

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТРОЙНЫХ СТЫКОВ



Сурсаева В.Г., Семенов В.Н.

Институт физики твердого тела, РАН, Черноголовка, Московская область, 142432, Россия sursaeva@issp.ac.ru

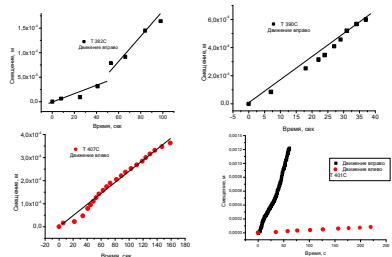
Ориентационная зависимость разницы коэффициентов термического расширения для двух зёрен с осями лежащими в плоскости границы

В гексагональных поликристаллах, где существует разница в коэффициентах термического расширения в направлении а-и с-осей, вокруг границ зерен и тройных стыков концентрируются напряжения и деформации.

Максимальная разница в деформации ϵ_{max} пропорциональна разнице коэффициентов термического напряжения ($\Delta \alpha_{max}$) умноженной на разницу в температуре (ΔT).

$$\epsilon_{max} = \Delta \alpha_{max} \Delta T \quad (1)$$

Цель работы заключается в том, чтобы некоторые моменты проблемы термической анизотропии в гексагональных металлах перенести на движение границ зерен, тройных стыков и рост зерен.



Зависимость от времени смещения тройных стыков, перемещающихся в противоположных направлениях.

Кинетика одинаковых тройных стыков, перемещающихся в противоположных направлениях, разная. При движении стыка вправо мы наблюдаем переход от стыковой кинетики к граничной, при движении стыка влево, мы наблюдаем движение только по стыковой кинетике. Мы предполагаем, что релаксация напряжений при движении вправо завершилась во время движения тройного стыка, при движении влево релаксация на прошла

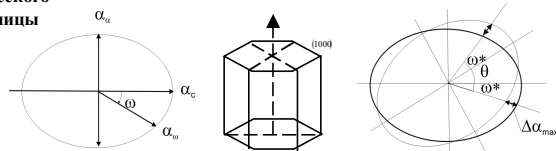
Выводы

- Анизотропия термического расширения может быть причиной нестационарного движения границ зерен и тройных стыков.
- Степень влияния анизотропии термического расширения определяется кристаллографией границ и тройных стыков.

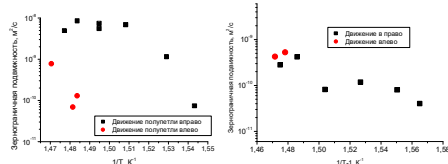
Выводы

- В тройном стыке с особыми границами ориентация соответствует максимальной деформации от термического расширения. Наблюдается нестационарное движение и смена механизма движения.
- В тройном стыке со случайными границами Деформация от термического расширения незначительна и нет нестационарного движения.

Цель. Работа посвящена экспериментальному изучению нестационарного движения индивидуальных тройных стыков. Мы изучали экспериментально движение индивидуальных тройных стыков, которые были специально изготовлены в форме вершин вытянутой петли, чтобы наблюдать движение одинаковых тройных стыков, но в противоположных направлениях. Были изучены тройные стыки с двумя боковыми особыми границами наклона $[11\bar{2}0]$ и углом разориентации 86° и с двумя случайными большеугловыми границами. В качестве третьей границы в обоих случаях была малоугловая граница.



В Zn коэффициент термического расширения в любом направлении в базисной плоскости a_a в ортогональном направлении a_c . Коэффициент термического расширения a_ω под любым углом ω к с-оси в сечении, нормальном к базисной плоскости, получается из выражения $a_\omega = a_c \cos^2 \omega + a_a \sin^2 \omega = a_a + (a_c - a_a) \cos^2 \omega$



Температурная зависимость подвижностей тройных стыков с особыми границами наклона. Наблюдается смена механизма движения

Температурная зависимость подвижностей тройных стыков со случайными границами. Не наблюдается смена механизма движения

Мотивация проведения экспериментов на индивидуальных тройных стыках.

Стационарность в таком смысле, что в пределах оптического разрешения искривленная часть границы не изменяет своей геометрической формы, а смещение каждой точки искривленной части границы в направлении нормали в этой точке пропорционально времени хотя и наблюдается в ряде случаев, все же является скорее исключением, чем правилом. Предполагается, что нестационарность движения тройного стыка вызывается сменой механизма миграции: стыковая кинетика движения, меняется на граничную из-за изменения подвижности в процессе анизотропного термического расширения кристаллической решетки

Дифференцирование по ω даёт следующее выражение

$$\frac{d\Delta\alpha}{d\omega} = (a_a - a_c) [\sin 2\omega - \sin 2(\omega + \theta)] \quad (4)$$

Привинная его к нулю получаем выражение для $\omega^* = (45 - \theta)/2$, которое соответствует $\Delta\alpha_{max}$

Граница объединяет два зерна. Для случая, когда с-оси двух зерен лежат в плоскости границы обозначим угол между с-осями φ

Направление максимальной деформации соответствует максимальному расхождению эллипсов в симметричные положения, определяемые углом ω^* .

Значение этого угла ω^* можно определить из выражения

$$\Delta\alpha = [a_c \cos^2 \omega + a_a \sin^2 \omega] - [a_c \cos^2 (\omega + \theta) + a_a \sin^2 (\omega + \theta)] [\cos^2 \omega - \cos^2 (\omega + \theta)] \quad (3)$$

Нестационарное движение зернограницных дефектов при изотермическом отжиге характеризуется изменением их скорости и формы в ходе роста зёрен. Экспериментально обнаружено, что лишь 20% тройных стыков перемещаются стационарно в поликристалле [1]. Это подтверждено результатами моделирования роста зёрен [2]. Считается, что это вызвано топологическими перестройками в микроструктуре. Стационарное состояние может быть достигнуто в ходе релаксации в течение промежутка времени, которое определяется механизмом релаксации [3]. Известен механизм релаксации напряжений на движущихся границах зёрен при изотермическом отжиге за счёт фасетирования границ. Релаксация напряжений в тройных стыках может вызывать смену механизма движения за счёт изменения структуры границы, и, как следствие, подвижности тройного стыка. Стыковая кинетика движения тройного стыка изменяется на граничную [4]. Мы изучали экспериментально движение индивидуальных тройных стыков, которые были специально изготовлены в форме вершин вытянутой петли с двумя боковыми особыми границами наклона $11\text{-}20$ и третьей малоугловой. В качестве материала исследования был выбран цинк, как сильно анизотропный материал. Напряжения, возникающие в трикристаллах из-за разности коэффициентов термического расширения в цинке в разных зёрнах, на одних границах могут увеличиваться, на других уменьшаться [5], их можно снизить или снять за счёт движения тройных стыков. Объяснение релаксации напряжений предлагает модель дelokализации ядер дислокаций, которая описывает релаксацию зернограницных дислокаций как непрерывное «растекание» деформации [6], ядро дислокации как бы «размазывается». «Размазывание» будет идти до тех пор, пока не установится стационарное состояние при определенном размере ядра дислокации. В результате энергия дислокации уменьшается, а энергия границы растёт. Рост энергии границы означает изменение её структуры, и как следствие, подвижности. В нашем эксперименте один из тройных стыков демонстрирует переход движения от стыковой кинетики к граничной при повышении температуры изотермического отжига. Об этом свидетельствуют различие в значениях энthalпий активации: для двух кинетик. При граничной кинетике стык движется безактивационно, так как движение контролируется движением особых границ наклона [7]. Другой перемещается только по стыковой кинетике. Это означает, что в ходе эксперимента релаксация прошла только для одного стыка. На стыках со случайными границами релаксация проходит быстро и не вызывает смены кинетик.

1. Piazolo, V. G. Sursaeva, D. J. Prior. The influence of triple junction on the grain boundary migration during normal grain growth: New evidence from in-situ experiments using columnar Al foil Z Metallkd 96 (2005) 10, 1152-1157

2 Quan Zhao, Wei Jiang b, David J. Srolovitz d, Weizhu Bao. Triple junction drag effects during topological changes in the evolution of polycrystalline microstructures. Acta Materialia 128 (2017) 345-350

3 Кульков, В. Г. Релаксационные процессы на границах зерен в металлах: Монография / В. Г. Кульков. – Волжский : Филиал МЭИ в г. Волжском, 2015. – 162 с.

4. Czubyko U., Sursaeva V.G., Gottstein G., Shvinderman L.S. Influence of Triple Junctions on Grain Boundary Motion // Acta Materialia. 1998. V. 46. P. 5863-5871.

5. Evans A.G. // Acta metal, 1978. V.26. P.1845.

6. Новиков В.Ю. и Перевезенцев В.Н. // Поверхность. Физика, химия, механика, 1986. Т.12. С.121.

7. Ч.В.Копецкий, В.Г.Сурсаева, Л.С.Швиндлерман, Безактивационное движение границ зерен в цинке, ФТТ, 1979,21, стр.401-405

• Работа выполнена в рамках госзаказа и при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-03-00168).

Заседание Совета РАН по физике конденсированного состояния, Черноголовка, ноябрь 2020

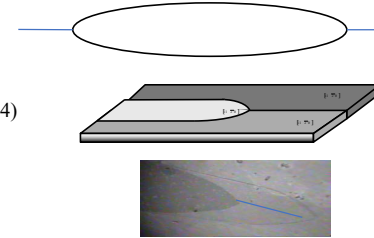


Схема образца с тройными стыками с двух сторон петли, схема тройного стыка в движении, и микрофотография тройного стыка