

*Курс «Границы зерен в наноматериалах»*

*Лекция 5*

Зернограничное  
проскальзывание и миграция  
границ зерен

# Содержание

Проскальзывание в бикристаллах: специальные ГЗ, произвольные ГЗ.

Собственное и стимулированное ЗГП.

ЗГП по неплоским границам зерен. Диффузионная аккомодация.

ЗГП в поликристаллах. Прохождение ЗГП через стыки зерен.

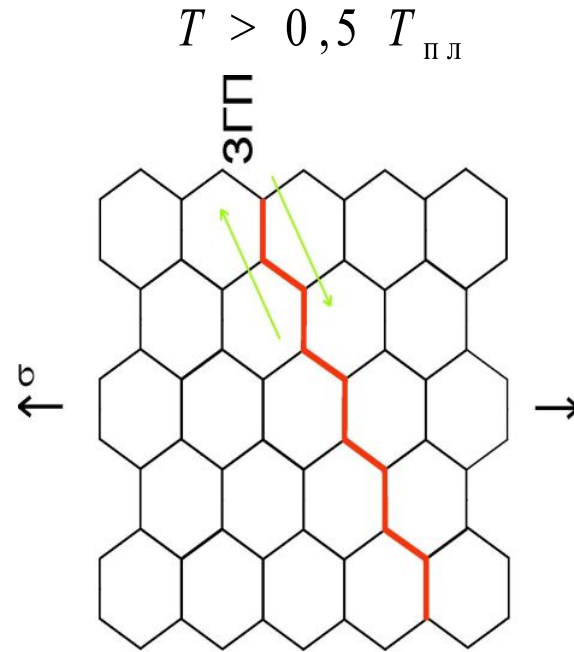
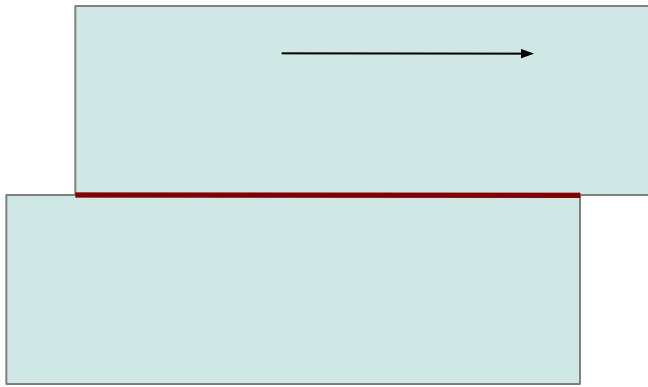
Кооперированное ЗГП и сверхпластичность.

Механизмы миграции ГЗ. Движущие силы миграции.

Связь миграции границ зерен и ЗГП.

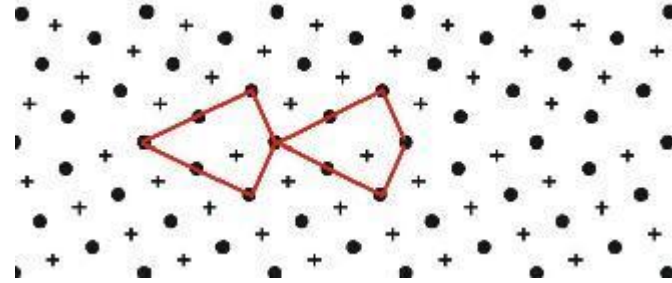
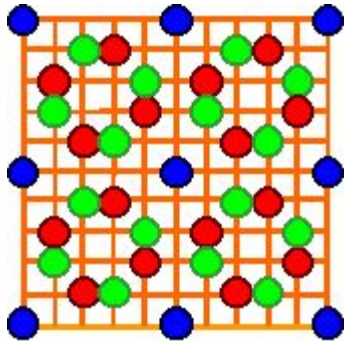
Миграция ГЗ и рост зерен.

# Определение и роль ЗГП



ЗГП — это взаимное смещение двух соприкасающихся зерен в направлении, параллельном границе между ними. ЗГП является одним из основных механизмов деформации поликристаллов при высоких температурах, основным — при сверхпластической деформации. ЗГП сильно зависит от вида и структуры ГЗ.

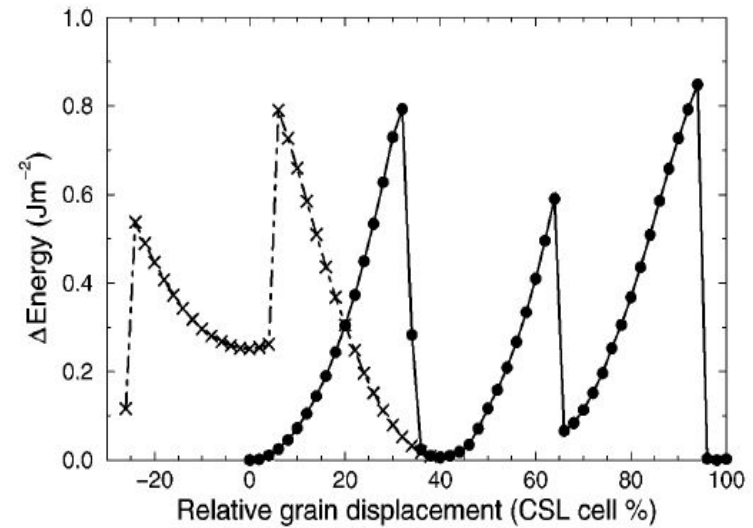
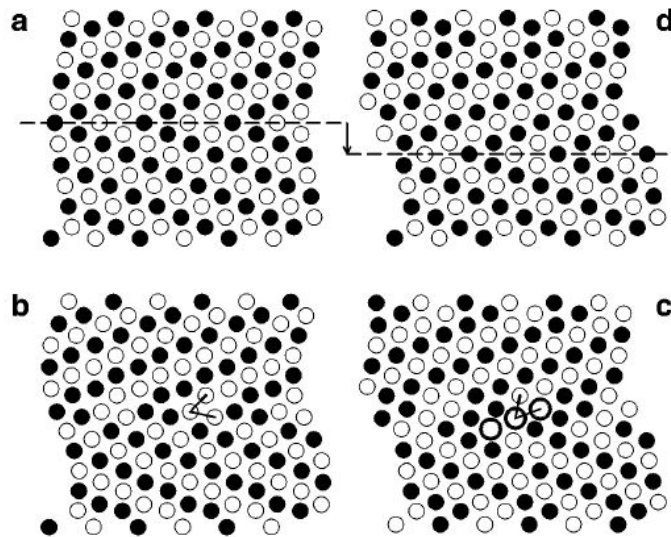
# Ячейка неидентичных смещений (сдвигов)



Ввиду периодичности моделируемых ГЗ, существует так называемая *ячейка неидентичных смещений*, которая содержит все трансляции вдоль плоскости границы, приводящие к физически неэквивалентным структурам. В случае границ кручения трансляция на любой вектор ПРН в плоскости границы не изменяет ее структуру, поэтому ячейка неидентичных смещений представляет собой ячейку Вигнера-Зейтца элементарных векторов ПРН, лежащих в плоскости границы. В случае же границ наклона элементарными векторами, не изменяющими структуру ГЗ, являются кратчайшие векторы решетки, лежащие в плоскости границы, поэтому ячейка неидентичных сдвигов совпадает с ячейкой Вигнера-Зейтца этих векторов.

# Взаимное смещение зерен вдоль специальной ГЗ

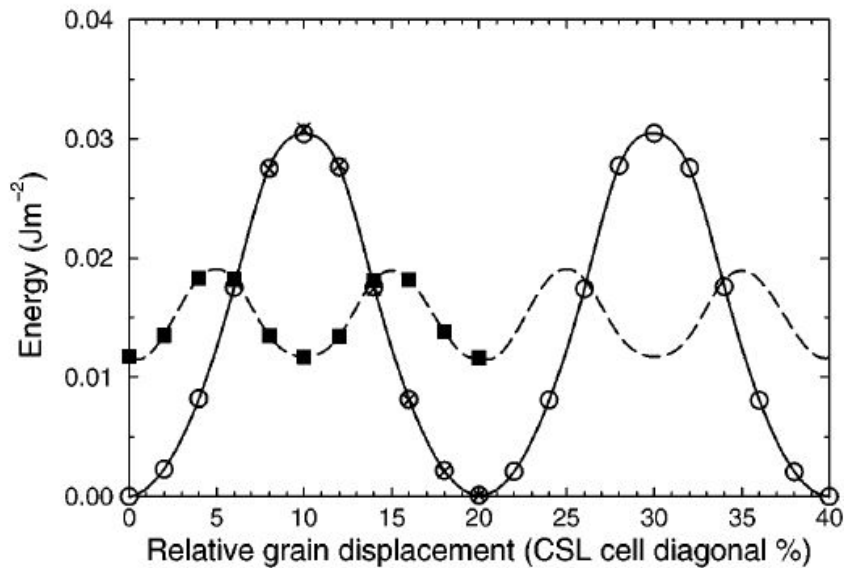
Molteni C. Phys. Rev. B. 1997. 79. P. 869



Изменение структуры и энергии границы  $\Sigma=11(113)$  в Al при взаимном смещении зерен в направлении нормали к оси наклона  $[1,-1,0]$ . Изменение энергии при сдвиге сопоставимо с энергией самой ГЗ. Для сдвига необходимы очень высокие напряжения — как при одновременном сдвиге по кристаллографической плоскости по Френкелю

# Проскальзывание по границе кручения

Molteni C. Phys. Rev. B. 1997. 79. P. 869



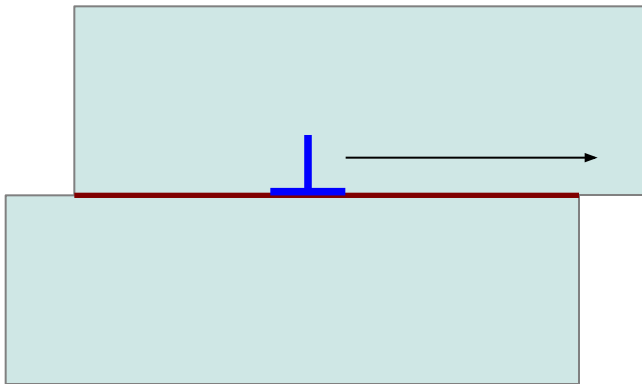
кружочки — трансляционное состояние (0,0)  
крестики —  $(-1/20, 1/20)$  периода РСУ

Граница кручения  $\Sigma=5$  (001) в Al

Энергия меняется с периодом, равным периоду ПРН. Приращение энергии весьма мало. При увеличении  $\Sigma$  изменения энергии и период ПРН сводятся к нулю — в произвольных ГЗ сдвиг не меняет энергию ГЗ

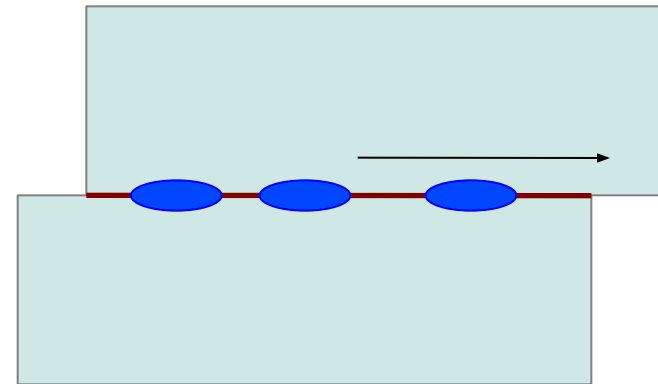
# Механизмы ЗГП в специальных и произвольных ГЗ

Специальные ГЗ:  
границы наклона,  
границы кручения с малым  $\Sigma$



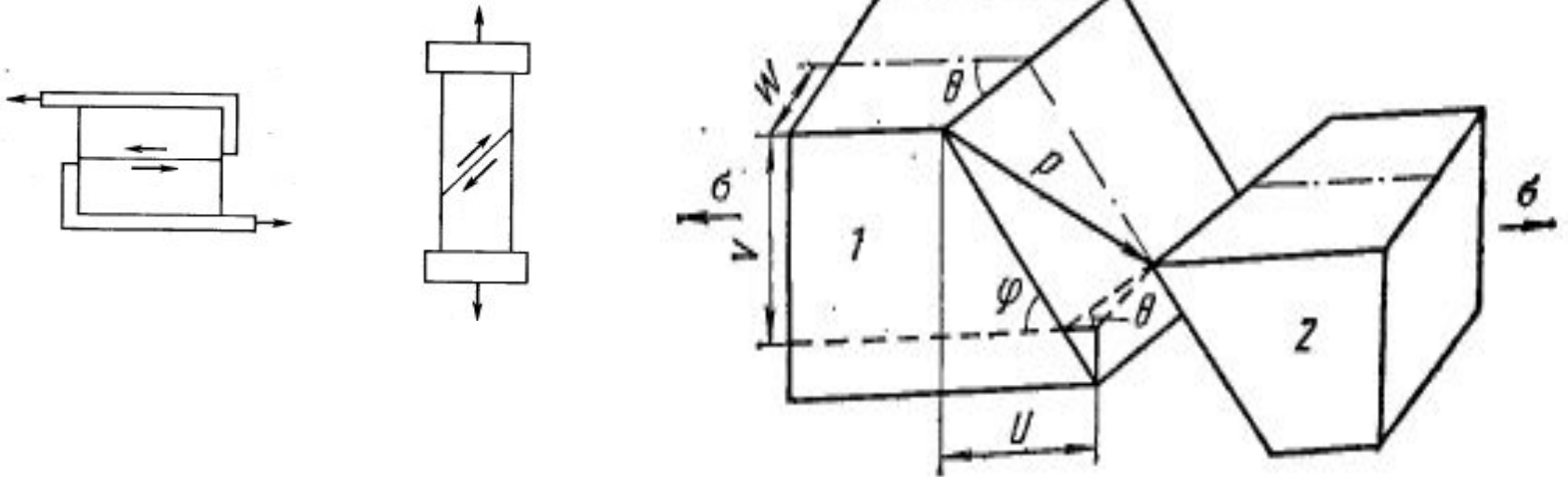
ЗГП происходит путем движения ЗГД.  
Возможные источники ЗГД: источники в  
самой ГЗ, диссоциация ЗГРД

Произвольные ГЗ:  
высокоэнергетичные  
границы кручения с большим  $\Sigma$



ЗГП происходит путем локальных  
перестроек неупорядоченной атомной  
структуры ГЗ, как при деформации  
аморфных металлов или вязком течении  
жидкости

# Методы измерения величины ЗГП



Используются бикристаллы.

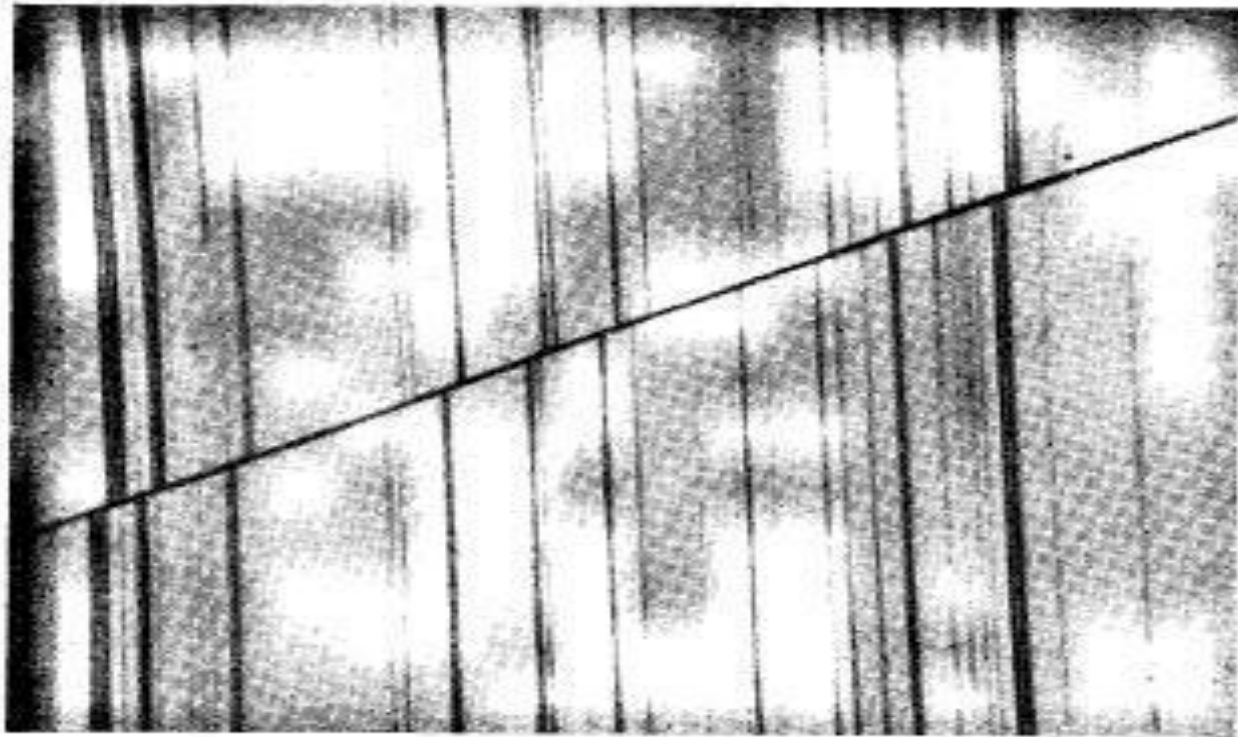
Деформация простым сдвигом или растяжением.

Измеряется относительное смещение зерен как функция времени при различных напряжениях, температуре, виде и угле разориентировки, ориентациях плоскостей скольжения зерен по отношению к оси деформации

Компоненты  $u$ ,  $w$  измеряются методом рисок; компонента  $v$  — методом реплик, интерферометрии и атомно-силовой микроскопии.

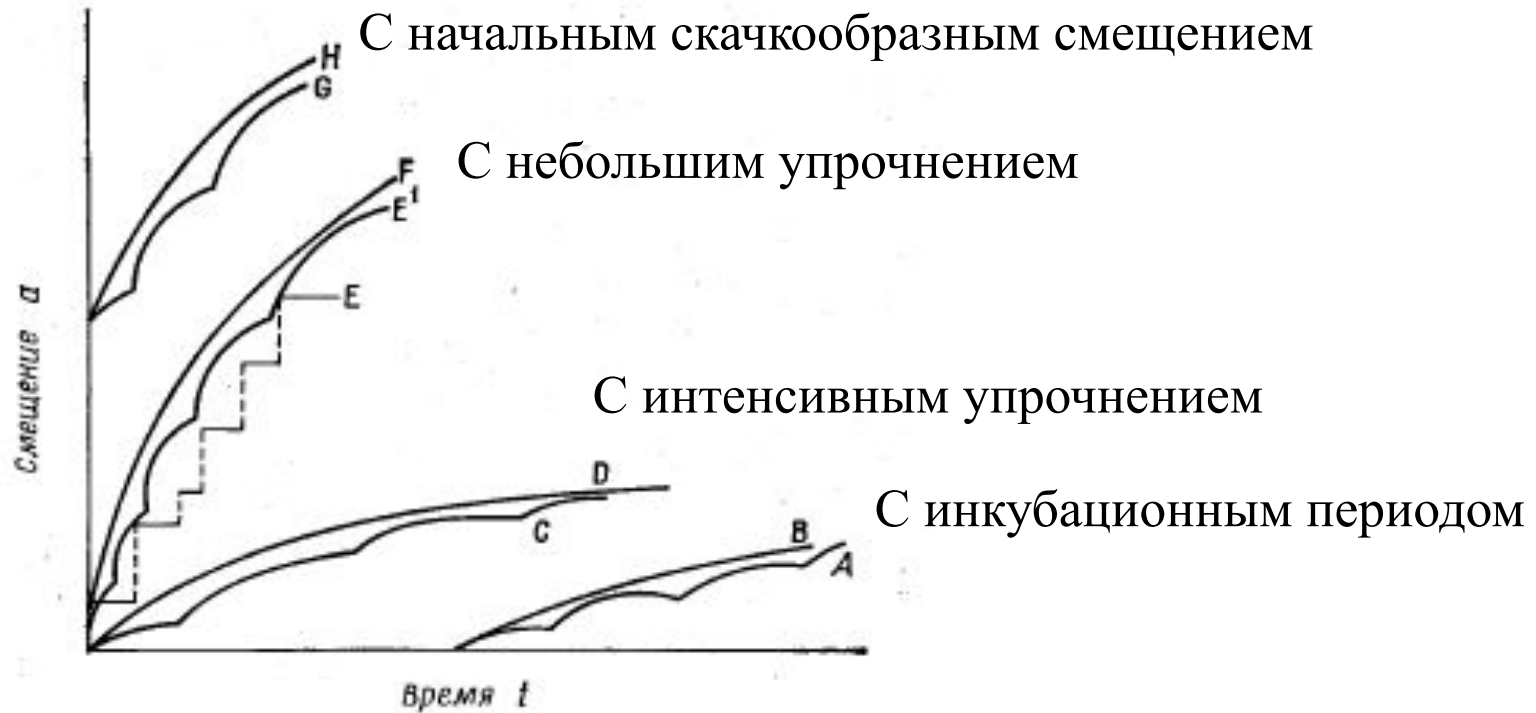


## Вид поверхности образца с рисками после ЗГП



Обычно смещение рисок неоднородно (в разных участках границы разные). Для количественного анализа ЗГП значения смещения усредняют по всей наблюдаемой области ГЗ

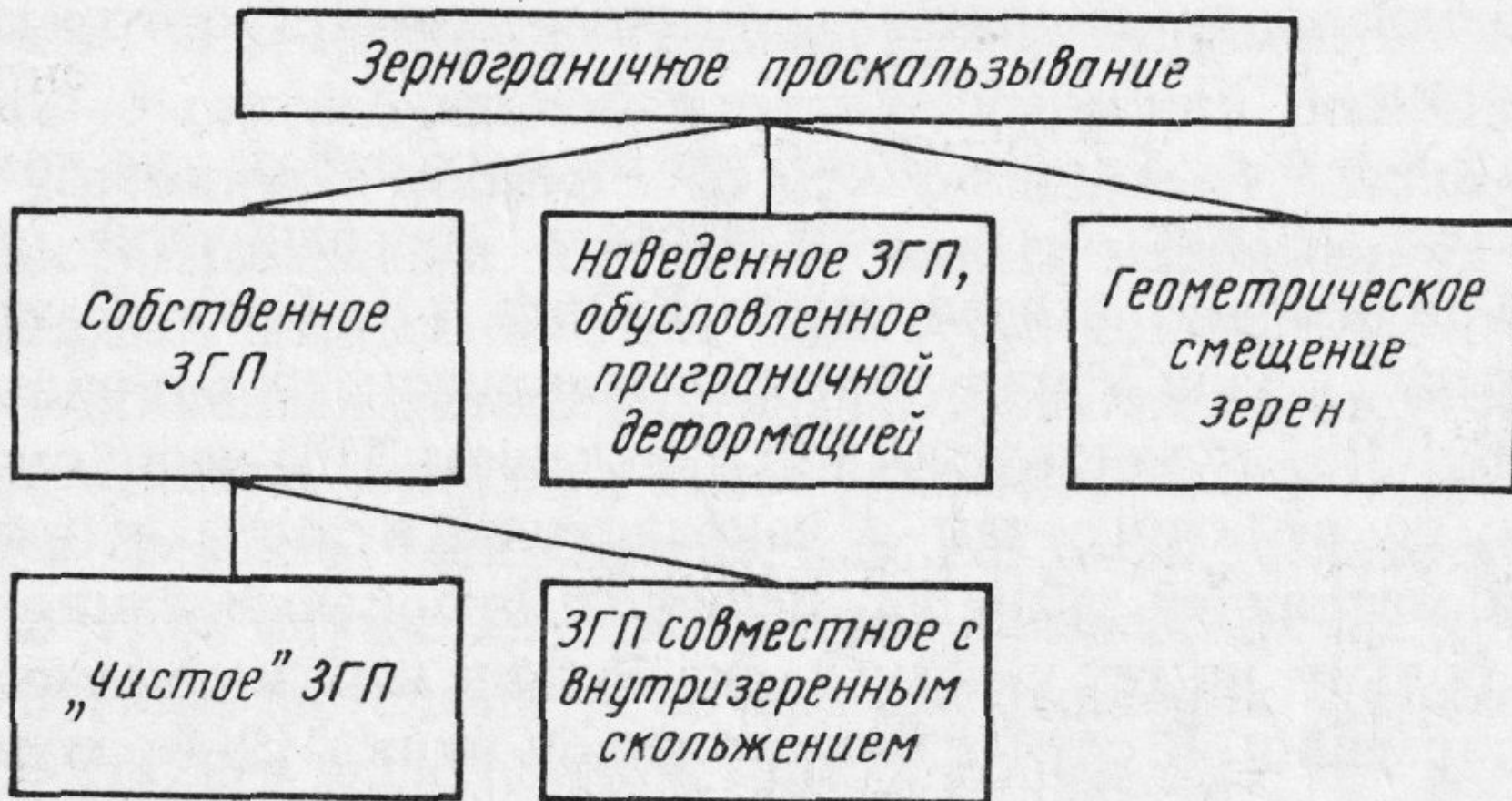
# Виды зависимости $S(t)$ при ЗГП



Чаще всего смещения происходят скачками. Кривая типа Н (G) наблюдается при высоких температурах.

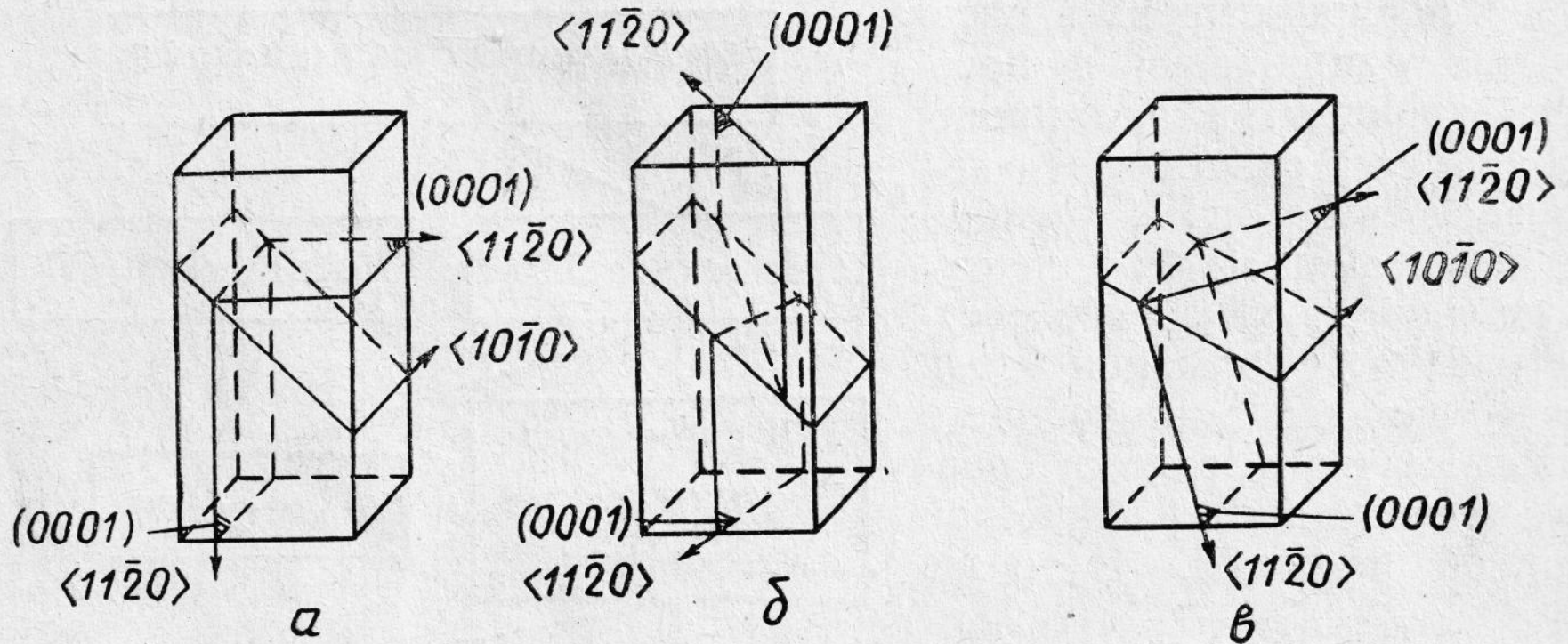
# Классификация видов ЗГП

О.А. Кайбышев, Р.З. Валиев. Границы зерен и свойства металлов. 1987



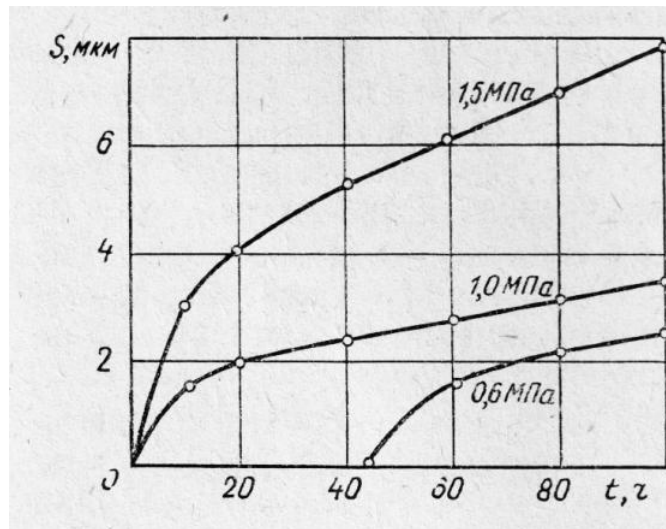
# Исследование ЗГП в бикристаллах Zn

Р.З. Валиев, В.Г. Хайруллин, А.Д. Шейх-Али. 1991

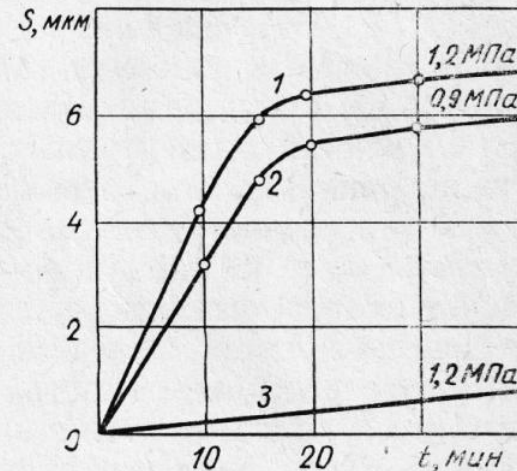


а — образец I типа без внутризеренного скольжения с границей наклона;  
б — образец II типа без внутризеренного скольжения с границей кручения;  
в — образец III типа в ненулевых касательных напряжениях в плоскостях скольжения и границы (ЗГП совместно с ВЗС)

# Кривые $S(t)$ при ЗГП в образцах I и III типа



Образцы I типа  
(чистое ЗГП)



Образцы III типа (1,2)  
Образец I типа (3)

1. Чистое ЗГП: инкубац. период при малых  $t$ , то есть есть пороговое напряжение для ЗГП. Скорость ЗГП уменьшается с  $t$ , то есть есть упрочнение
2. ЗГП совместно с ВЗС: начальная скорость более чем на порядок выше, чем при чистом ЗГП (стимулированное внутризеренным скольжением ЗГП)

# Зависимость скорости ЗГП от напряжения и температуры

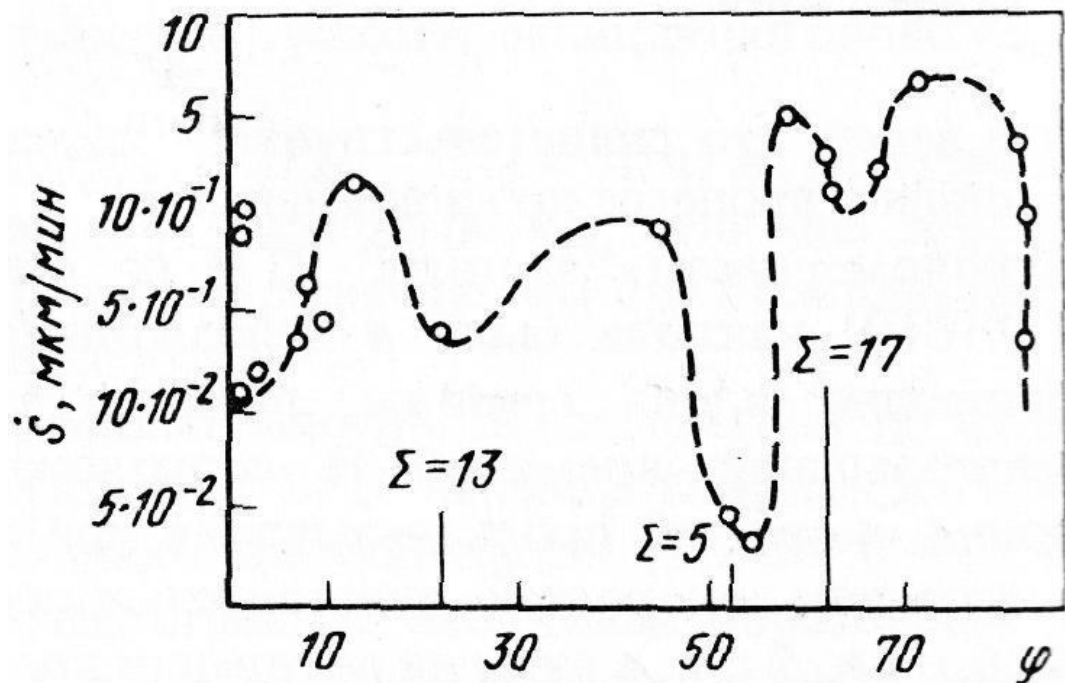
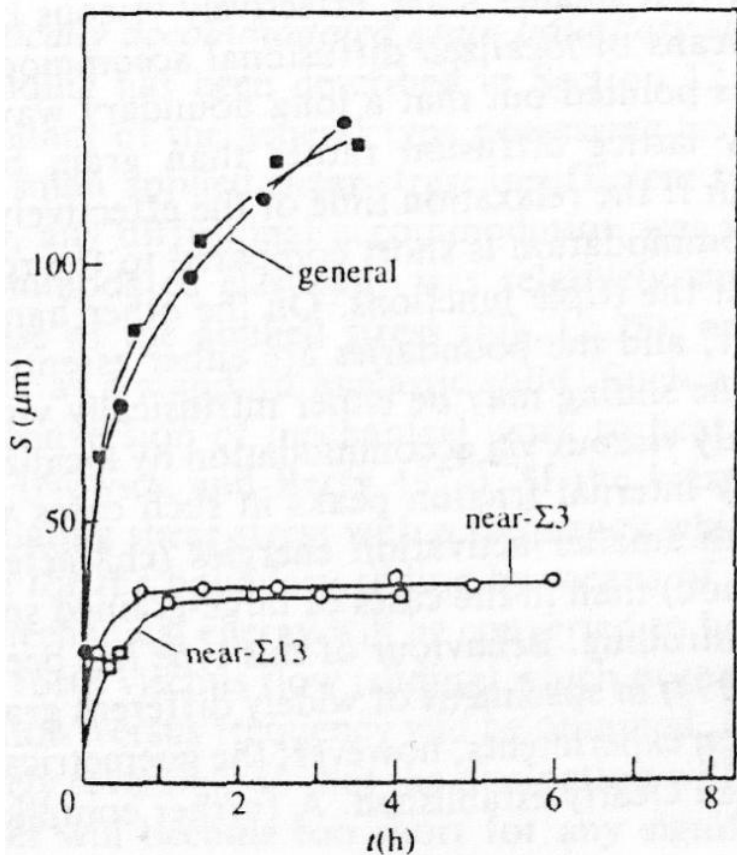
$$\text{Чистое ЗГП: } \dot{S} \propto \sigma \exp\left(-\frac{Q_B}{RT}\right)$$

$$\text{ЗГП с ВЗС: } \dot{S}_0 \propto \sigma^2 \exp\left(-\frac{Q_B}{RT}\right)$$

$\dot{S}_0$  - скорость стимулированного ВЗС ЗГП в начальной стадии

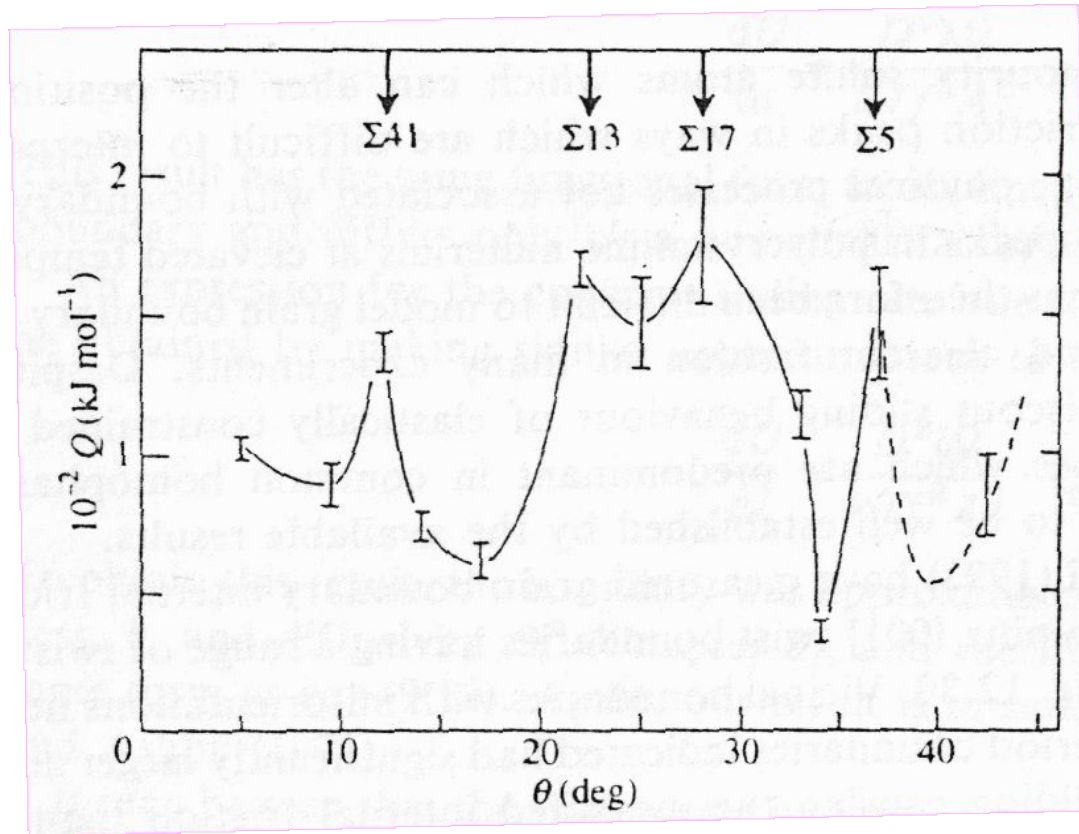
В обоих случаях скорость ЗГП контролируется зернограничной диффузией

# Зависимость скорости ЗГП от параметров ГЗ



Скорость ЗГП на порядок ниже в специальных ГЗ, чем в обычных (как при чистом ЗГП, так и при стимулированном). При стимулированном ЗГП общие ГЗ легче поглощают решеточные дислокации, этим объясняется высокая скорость ЗГП в них.

# Зависимость энергии активации ЗГП от параметров ГЗ

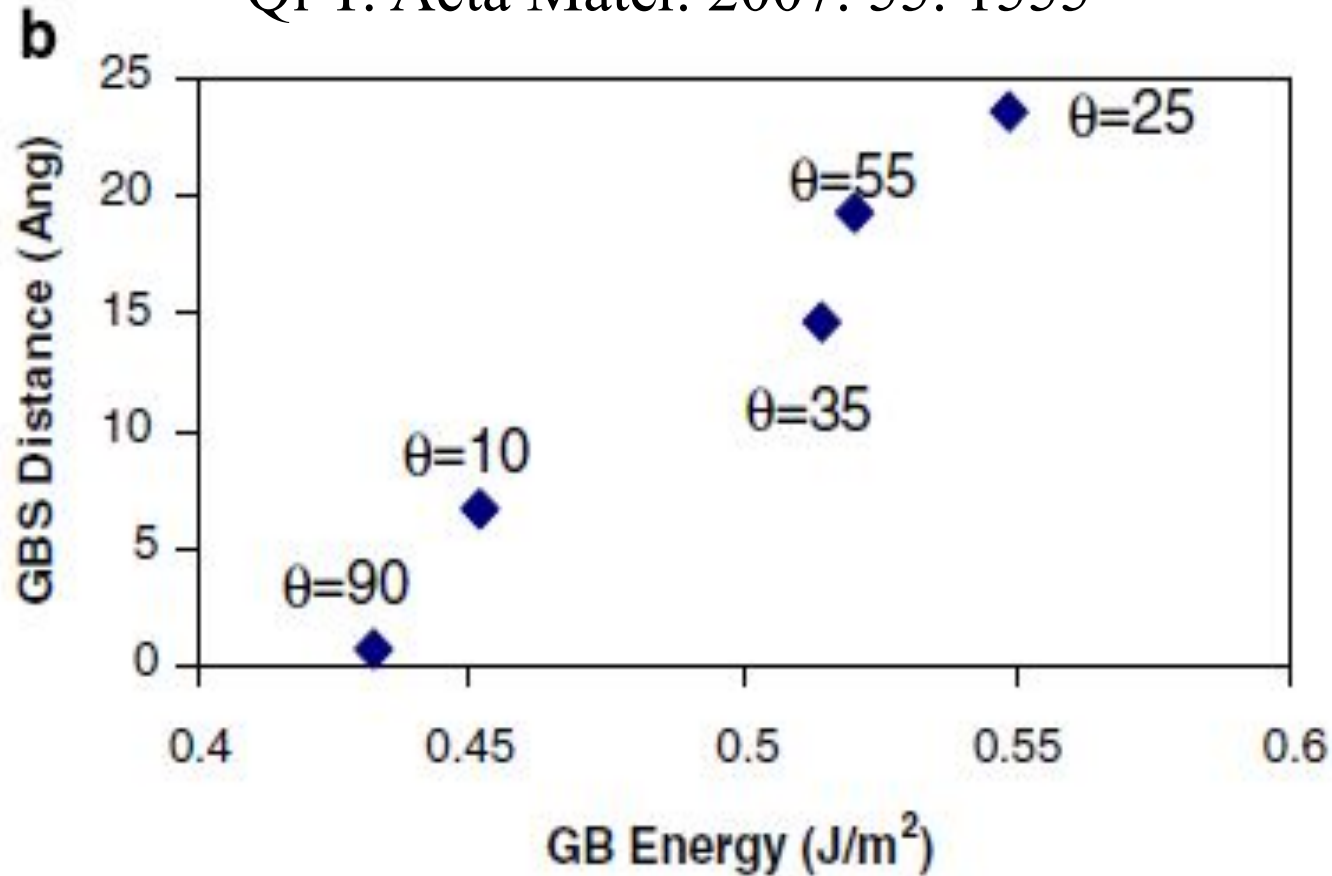


Данные получены измерением внутреннего трения (т. е. соответствуют чистому ЗГП)



# Соотношение скорости ЗГП и энергии ГЗ

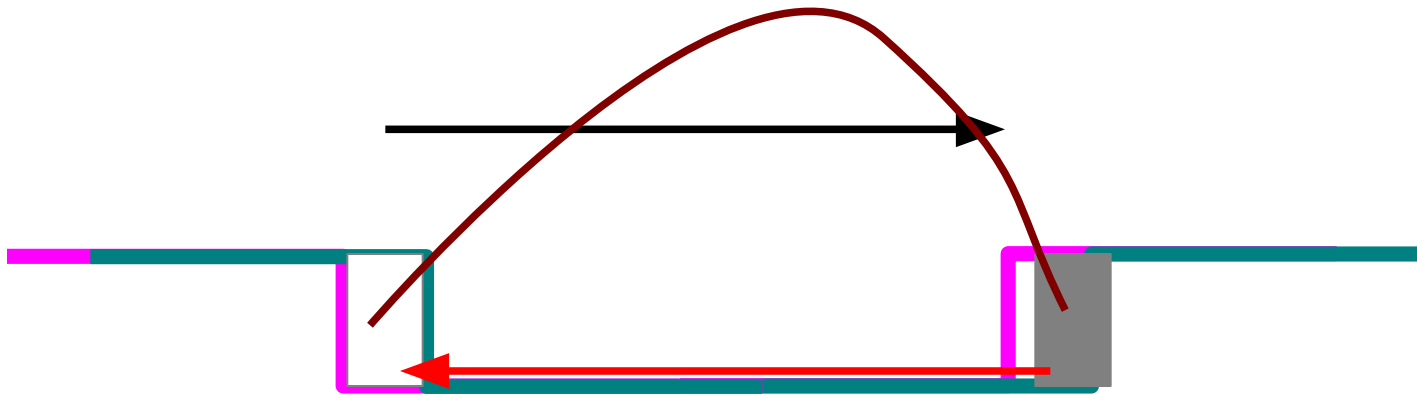
Qi Y. Acta Mater. 2007. 55. 1555



Al, моделирование МД, граница наклона  $\langle 110 \rangle$

# ЗГП в неплоских ГЗ

Raj R., Ashby M.F. 1971



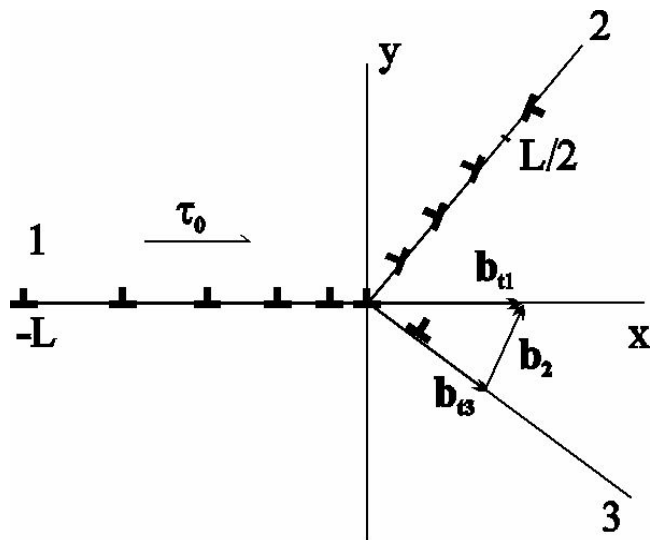
$$\frac{dU}{dt} \approx \frac{D_L L \Omega}{kT h^2} \tau$$

$$\frac{dU}{dt} \approx \frac{D_b \delta \Omega}{kT h^2} \tau$$

1. Появляются зоны перекрытия и пустот.
2. Материал из зон перекрытия в пустоты диффузионно переносится через зерна (решеточная диффузия) или по ГЗ (зернограничная диффузия)
3. По мере переноса вещества ЗГП продолжается.
4. Скорость ЗГП контролируется этим диффузионным переносом.

# Прохождение ЗГП через тройные стыки зерен

A.A. Nazarov. Mater. Sci. Forum. 1997

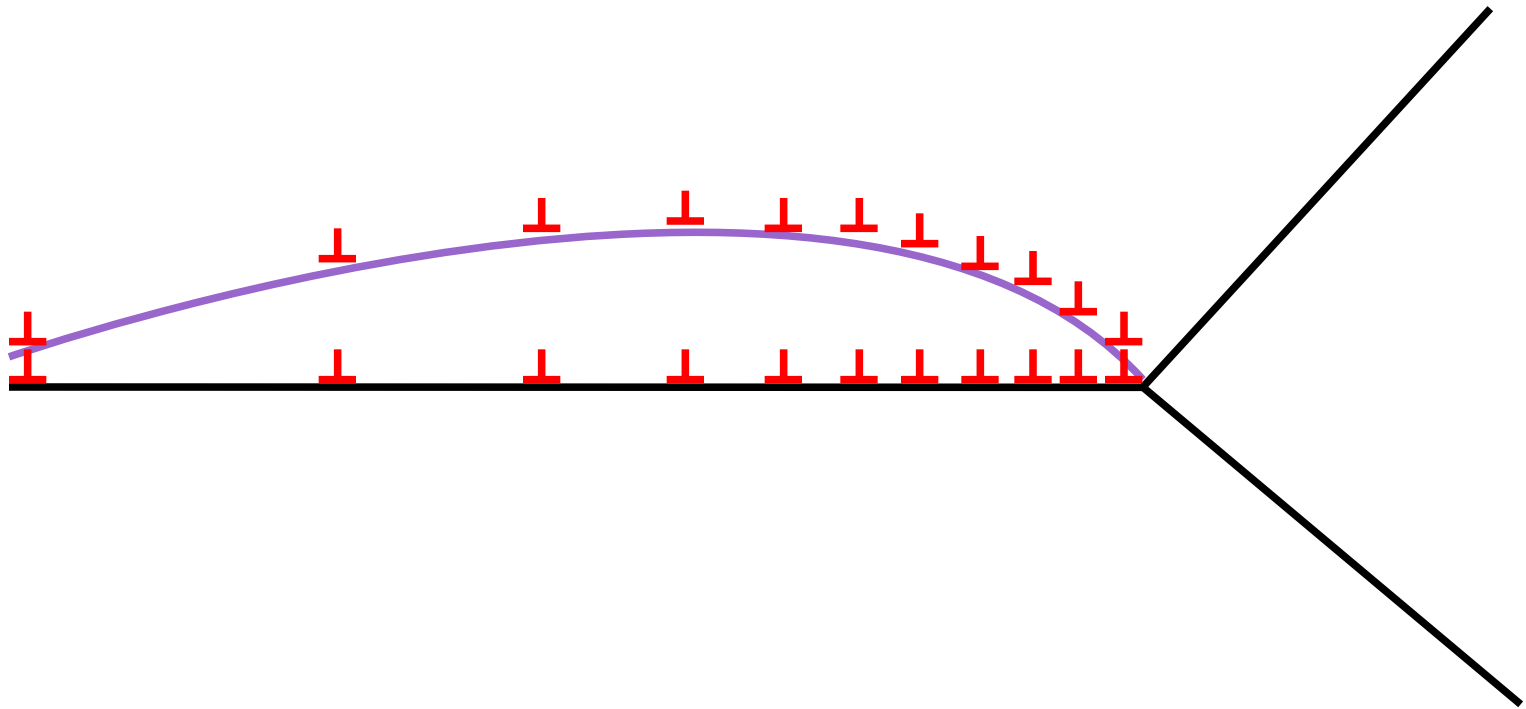


$$\dot{\epsilon}_b \approx A_1 \frac{GV_a}{kT} \frac{D_b \delta}{d^2 b_t} \left( \frac{\sigma}{G} \right)^2$$

При высокотемпературной (сверхпластической) деформации ЗГП может аккомодировать скольжением-переползанием ЗГД в соседних ГЗ или испусканием со стыка решеточных дислокаций. Этот процесс аккомодации контролирует скорость СПД.

# Реорганизация тройного стыка локальной миграцией

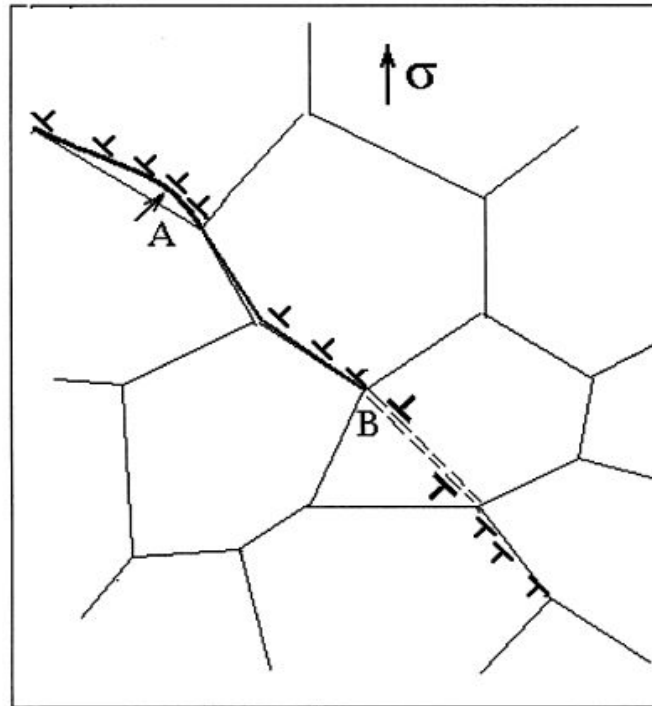
А.П. Жиляев, А.И. Пшеничнюк. Сверхпластичность и границы зерен в ультрамелкозернистых материалах. 2008



Дислокационное скопление может энергетически выгодно распределиться в более длинной (искривленной) границе путем локальной миграции ГЗ. Это приведет к выглаживанию ГЗ в поликристалле и облегчению ЗГП.

# Кооперированное ЗГП при сверхпластической деформации

О.А. Kaibyshev, А.И. Pshenichnyuk, V.V. Astanin, Acta Mater. 1998



При СПД происходит самоорганизация ЗГП путем формирования полос кооперированного ЗГП. Основная часть СПД происходит в этих полосах.