

## ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ТИПА ГРАНИЦ НАКЛОНА НА ПОДВИЖНОСТЬ ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ РЕБЕР В ЦИНКЕ

В.Г. Сурсаева

Институт физики твердого тела, РАН, Черноголовка,

Московская область, 142432, Россия

E-mail: [sursaeva@issp.ac.ru](mailto:sursaeva@issp.ac.ru)

Sahn и Hoffmann в 1974 [1] показали теоретически, что две поверхности могут пересекаться вдоль линии с разрывом производной её формы. Линия пересечения была названа ребром первого рода. Нами была разработана теория стационарного движения зернограничных ребер первого рода с криволинейными границами [2]. Получены первые экспериментальные значения подвижности и энтальпии активации движения зернограничных систем с ребрами [2].

Кристаллографический тип границ наклона определяется кристаллографической осью, вокруг которой повернуты решётки зёрен. Нами изучены кинетические свойства границ наклона  $[10\bar{1}0]$  и  $[11\bar{2}0]$  [3,4]. Если движение границ наклона  $[10\bar{1}0]$  носит активационный характер [3], то границы наклона  $[11\bar{2}0]$  при высоких температурах демонстрируют безактивационное движение [4]. Поэтому есть основание предположить, что ребра на границах наклона  $[10\bar{1}0]$  и  $[11\bar{2}0]$  проявят различные кинетические свойства. Используя разработанную нами ранее [2] концепцию стационарного движения большеугловых границ зёрен с ребрами первого рода, мы поставили цель сравнить влияние кристаллографического типа границ наклона на кинетические свойства таких зернограничных систем с ребрами.

### Материал и методика эксперимента

Экспериментальная методика изготовления бикристаллов с ребрами детально излагается в работе [3]. Плоские бикристаллы в форме полупетли из 99.999% Zn (Рис. 1а,б) были приготовлены методом направленной кристаллизации. Разориентация границы наклона  $[10\bar{1}0]$ , образующей симметричную полупетлю, составляла  $54^\circ$  (Рис. 1а). Разориентация границы наклона  $[11\bar{2}0]$ , образующей несимметричную полупетлю, составляла  $84^\circ$  (Рис. 1б). Кристаллографические **Ошибка! Залка не определена.**  $[10\bar{1}0]$  и  $[11\bar{2}0]$  оси были перпендикулярны поверхности бикристаллов. Криволинейные части границы стыкуются и образуют ребро. Форма мигрирующей зернограничной полупетли изучалась в температурном интервале  $340 \div 410^\circ\text{C}$  *in situ* в высокотемпературной приставке к оптическому микроскопу с использованием поляризованного света. Форма и смещение движущейся границы фиксировались *in situ* в ходе эксперимента с помощью цифровой видеокамеры

Результаты

На Рис. 1а и Рис.1б показан участок зернограничной полупетли с ребром в вершине из границ наклона  $[10\bar{1}0]$  и  $[11\bar{2}0]$ . На Рис.2а и Рис 2б приведены температурные зависимости угла между касательными в ребре. Значение угла колеблется в интервале  $85^\circ \div 95^\circ$  для ребра на границе наклона  $[10\bar{1}0]$ . Значение угла для ребра на границе наклона  $[11\bar{2}0]$  растёт с ростом температуры от  $75^\circ$  до  $90^\circ$ .

На Рис. 3а представлена температурная зависимость подвижности для зернограничной системы границы наклона  $[10\bar{1}0]$  с ребром, а на Рис.3б представлена температурная зависимость подвижности для зернограничной системы границы наклона  $[11\bar{2}0]$  с ребром.

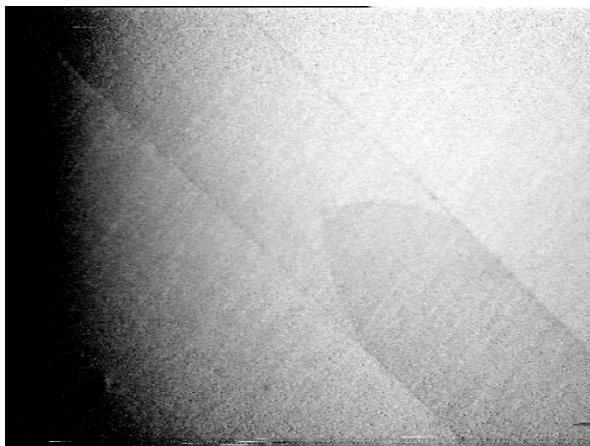


Рисунок 1а - T=380C. Граница зерна в форме полупетли с ребром в вершине в бикристалле с осью выхода нормали к поверхности  $[10\bar{1}0]$ б. Ширина зерна 600мкм

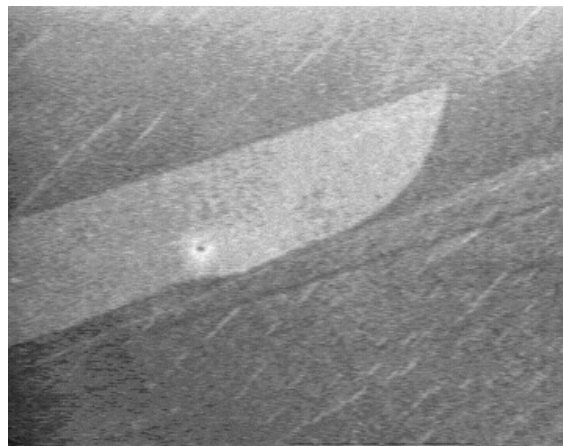


Рисунок 1б - T=370C Граница зерна в форме полупетли с ребром в вершине в бикристалле с осью выхода нормали к поверхности  $[11\bar{2}0]$ . Ширина зерна 600мкм

Кинетические свойства рёбер зависят от кинетических свойств составляющих их границ. Граница  $[10\bar{1}0]$  с углом разориентации  $54^\circ$  с  $\Sigma=9$  демонстрирует движение в температурном интервале 340-410C, подвижность меняется в интервале  $2,92 \cdot 10^{-11} - 1,42 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/сек. Ребро симметричное. Угол в вершине ребра составляет  $85^\circ \div 95^\circ$ . Движение активационное с энтальпией активации нереально высокой 4 эВ, что заставляет усомниться в трактовке результатов. Поэтому экспериментальные результаты для расчета подвижности были обсчитаны в рамках разработанной нами теории [2] с учётом влияния ребра. Полученное значение энтальпии активации 1 эВ. Параметр торможения ребром  $A_r$  равен 1.11 в температурном интервале 330-410 °C. Торможение ребром довольно сильное и не изменяется с ростом температуры.

Зернограничная система в форме полупетли из специальной границы наклона  $[11\bar{2}0]$  с углом разориентации  $84^\circ$  и  $\Sigma=11$  демонстрирует движение в температурном интервале 360-400C, подвижность петли меняется в интервале  $1,44 \cdot 10^{-10} - 5,92 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/сек. Ребро несимметричное. Угол в вершине ребра увеличивается с ростом температуры от  $75^\circ$  до  $90^\circ$ . При температуре 360-380° значение угла не меняется, выше  $385^\circ$  резко возрастает до  $90^\circ$ . Движение ниже 385C безактивационное с энтальпией активации  $H = 0$  эВ, выше 385C движение активационное с энтальпией активации  $H = 1,5$  эВ. Так как граница движется безактивационно, то можно предположить, что  $H = 1,5$  эВ это энтальпия активации движения ребра. Значение параметра торможения ребром  $A_r$  составляет 5 в температурном интервале 360-380 °C, в температурном интервале 380-400C значение  $A_r$  изменяется от 5 до 100. Торможение ребром уменьшается с повышением температуры.

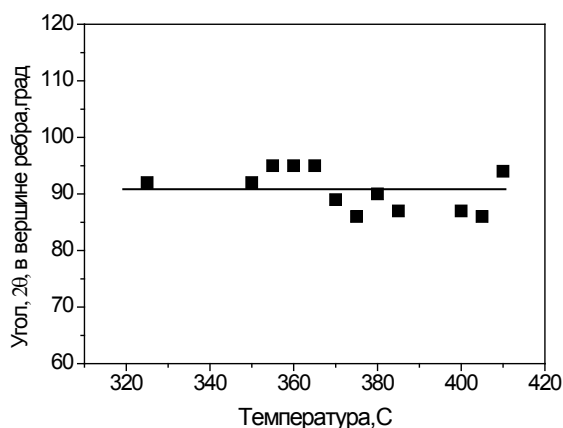


Рисунок 2а - Температурная зависимость угла между касательными в вершине ребра на границе наклона  $[10\bar{1}0]$

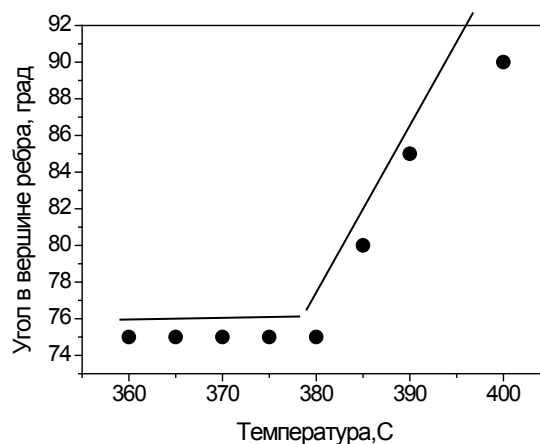


Рисунок 2б - Температурная зависимость угла между касательными в вершине ребра на границе наклона  $[11\bar{2}0]$

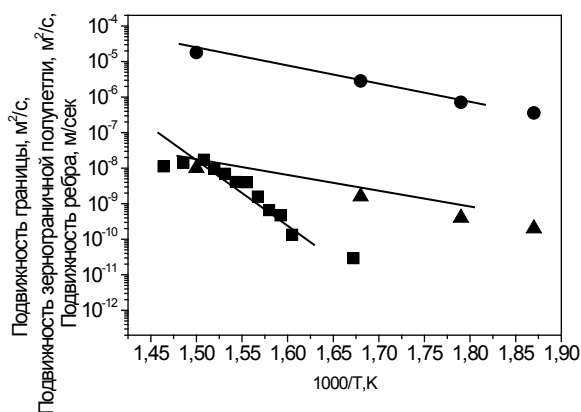


Рисунок 3а - Температурные зависимости подвижностей для системы границ наклона  $[10\bar{1}0]$ . ■ движение полупетли с ребром  
• подвижность зернограничного ребра  
▲ подвижность границы в независимом эксперименте

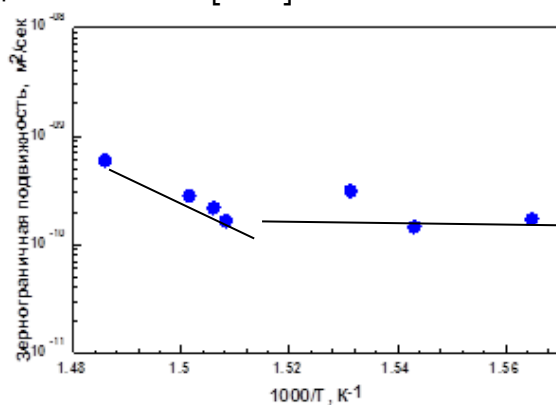


Рисунок 3б - Температурная зависимость.  
• подвижности зернограничной системы в форме полупетли с ребром на границе наклона  $[11\bar{2}0]$

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-03-00248)

#### Литература

1. J.W. Cahn and D.W. Hoffman, A Vector Thermodynamics for Anisotropic Surfaces. II. Curved and Facetted Surfaces Acta metall. 22, 1205 (1974).
2. V.G. Sursaeva, G.Gottstein, L.S.Shvindlerman Effect of the First Order Ridge on Grain Boundary Motion in Zn. Acta Materialia. 41 (2010). 7725-7729.
3. А.В.Антонов, Ч.В.Копецкий, Л.С.Швиндлерман, В.Г.Сурсаева  
Миграция границ наклона в цинке. ДАН СССР. -1973. – 213. –С. 318-320.
4. B.Straumal, V.Suraeva, L.S Shvindlerman,  
Dependence of the rate of non-activated motion of a grain boundary on its inclination Phys.Met.Metall.Vol.49,102-107,1980.