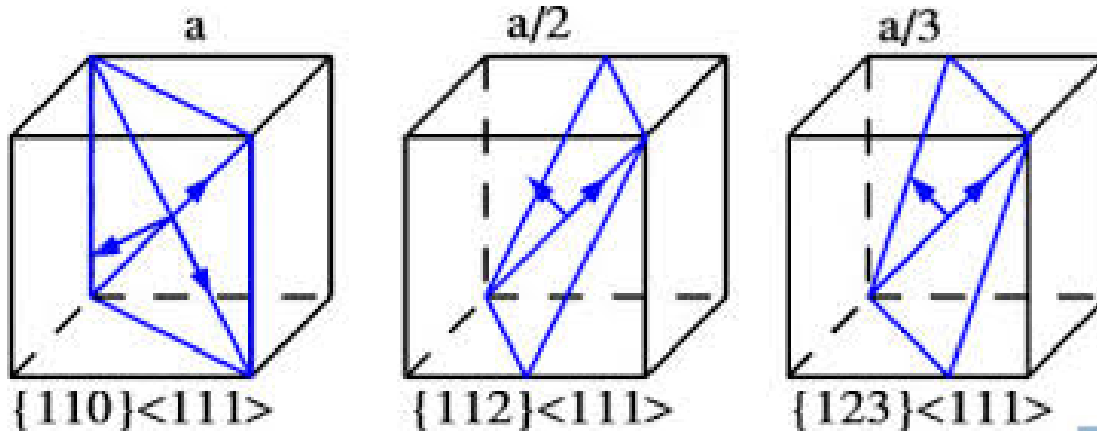
# Системы скольжения в ОЦК



В металлах с **ОЦК** решеткой существует возможность движения дислокаций по 3 семействам плоскостей скольжения  $\{110\}$ ,  $\{112\}$ ,  $\{123\}$ .

При этом направление скольжения всегда одинаковое  $\langle 111 \rangle$ .

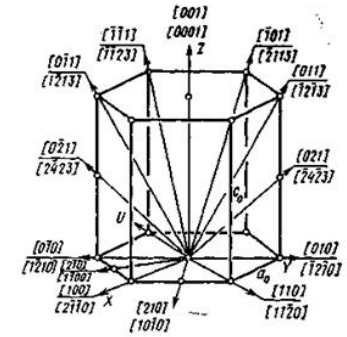
Всего в **ОЦК** металлах **48 систем скольжения** : 12 систем типа  $\{110\}$ , 12 – типа  $\{112\}$  и 24 – типа  $\{321\}$ .



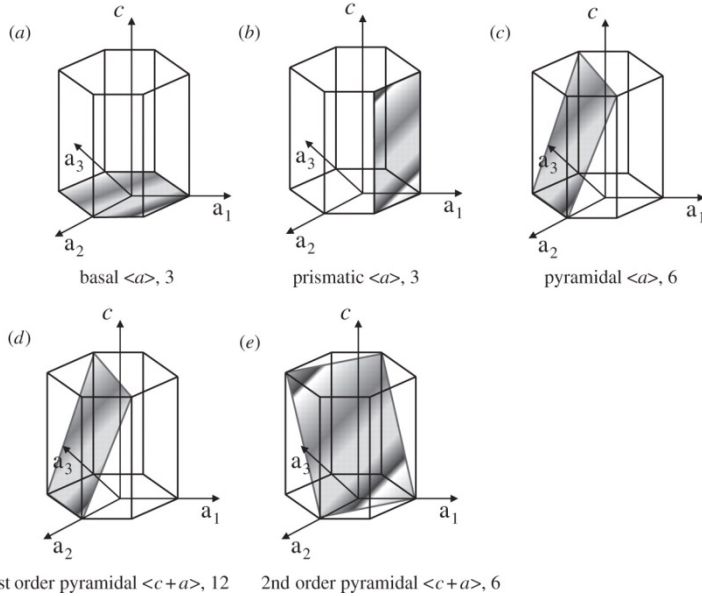
Metals	Slip Plane	Slip Direction	Number of Slip Systems
Cu, Al, Ni, Ag, Au	<b>FCC</b> $\{111\}$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W, Mo	<b>BCC</b> $\{110\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	<b>HCP</b> $\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6



# Системы скольжения в ГПУ



У металлов с ГПУ решеткой существуют базисные  $\{0001\}$ , призматические  $\{10-10\}$  и пирамидальные  $\{10-11\}$  системы скольжения.

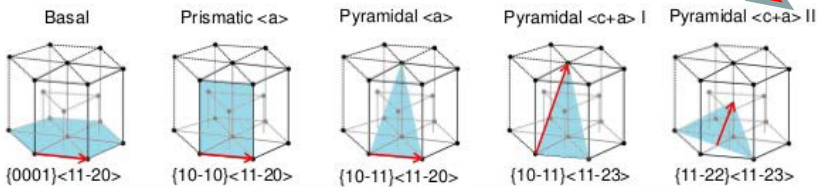


Несмотря на то, что в титане скольжение базисной плоскости  $\{0001\}$  возможно в **трех** различных направлениях, основным направлением является  $\langle 11-20 \rangle$ .

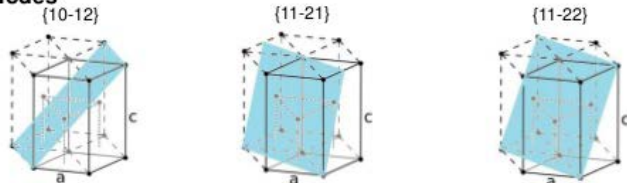
Аналогичная ситуация с призматическим и пирамидальным скольжением.

## Slip & Twinning in $\alpha$ -Titanium

### Slip Modes



### Twinning Modes

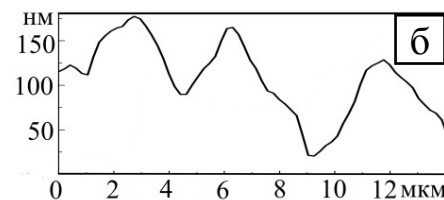
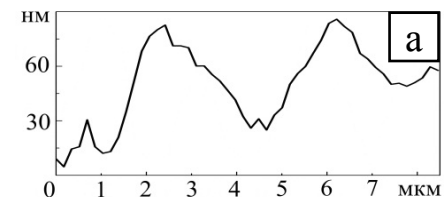
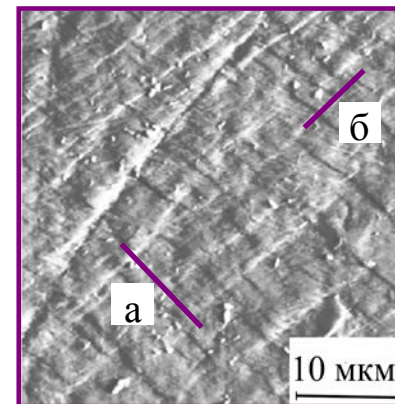


Metals	Slip Plane	Slip Direction	Number of Slip Systems
Cu, Al, Ni, Ag, Au	FCC $\{111\}$	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W, Mo	BCC $\{110\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	HCP $\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

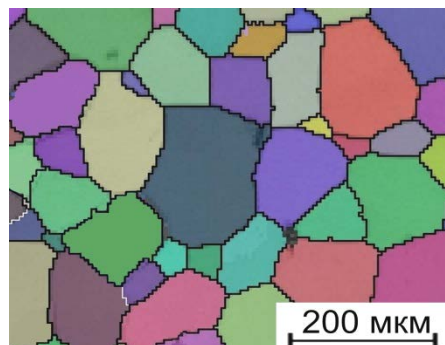
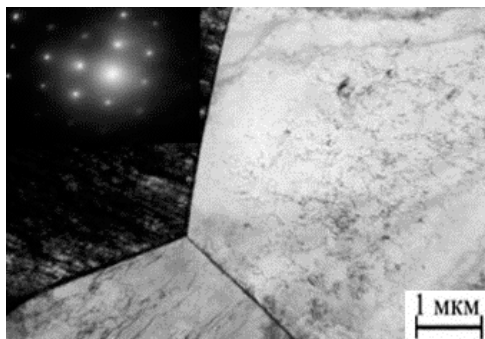


Чем больше число систем возможного скольжения в нагруженном кристалле (то есть чем в кристалле нет четкой направленности связей), тем выше их пластичность.

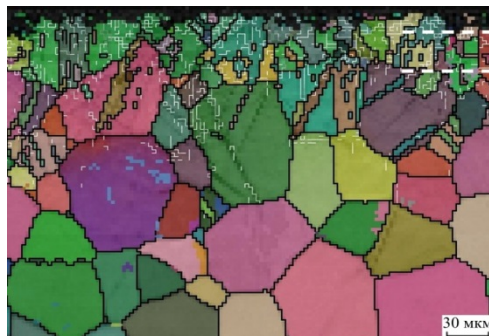
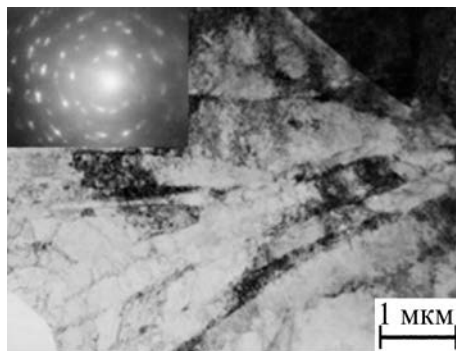
Это справедливо для металлов с ГЦК решеткой, таких как алюминий Al, медь Cu, никель Ni, серебро Ag и др.



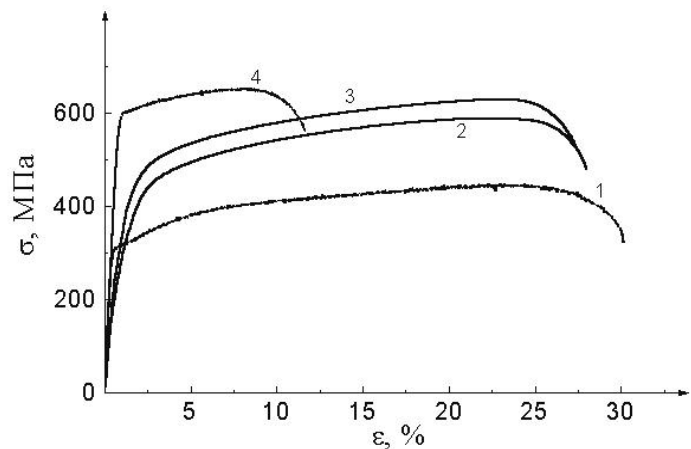
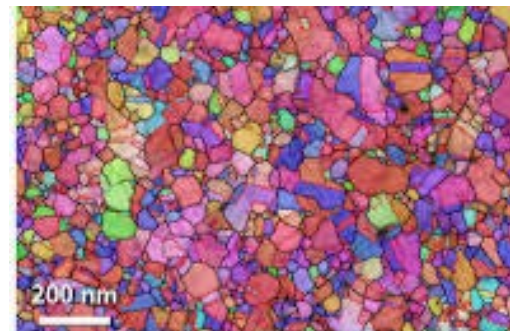
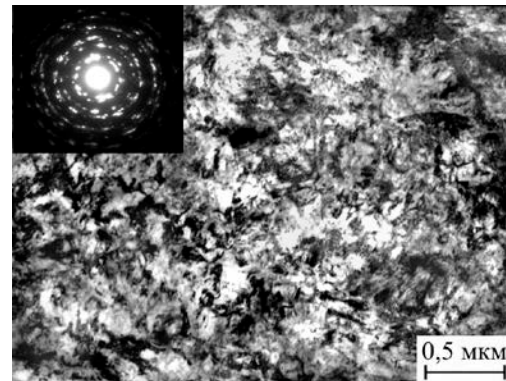
Крупнозернистый материал



Ультразвуковая обработка



РКУ-прессование



Для наноматериалов характерны высокая прочность и низкая пластичность!

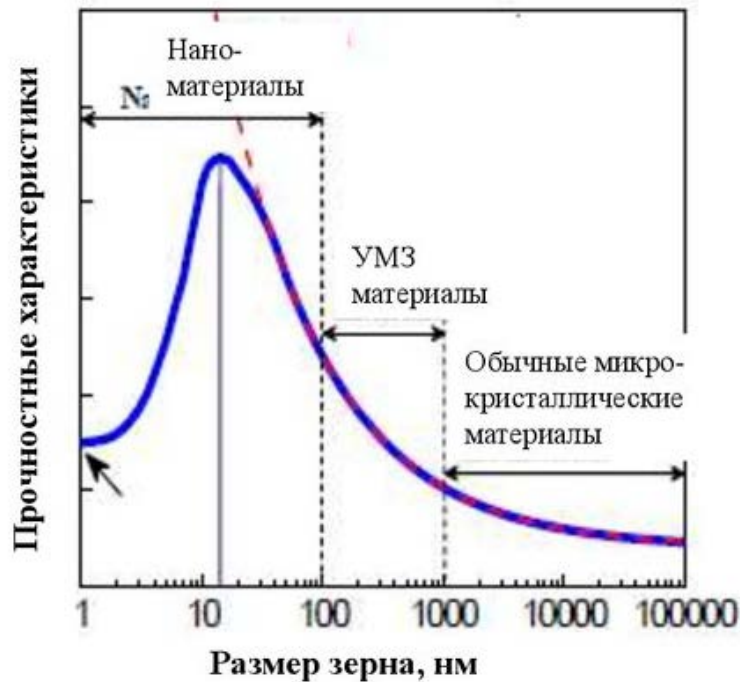
Кривые “напряжение-деформация” технического титана VT1-0, находящегося в различных структурных состояниях: рекристаллизованном (1), в состоянии проката (2), подвергнутом последующей ультразвуковой обработке (3) или равноканальному угловому прессованию (4)

# Прочность при одноосном растяжении

## Закон Холла-Петча

Хорошо известно, что границы зёрен являются барьерами для дислокаций. Поэтому уменьшение размера зерна приводит к росту прочностных характеристик. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от размера зерна  $d$  описывается законом Холла – Петча:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}}$$



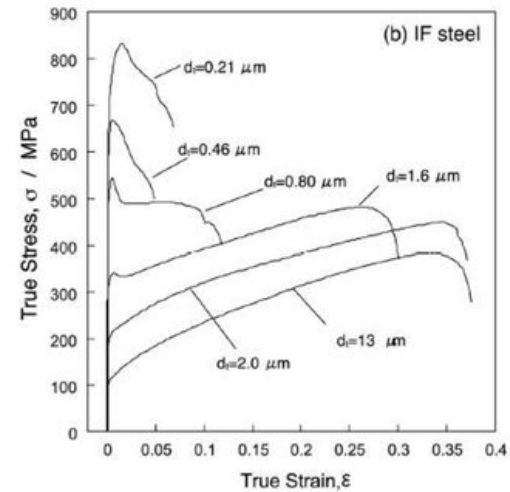
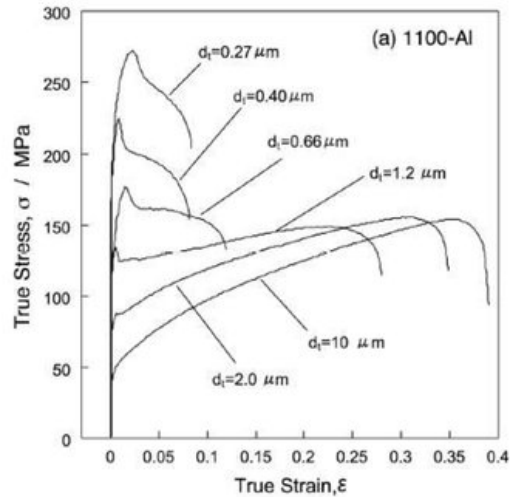
где  $\sigma_0$  — некоторое напряжение трения, которое необходимо для скольжения дислокаций в монокристалле,  
K — индивидуальная для каждого материала константа, также называемая «коэффициентом Холла-Петча».

Для **наноматериалов** с размером зерна менее ~ 50 нм соотношение Холла-Петча не выполняется!

Зависимость прочностных характеристик от размера зерен поликристалла

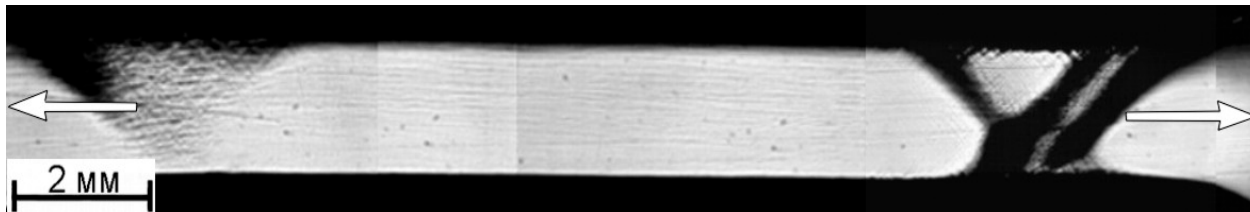


# Пластичность при одноосном растяжении



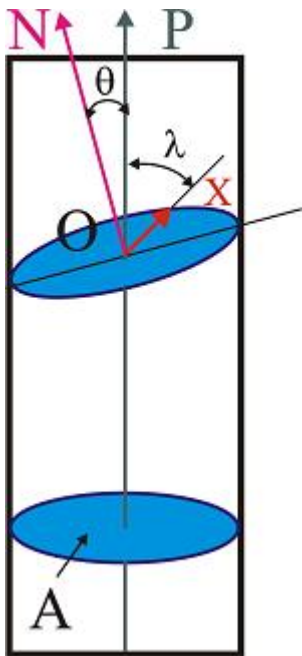
Кривые нагружения поликристаллов алюминия (а) и железа (б) с различным средним размером зерна

Низкая пластичность **наноматериалов** вызвана отсутствием деформационного упрочнения (дислокации пересекают мелкие зерна с размером зерна без взаимодействия друг с другом) и высокой склонностью к локализации деформации!



Оптическое изображение поверхности образца субмикроструктурного армко - железа, полученного по маршруту А, 4 прохода; растяжение,  $\epsilon = 6\%$

Механическое напряжение (мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием различных факторов) - это тензорная величина.



Составляющая приложенной **растягивающей силы  $P$**  в направлении скольжения равна  $P \cos \lambda$ , а площадь скольжения равна  $A / \cos \theta$ , где  $A$  – площадь поперечного сечения кристалла, перпендикулярная оси растяжения.

Отсюда так называемое **приведенное напряжение сдвига**, действующее в плоскости скольжения в направлении скольжения:

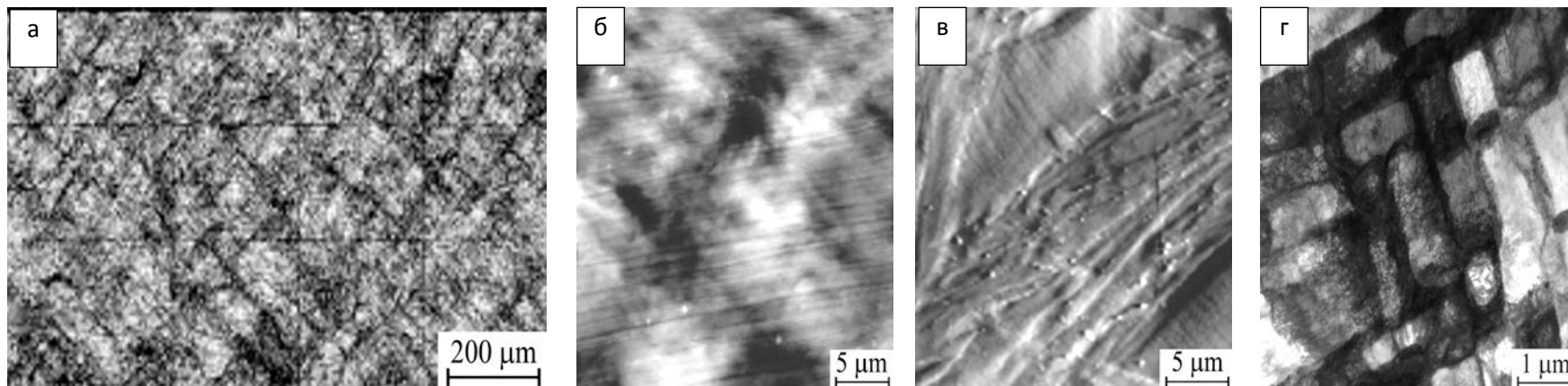
$$\tau = P \cos \lambda / (A / \cos \theta) = \sigma \cos \lambda \cdot \cos \theta,$$

где  $\sigma = P / A$  – растягивающее напряжение.

Соответственно, при заданном  $\sigma$  приведенное напряжение сдвига  $\tau$  максимально в плоскостях скольжения, расположенных **под углом  $45^\circ$  к оси растяжения**.

Характеристикой ориентации системы скольжения по отношению к растягивающей силе является *фактор Шмида* ( $\cos \lambda \cdot \cos \theta$ ).

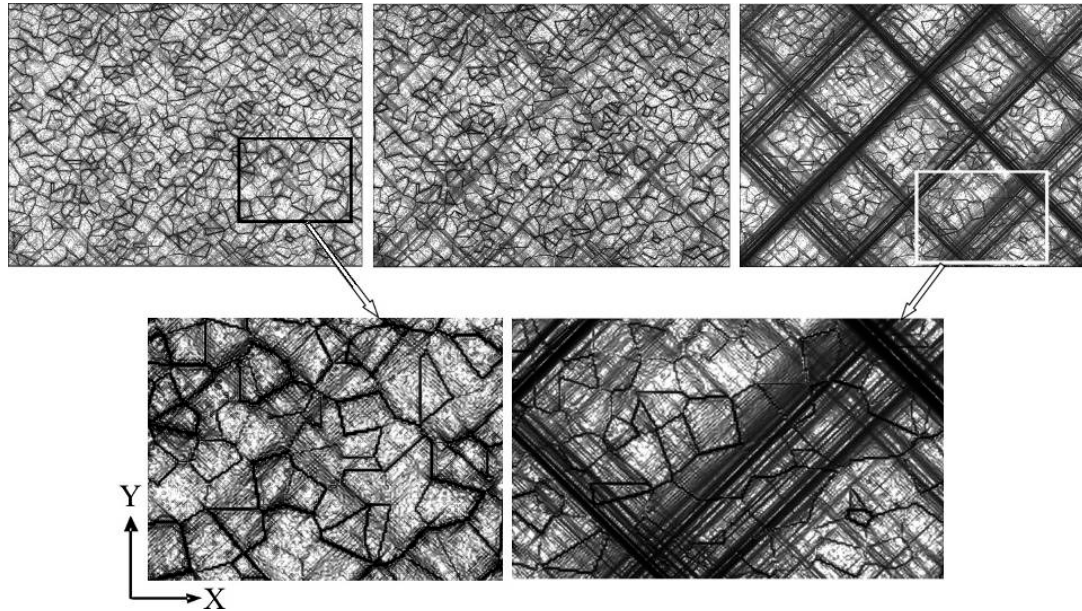
## Склонность наноматериалов к локализации деформации имеет место на различных масштабных уровнях



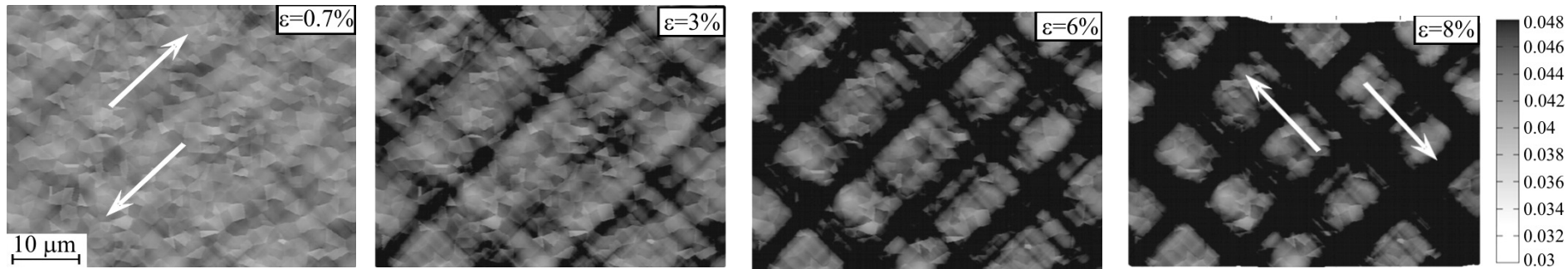
Полосы сдвига, развивающиеся в наноструктурном поверхностных слоях образцов ВТ1-0 при одноосном растяжении,  $\varepsilon = 10\%$ . Изображения получены методом оптической (а), атомно-силовой (б, в) и просвечивающей электронной микроскопией (г)



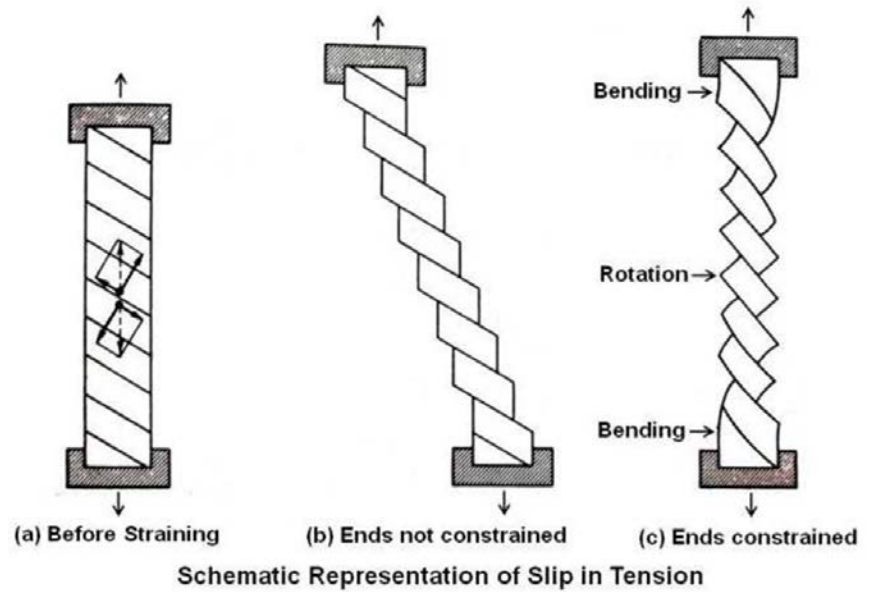
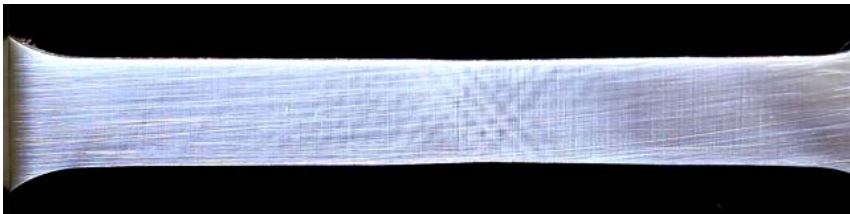
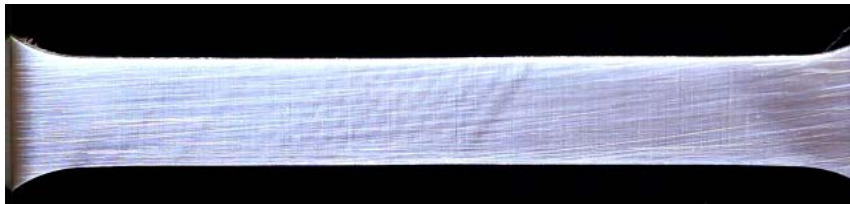
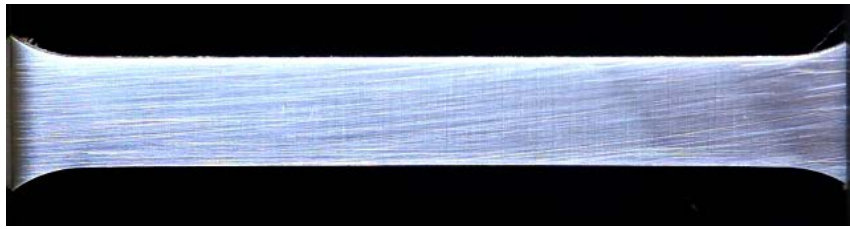
# Моделирование деформации наноматериалов



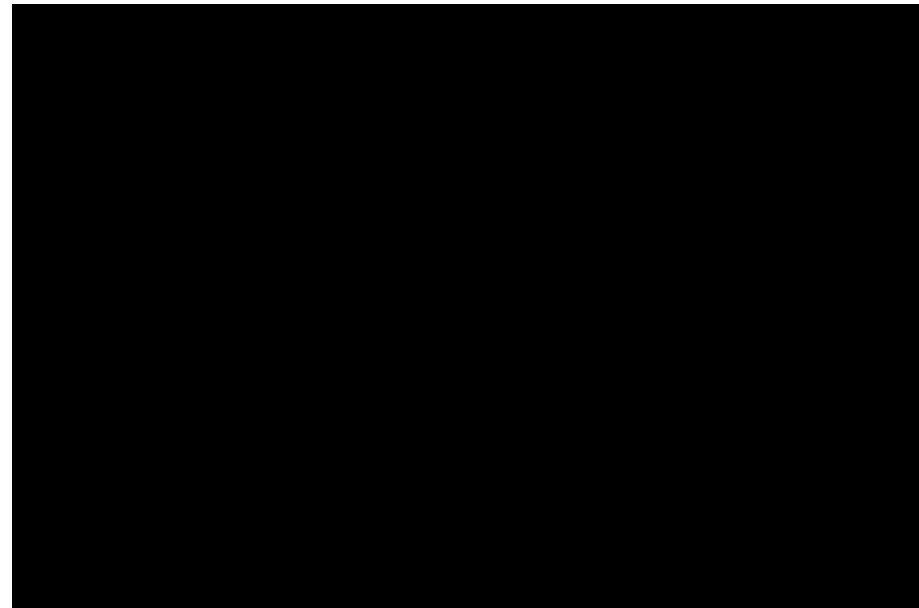
Рельеф интенсивности пластических деформаций для удлинений образца  $\varepsilon = 3$  (а,г), 4 (б) и 6 % (в,д)



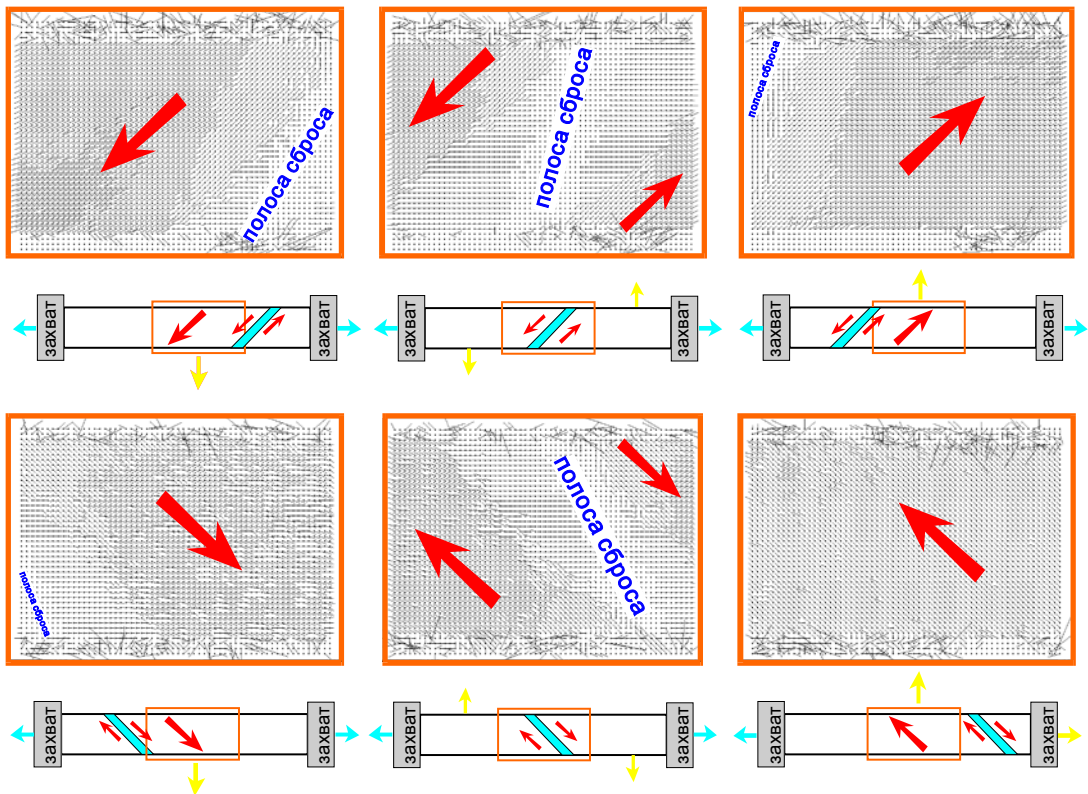
Распределения интенсивности пластических деформаций для удлинений образца  $\varepsilon=0.7$  (а), 3 (б), 6 (в) и 8 % (г)



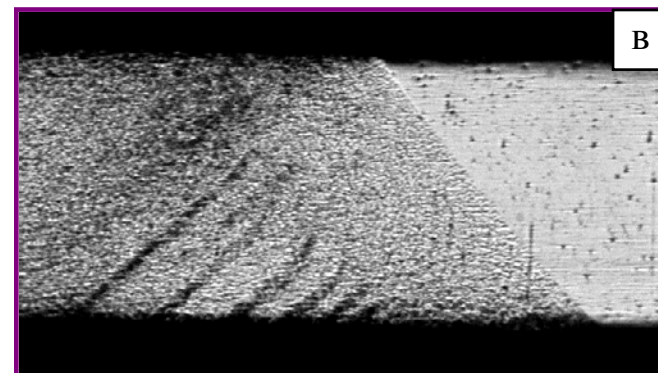
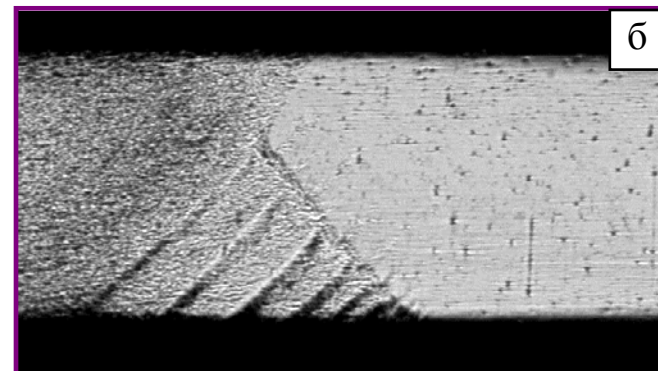
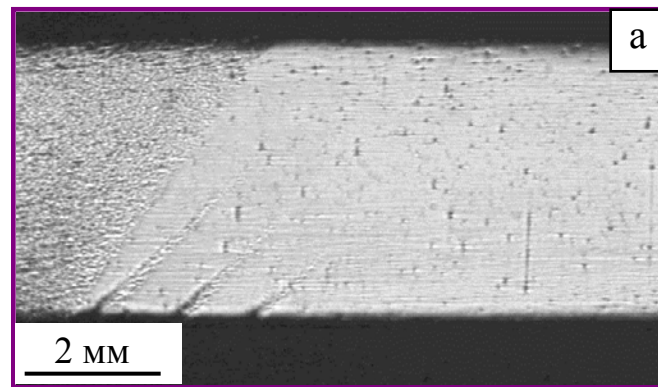
Распространение полос локализованной деформации в процессе одноосного растяжения образца алюминиевого сплава 1570



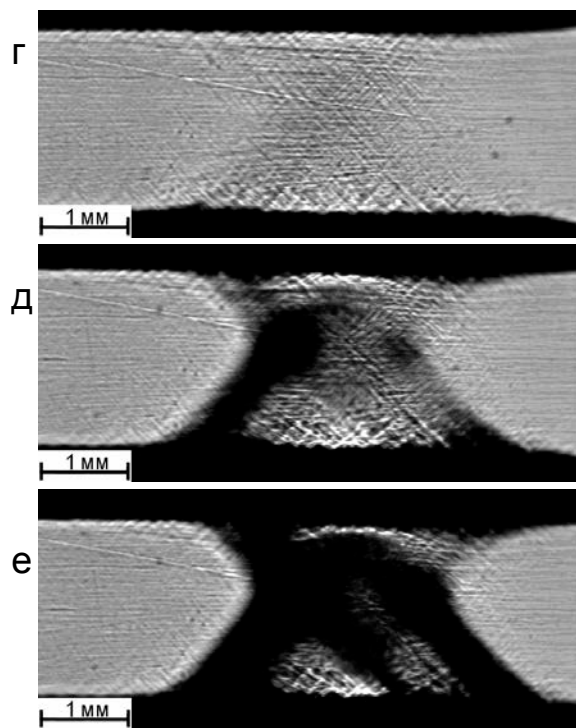
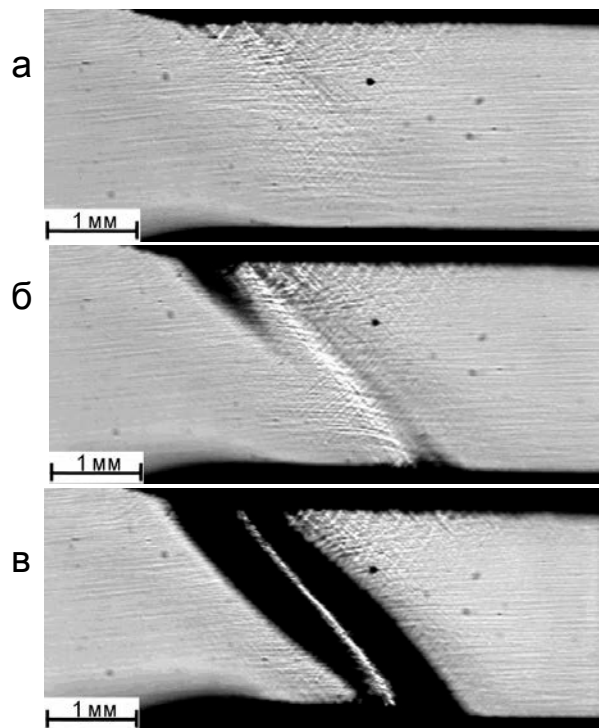




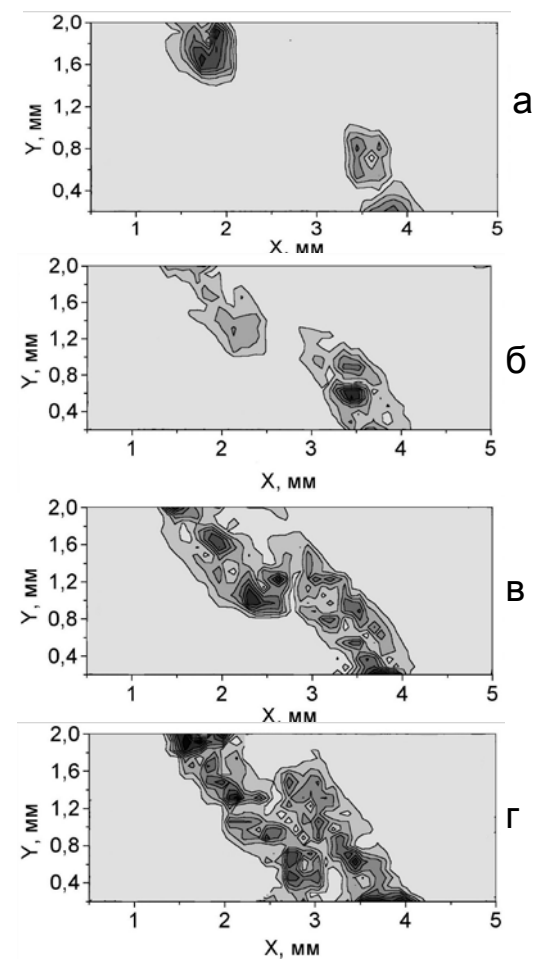
Эволюция поля векторов смещений на поверхности композита Al + 10 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при растяжении. Две последовательные стадии распространения полосы локализованной пластической деформации: справа налево (верхний ряд) и слева направо (нижний ряд)



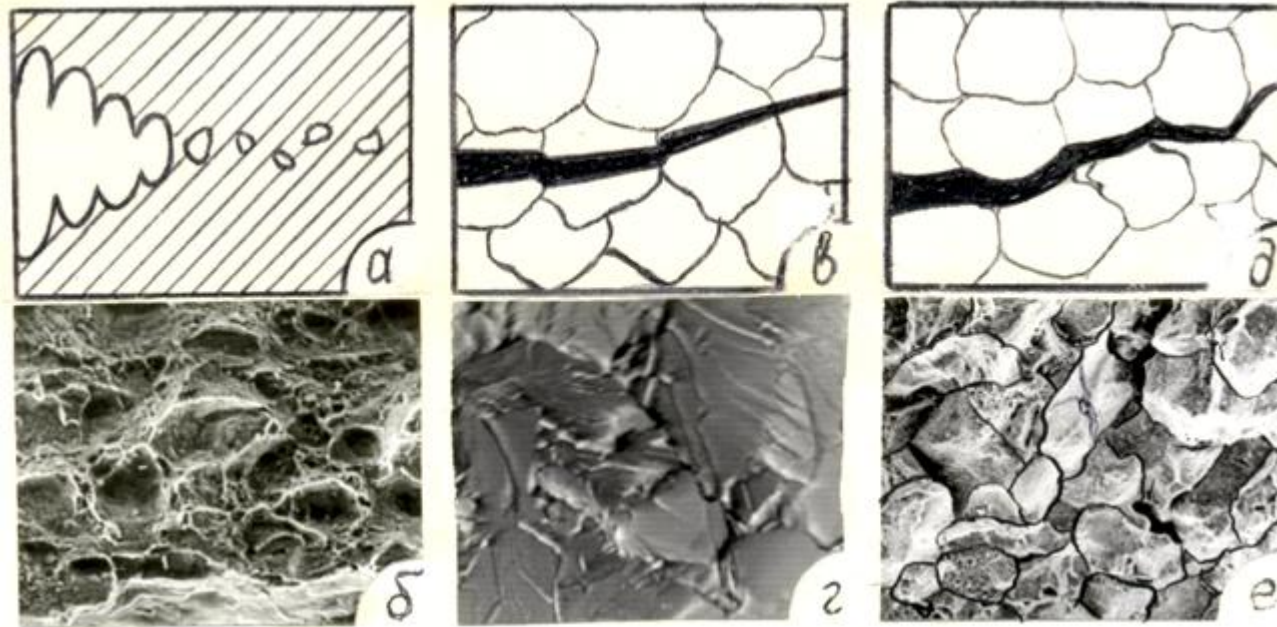
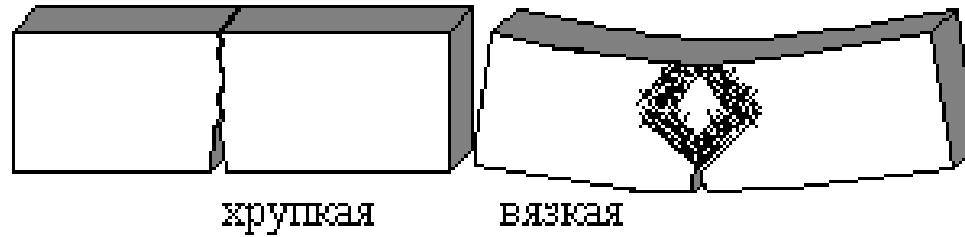
Оптические изображения поверхности образца армко-железа, подвергнутого равноканальному угловому прессованию и последующему отжигу при  $T=723$  К; одноосное растяжение,  $\epsilon=2$  (а), 2,5 (б) и 3 % (в)



Различные виды распространения мезо- и макрополос локализованной деформации; растяжение,  $\varepsilon = 3$  (а, г), 4 (б, д) и 5 % (в, е)



## Разрушение



Механизм разрушения и соответствующий макрорельеф вязкого (а, б) и хрупких (в - е) изломов.

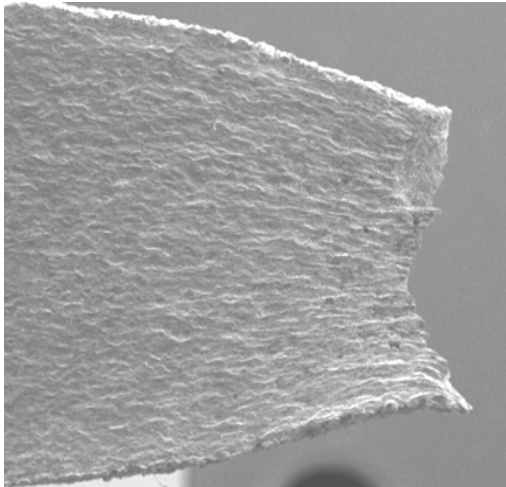
а, б- ямочное разрушение;

в, г- скол (транскристаллитное хрупкое разрушение);

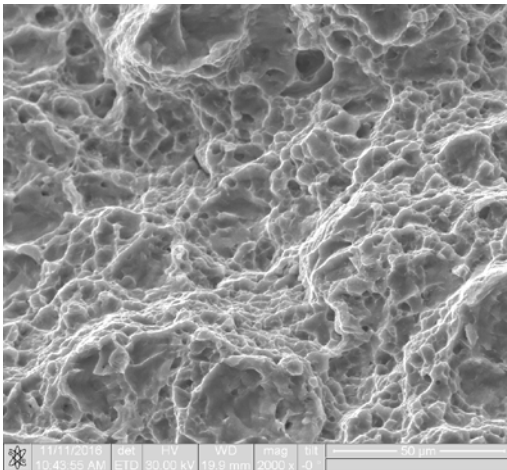
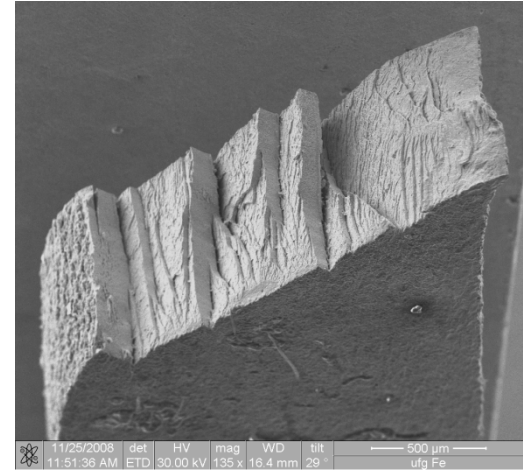
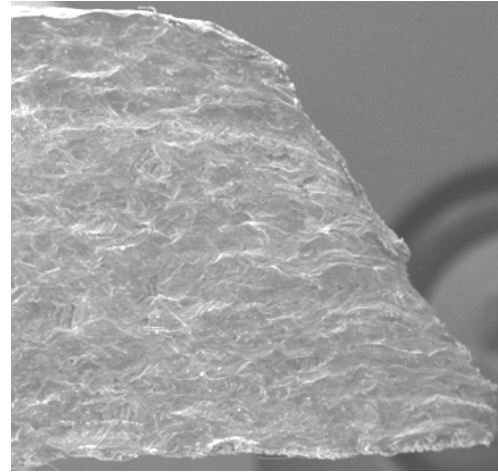
д, е- межзеренное (интеркристаллитное хрупкое разрушение)



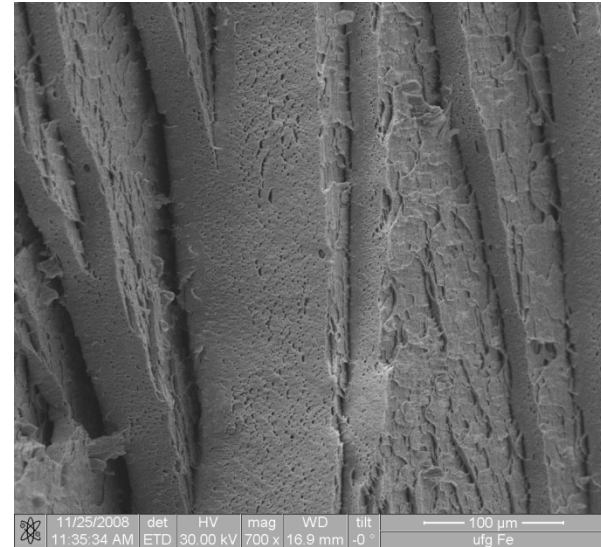
# Вязкое и хрупкое разрушение



а



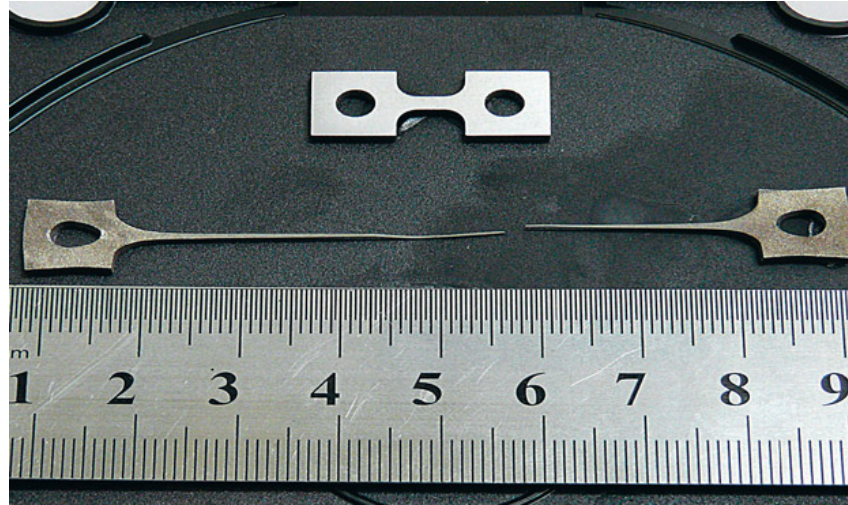
б



РЭМ-изображения плоской поверхности (а, в) и поверхности излома (б, г) растянутых до разрушения образцов ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки (а, б) и подвергнутых предварительной ультразвуковой обработке (в, г)



**Сверхпластичность** — состояние материала, имеющего кристаллическую структуру, которое допускает деформации, на порядок превышающие максимально возможные для этого материала в обычном состоянии.



В сверхпластичном состоянии в материалах действуют следующие механизмы деформации:

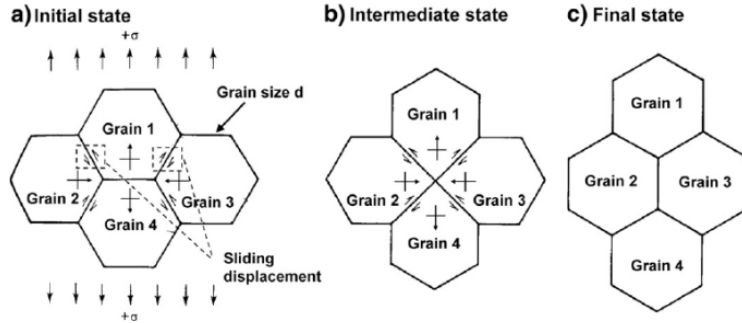
- зернограничное скольжение
- внутризеренное дислокационное скольжение
- диффузионная ползучесть

Сверхпластичность появляется только при благоприятной комбинации указанных механизмов деформации, развивающихся при определенных скорости и температуре нагружения)

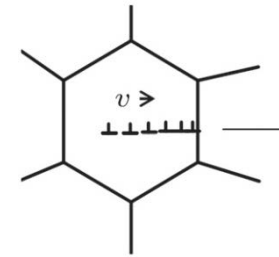
Сложность явления сверхпластичности не позволяет в одном эксперименте однозначно определить действующие механизмы деформации.

# Механизмы, ответственные за сверхпластическое состояние

1. **Зернограничное скольжение** - смещение (или разворот) зерен относительно соседних по их границам



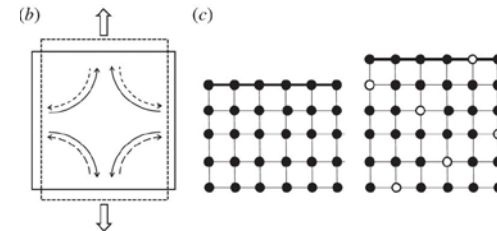
2. **Внутризеренное дислокационное скольжение**, обусловленное движением решеточных дислокаций в объеме зерен



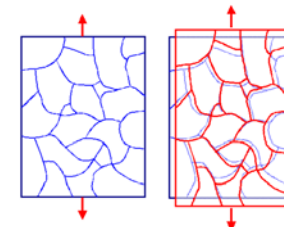
3. **Диффузионная ползучесть**, связанная с активизацией диффузионных процессов.

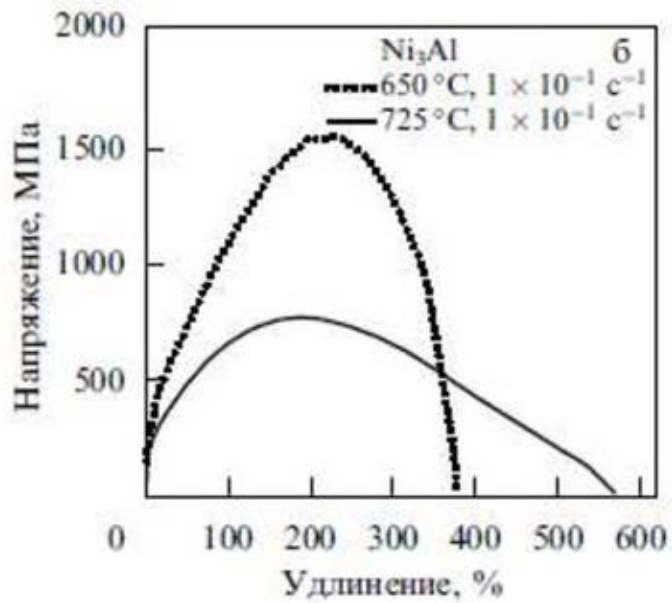
В наноматериалах сильно возрастают значения коэффициентов диффузии за счет диффузии по границам зерен.

Различают два вида диффузионной ползучести - **ползучесть Набарро-Херринга**, при которой диффузионные потоки направлены по объему зерен,

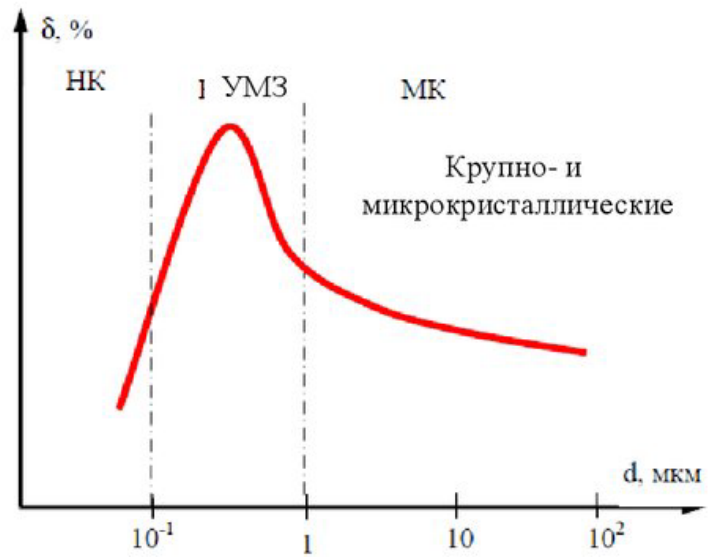


- **ползучесть Кобла**, когда эти потоки идут по границам зерен





Диаграммы нагружения нанокристаллического соединения  $\text{Ni}_3\text{Al}$  в режиме сверхпластичности (малая скорость деформации и повышенные температуры деформации)



Зависимость относительного удлинения в режиме сверхпластичности от исходного размера зерна

# Системы скольжения в кубической плотноупакованной решетке

## Slip planes in a ccp crystal

Slip planes in ccp are the close-packed planes

