

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.

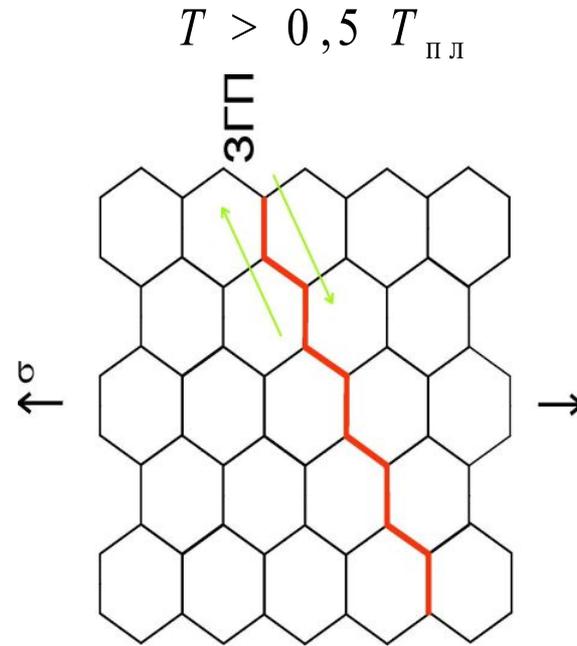
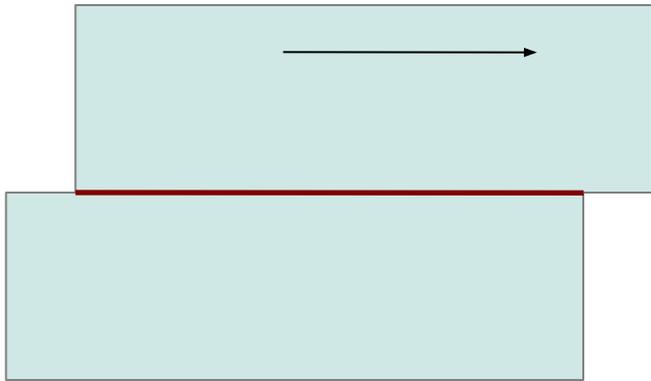
Кооперированное ЗГП и сверхпластичность.

Механизмы миграции ГЗ. Движущие силы миграции.

Связь миграции границ зерен и ЗГП.

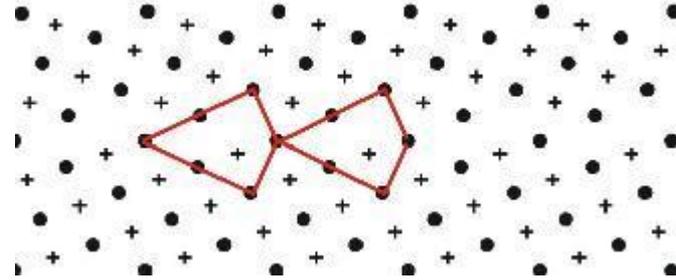
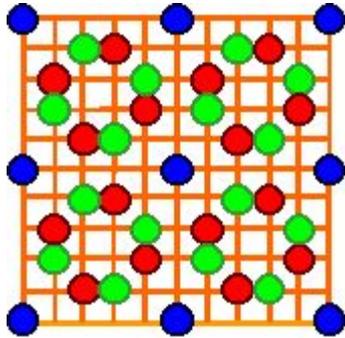
Миграция ГЗ и рост зерен.

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.

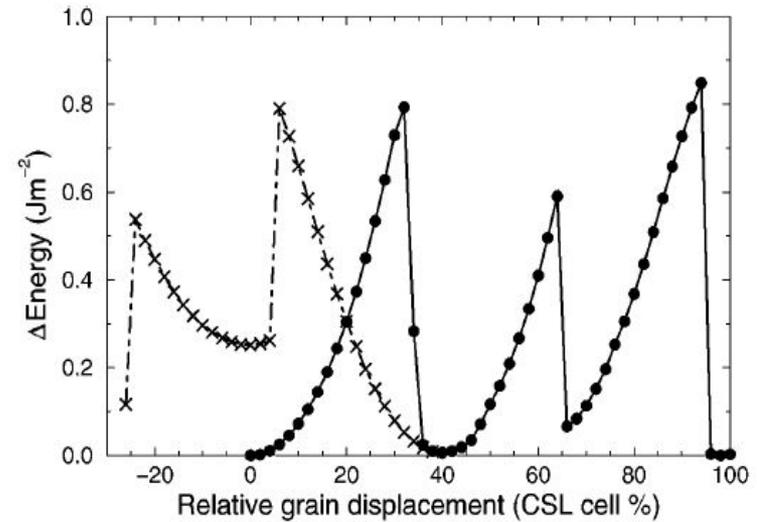
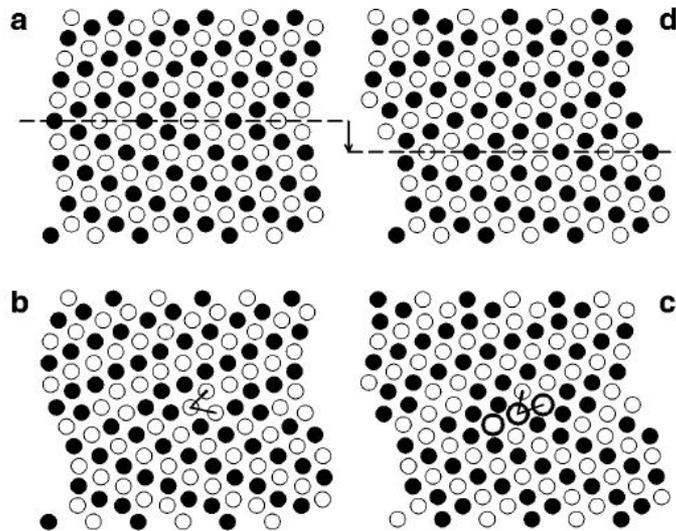
Ячейка неидентичных смещений (сдвигов)



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

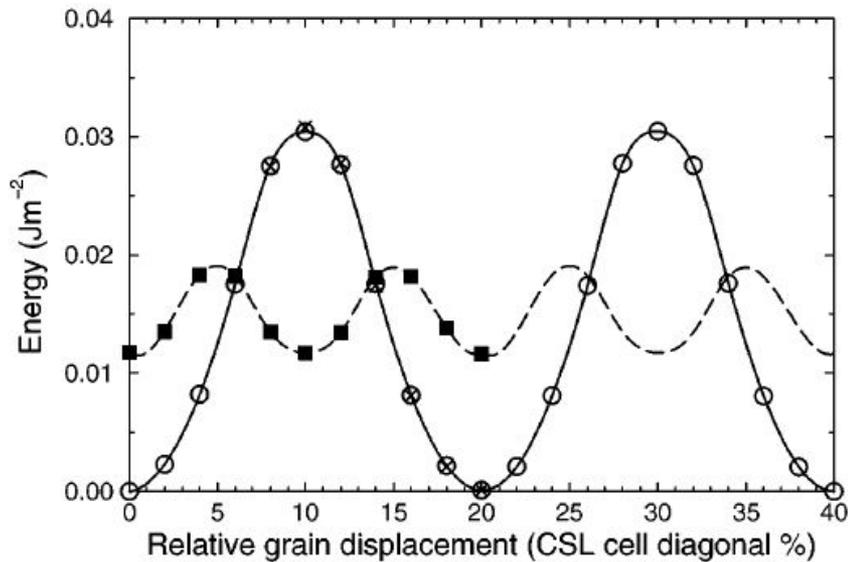
Molteni C. Phys. Rev. B. 1997. 79. P. 869



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



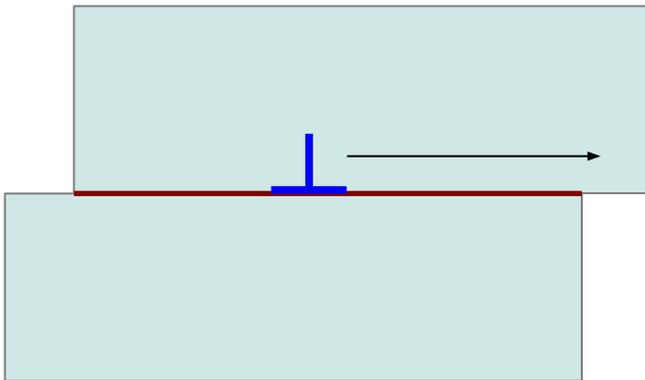
кружочки — трансляционное состояние (0,0)
крестики — (-1/20, 1/20) периода РСУ

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

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

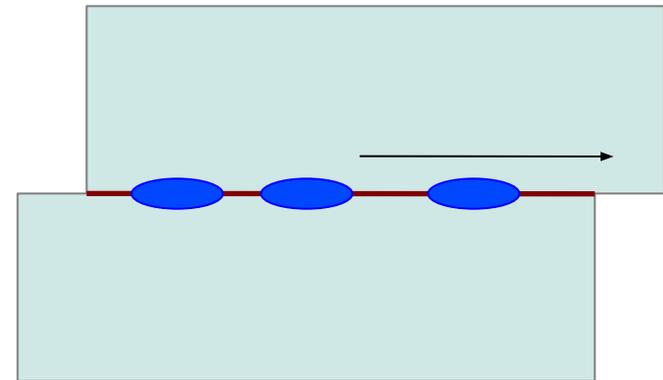
Механизмы ЗГП в специальных и произвольных ГЗ

Специальные ГЗ:
границы наклона,
границы кручения с малым Σ



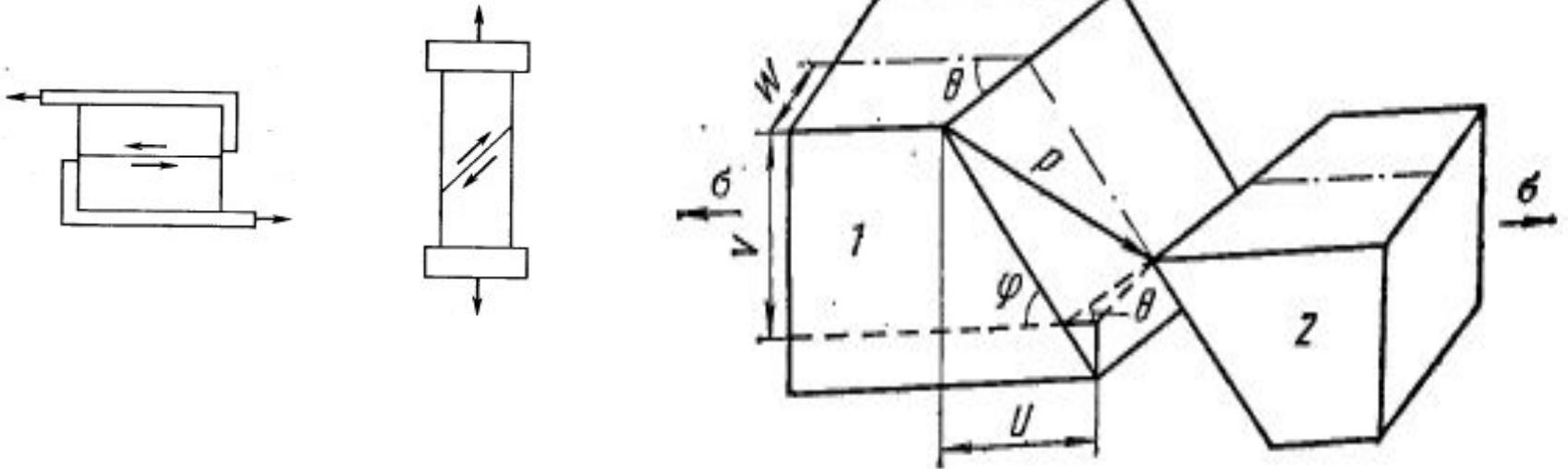
ЗГП происходит путем движения ЗГД.
Возможные источники ЗГД: источники в самой ГЗ, диссоциация ЗГРД

Произвольные ГЗ:
высокоэнергетичные
границы кручения с большим Σ



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

Методы измерения величины ЗГП



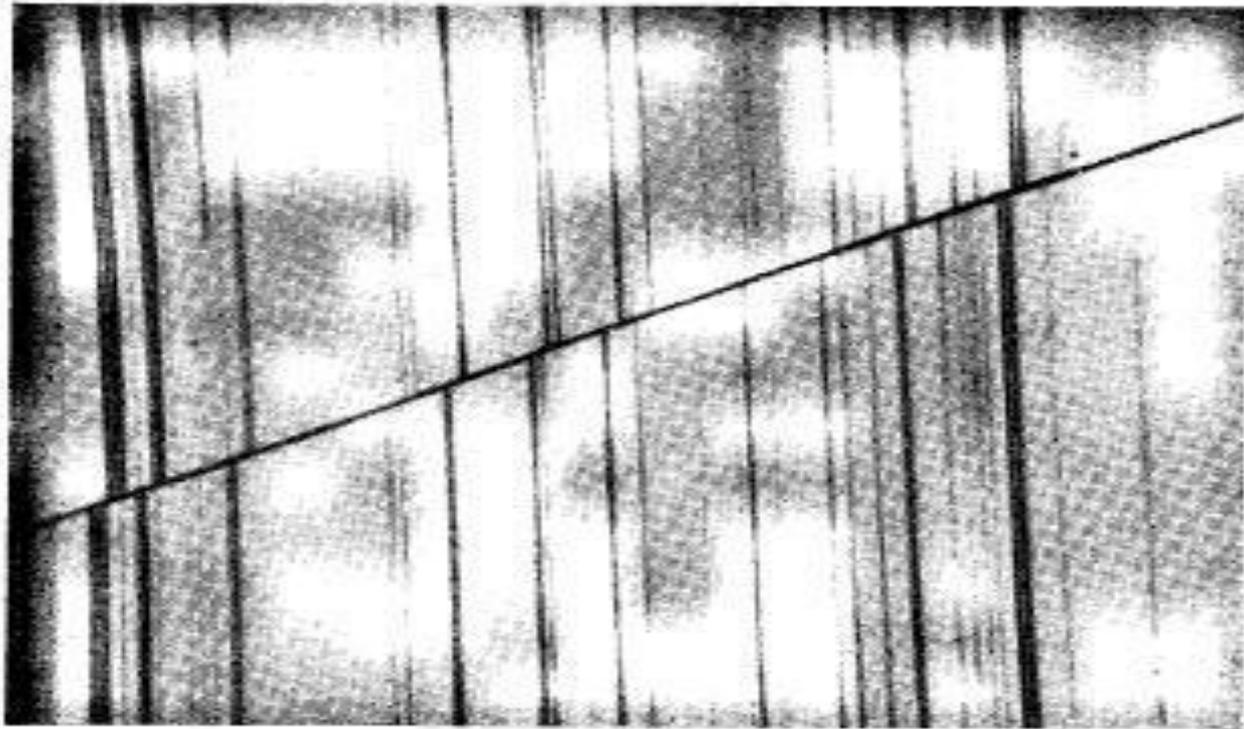
Используются бикристаллы.

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

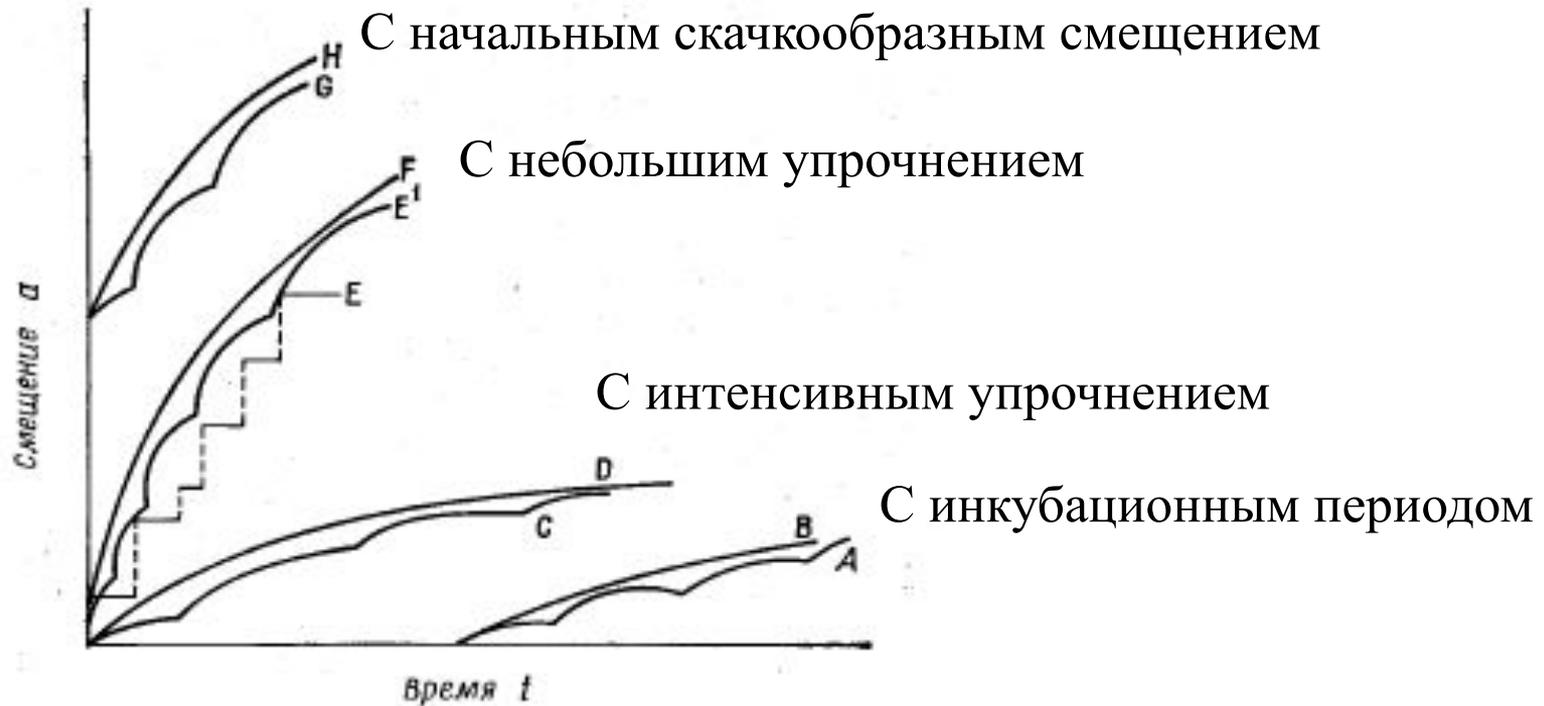
Компоненты u , w измеряются методом рисок; компонента v — методом реплик, интерферометрии и атомно-силовой микроскопии.

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

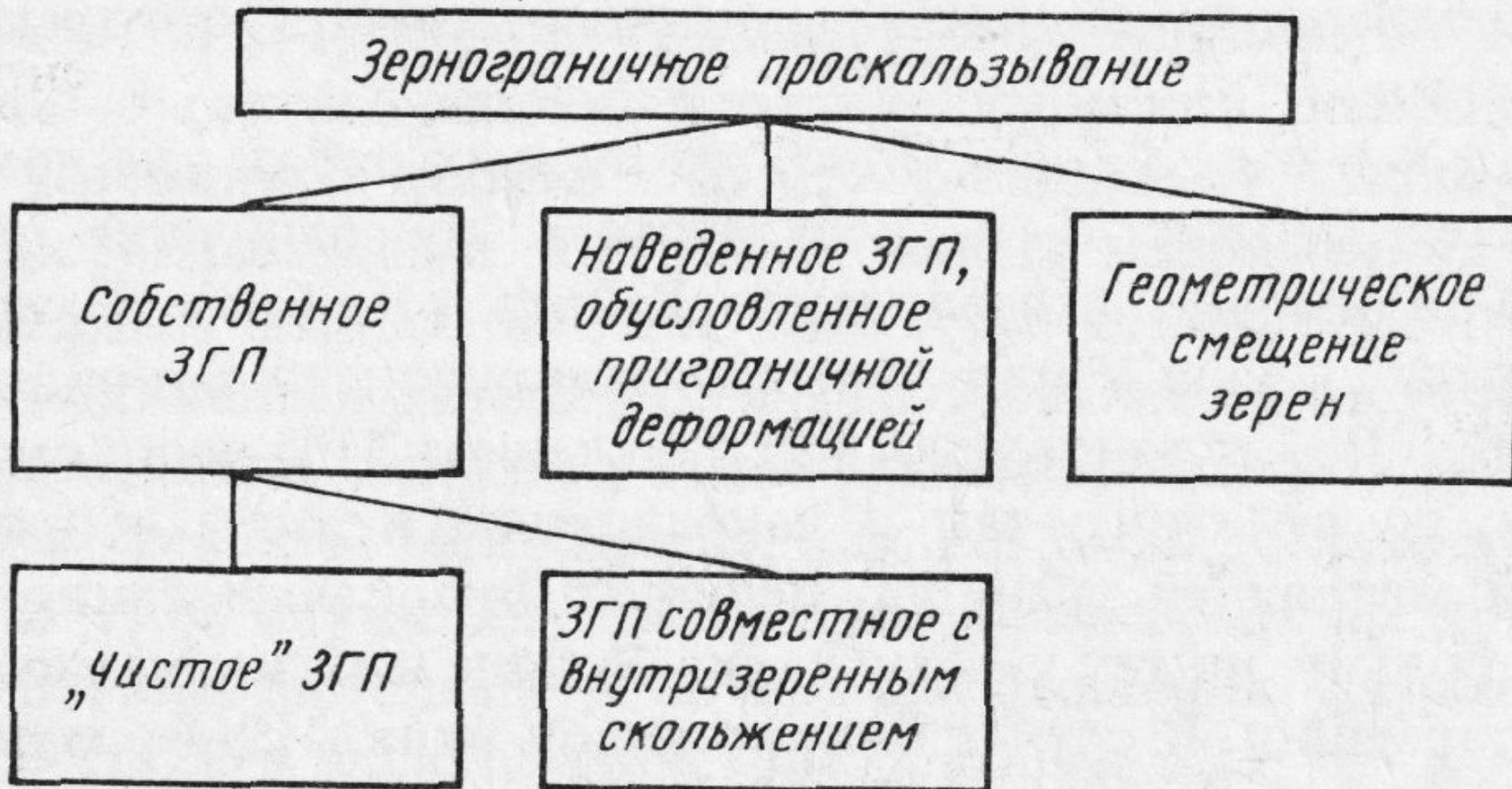
Виды зависимости $S(t)$ при ЗГП



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

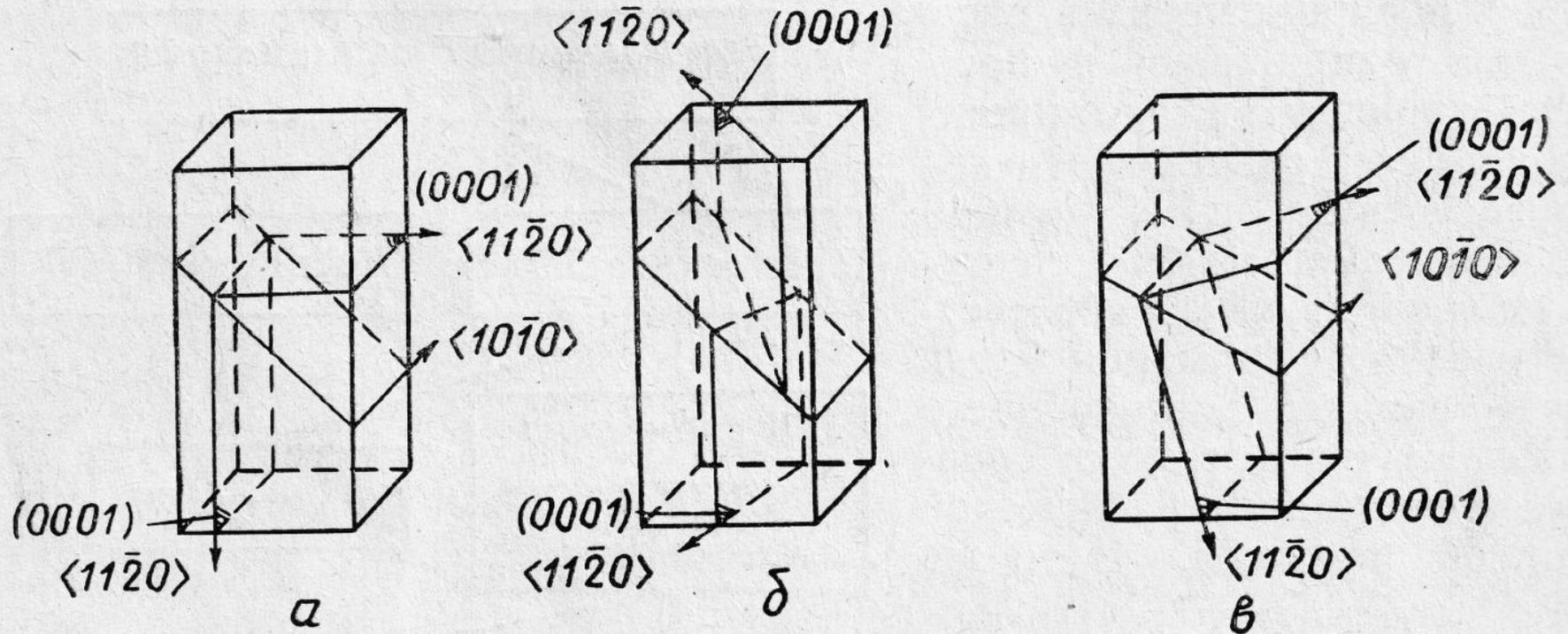
Классификация видов ЗГП

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



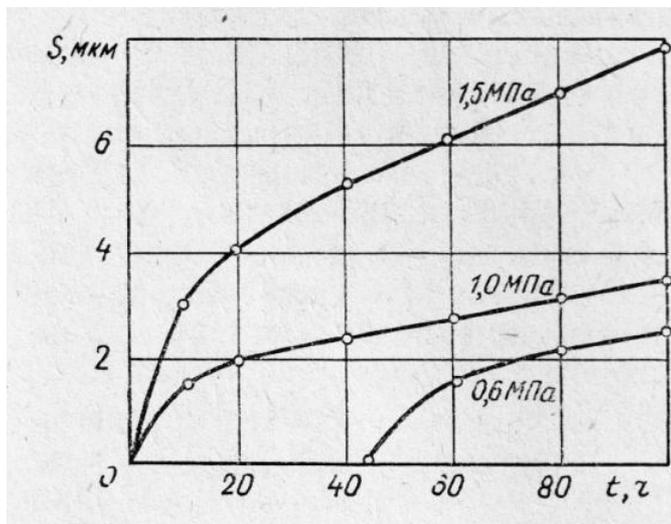
Исследование ЗГП в бикристаллах Zn

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

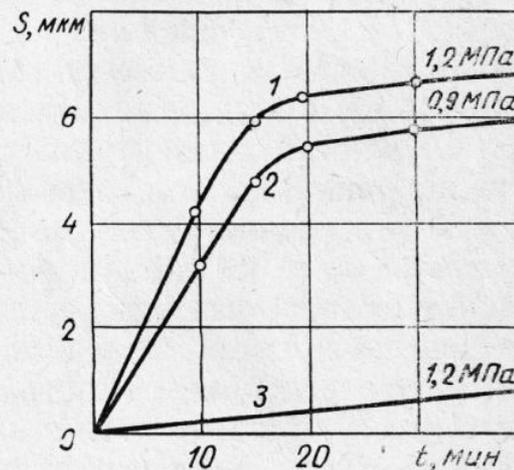


а — образец I типа без внутризеренного скольжения с границей наклона;
б — образец II типа без внутризеренного скольжения с границей кручения;
в — образец III типа в ненулевых касательных напряжениях в плоскостях скольжения и границы (ЗГП совместно с ВЗС)

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

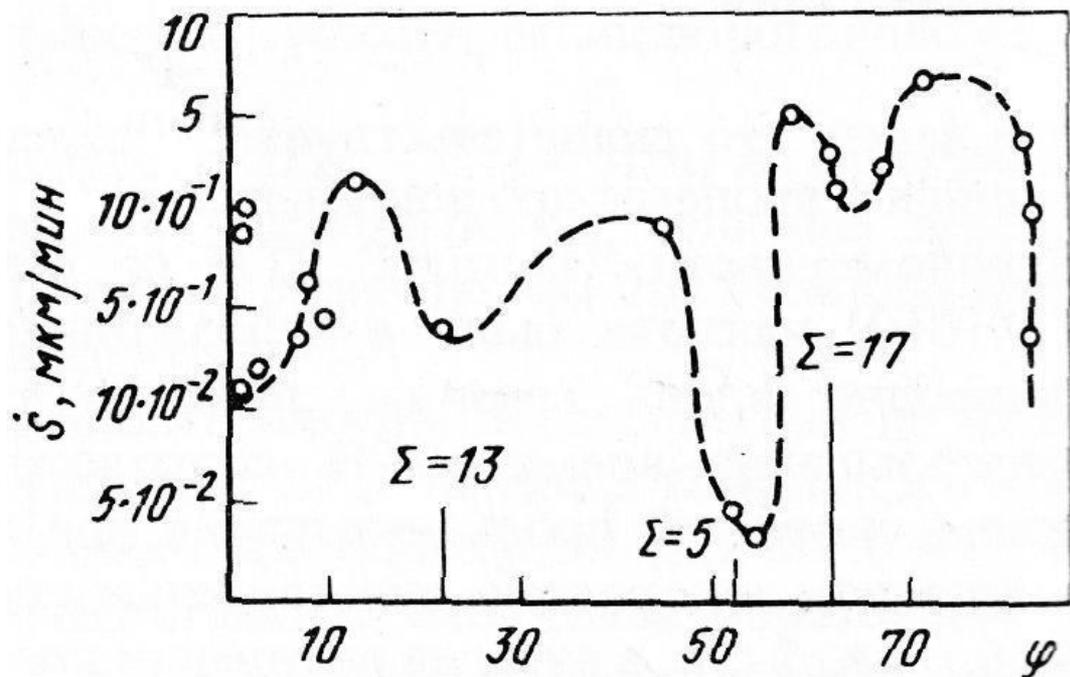
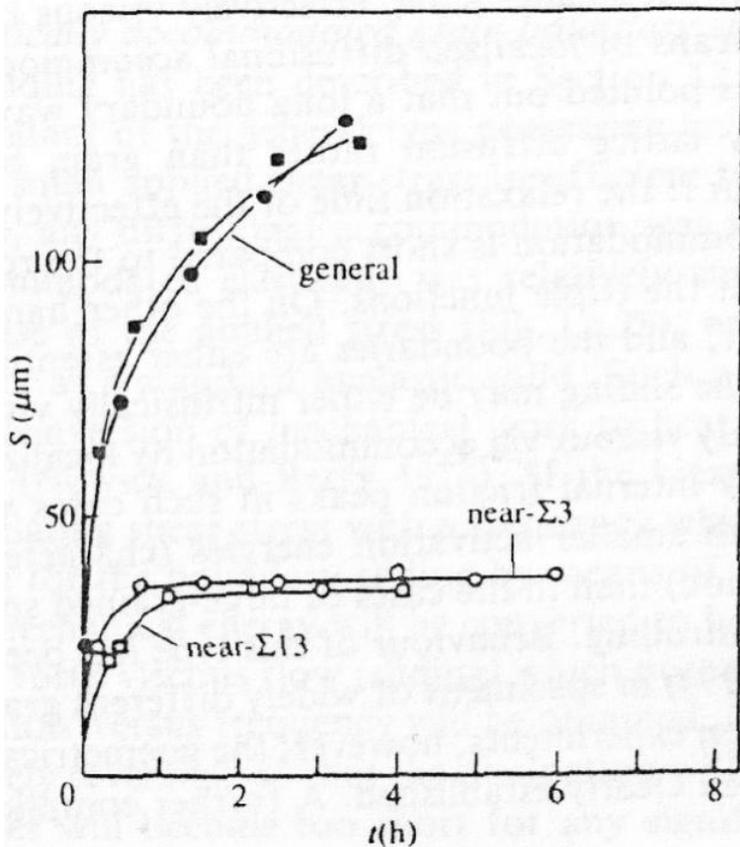
$$\text{Чистое ЗГП: } \dot{S} \propto \sigma \exp\left(-\frac{Q_B}{RT}\right)$$

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

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

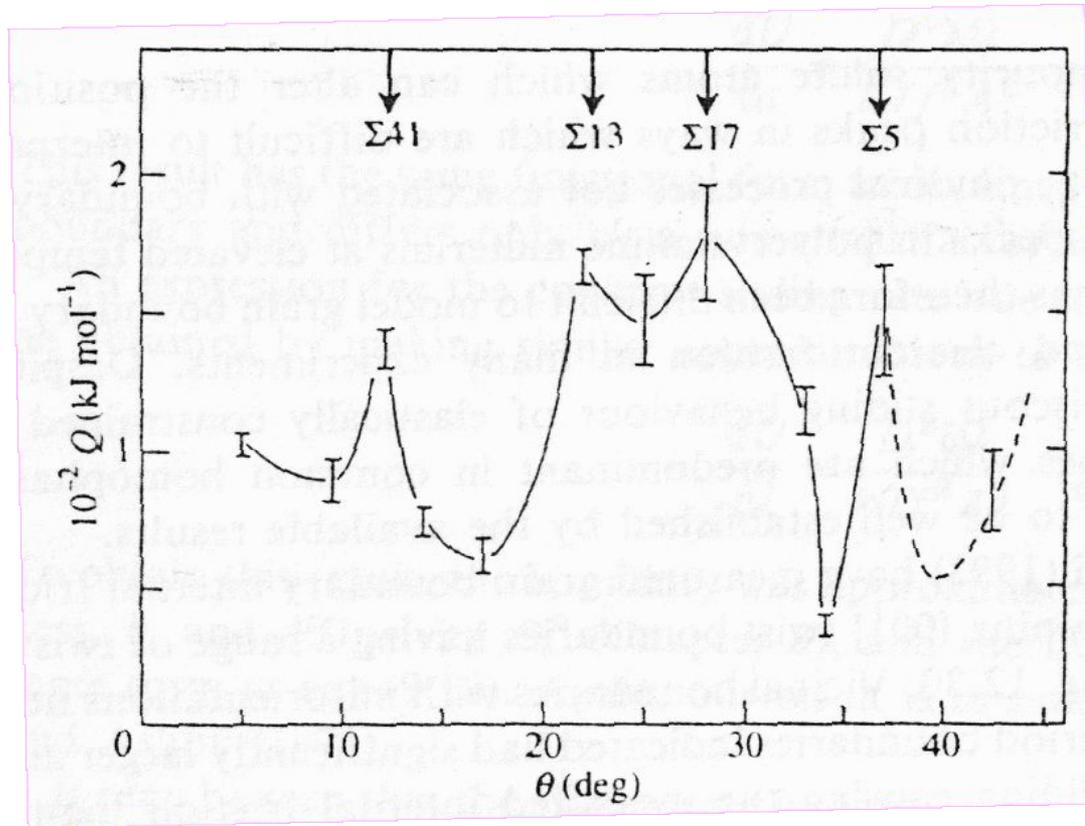
В обоих случаях скорость ЗГП контролируется зернограничной диффузией

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.

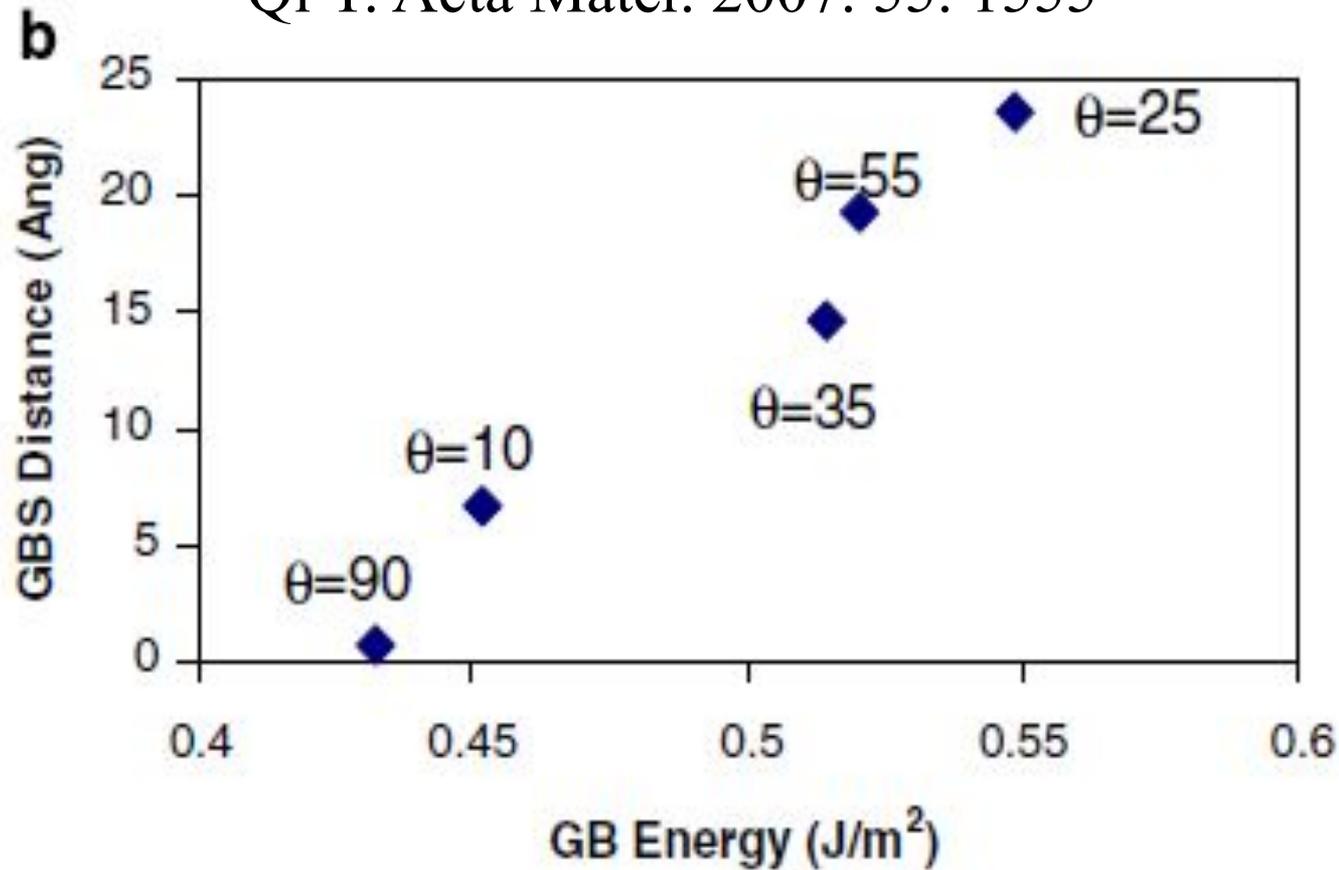
Зависимость энергии активации ЗГП от параметров ГЗ



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

Соотношение скорости ЗГП и энергии ГЗ

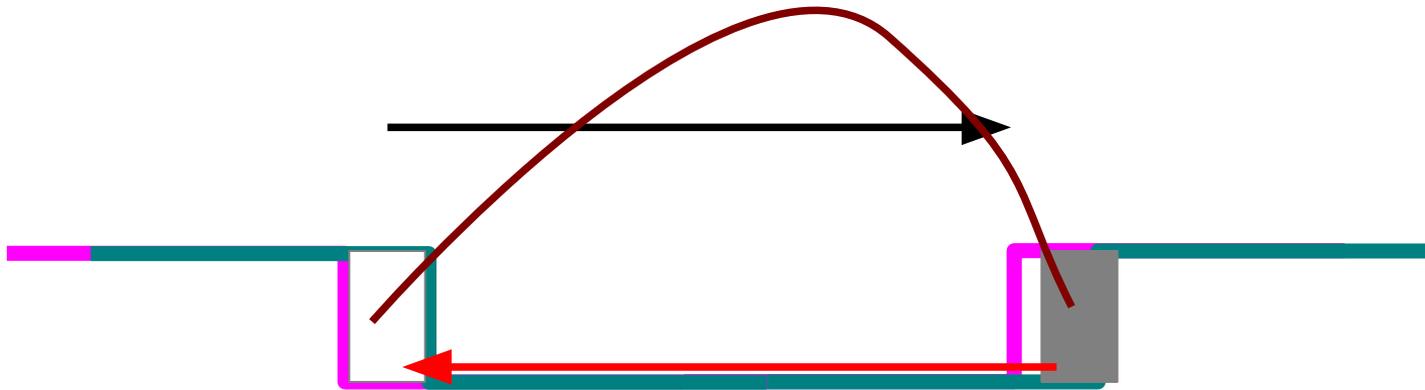
Qi Y. Acta Mater. 2007. 55. 1555



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

ЗГП в неплоских ГЗ

Raj R., Ashby M.F. 1971



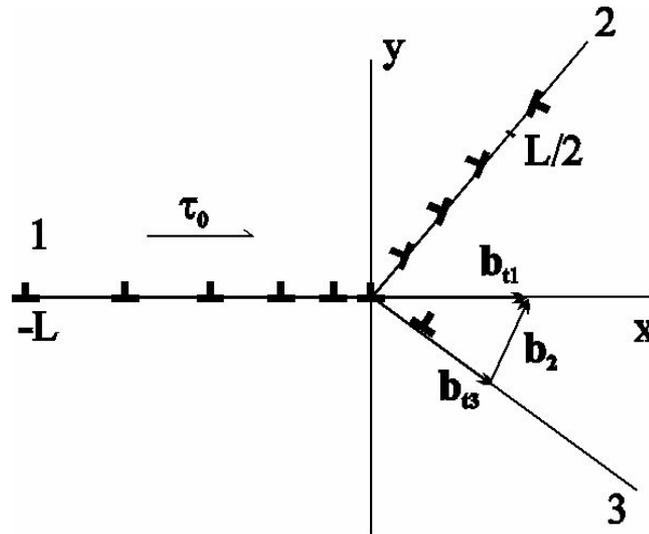
$$\frac{dU}{dt} \approx \frac{D_L L \Omega}{kT h^2} \tau$$

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

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

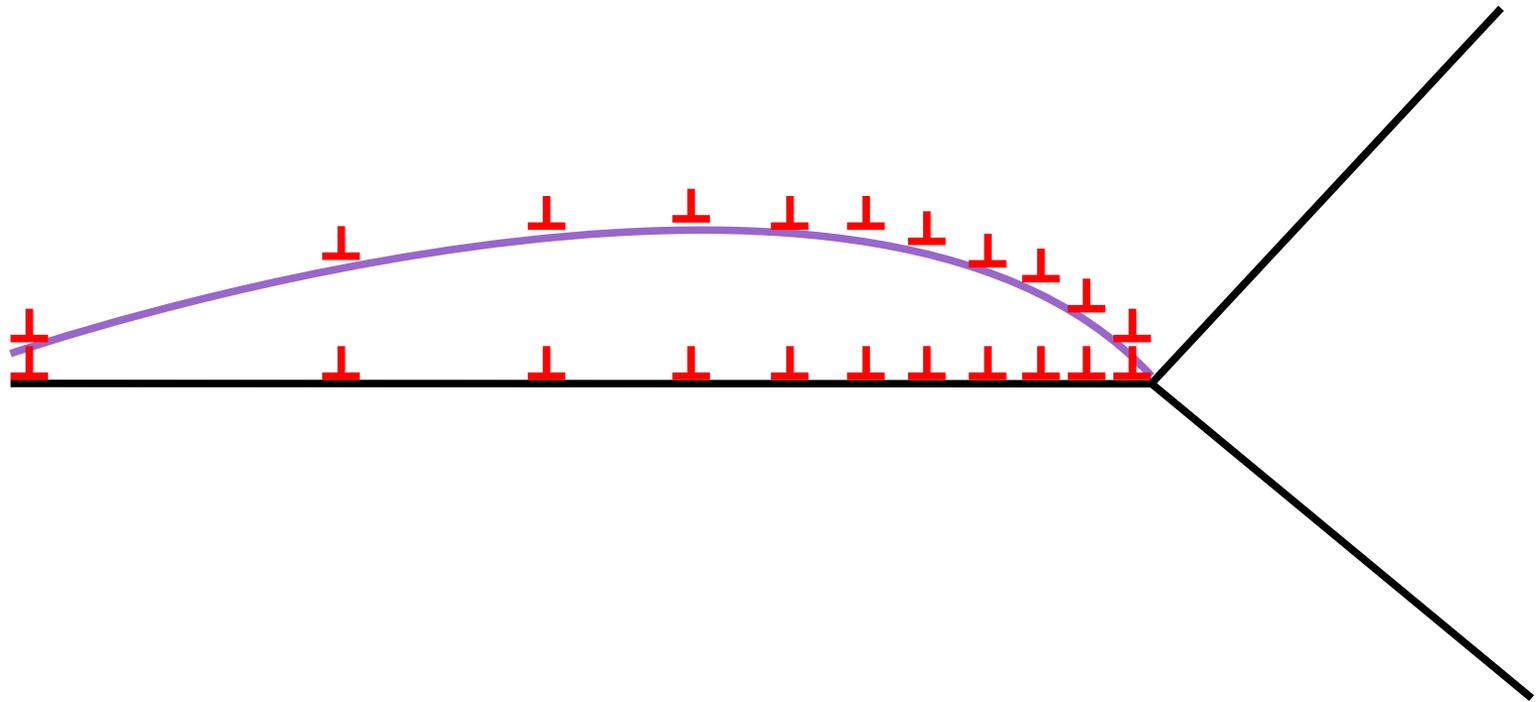


$$\dot{\epsilon}_b \approx A_1 \frac{GV_a}{kT} \frac{D_b \delta}{d^2 b_t} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^2$$

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

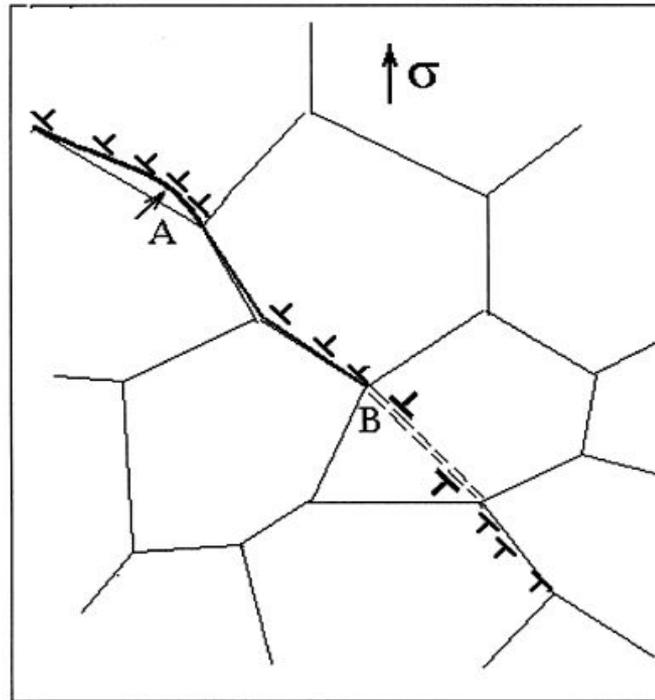
А.П. Жиляев, А.И. Пшеничнюк. Сверхпластичность и границы зерен в ультрамелкозернистых материалах. 2008



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.