

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС ПОДВИЖНОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГРАНИЦЫ ЗЕРНА

Сурсаева В.Г., Горнакова А.С.

Институт физики твердого тела, РАН, Черноголовка, Московская область,
142432, Россия

E-mail: sursaeva@issp.ac.ru

Движение индивидуальных границ зёрен изучают уже более пятидесяти лет. Однако неизученным явлением остаётся гистерезис зернограничной подвижности. Гистерезис зернограничной подвижности — неоднозначная петлеобразная зависимость зернограничной подвижности от обратной температуры при её циклическом изменении. Вне зоны гистерезиса, которая ограничена верхней и нижней точками смыкания петли гистерезиса, наблюдается совпадение значений зернограничной подвижности от обратной температуры. Чтобы использовать это явление на практике, надо знать физическую природу исследуемого гистерезиса. Чтобы понять её надо выяснить, что влияет на гистерезис. В данной статье мы выдвигаем гипотезу, что явление гистерезиса зернограничной подвижности инициируется отрывом движущейся границы зерна от примеси. Попытаемся обосновать достоверность этой гипотезы. Благодаря явлению адсорбции даже в самых чистых веществах содержание примеси на границах зёрен может быть достаточно большим и оказывать влияние на их свойства. Физическая основа взаимодействия границы зёрен с примесью состоит в следующем. При движении границы зёрен происходит диссипация свободной энергии системы в результате различных процессов, которые связаны с диффузией атомов примеси вслед за границей и перестройкой атомов самой границы. В предположении независимости протекания этих процессов, полная диссипация энергии в единицу времени

$$W = W_{ep} + \sum_i W_i \Gamma_i, \quad (1)$$

где $W_{gp} = f_{gp} * V$ – диссипация энергии чистой границы; V – скорость движения границы.

$W_i = f_i * V$ диссипация энергии в результате диффузии атомов примеси i -го сорта,

f_{gp} результирующая сила, тормозящая движение чистой границы,

f_i – сила диффузионного торможения атома примеси

Согласно уравнению Эйнштейна

$$f_i = \frac{VkT}{D_i}, \quad (2)$$

D_i - коэффициент диффузии атомов примеси i -го сорта.

Тогда

$$W_i = \frac{V^2 kT}{D_i} \quad (3)$$

$$\text{и аналогично } W_{gp} = \frac{V^2}{A}, \quad (4)$$

где A подвижность чистой границы.

Диссипированная движущейся границей свободная энергия равна работе внешней движущей силы ΔF

$$W = \Delta F * V \quad (5)$$

Сравнивая уравнения (1) и (5) (с учётом (3) и (4)), получаем

$$\Delta F * V = \frac{V^2}{A} + \sum_i \frac{V^2 kT \Gamma_i}{D_i} \quad (6)$$

Откуда

$$V = \frac{\Delta F}{\frac{1}{A} + kT \sum_i \frac{\Gamma_i}{D_i}} \quad (7)$$

Для простоты ограничимся рассмотрением одного сорта атомов примеси и случаем, когда $A \gg D/\Gamma kT$ (движение границы лимитируется движением примеси). Тогда получаем уравнение Люкке-Детерта

$$V = \frac{\Delta F}{\Gamma kT} \quad (8)$$

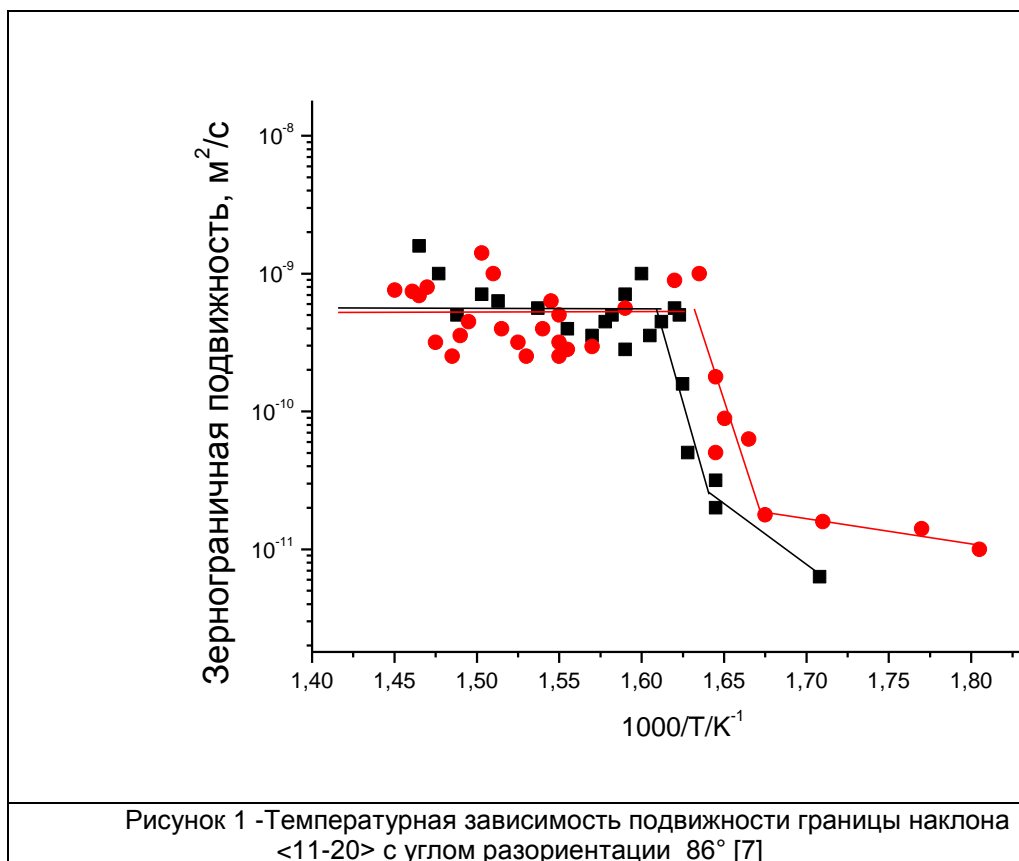
С другой стороны, для движения примесного атома вслед за границей на него, согласно (2) должна действовать пропорциональная скорости сила f . Поскольку величина силы взаимодействия примеси с границей не может быть больше некоторого значения $f_{\text{макс}}$ (1),

$$\text{то при скорости большей, чем } V_{\text{крит}} = f_{\text{макс}} \frac{D}{kT}$$

примесь уже не сможет двигаться вслед за границей- произойдёт отрыв границы от облака адсорбированной примеси. Это явление может иметь лавинообразный характер. Однако если есть большой разброс в энергии взаимодействия примеси с границей, отрыв может происходить постепенно в некотором интервале параметров, которыми согласно (7) являются движущая сила, температура и количество примеси. Исследование явления отрыва движущейся границы от примеси является тонким инструментом изучения структуры границы и некоторых характеристик взаимодействия ее с примесью, таких, например, как: 1. Энергия связи примеси с границей. 2. Величины адсорбции примеси на границе. 3. Числа активных мест в границе.

В работе [1] проанализированы условия, при которых можно наблюдать отрыв движущейся границы от примеси и показано, что отрыв может реализоваться в среде с малым содержанием примесных атомов на высокоподвижной границе с низкой адсорбционной способностью. Этим условиям удовлетворяют особые границы, которые характеризуются большой долей совпадающих узлов обеих зёрен по границе. Впервые явление отрыва границы зёрен от примесной атмосферы было экспериментально установлено на одиночных особых границах в Al и Zn [1-7]. В низкотемпературной области подвижность границы изменяется активационно. При некоторой температуре (для каждой границы своя) подвижность границы резко, практически скачкообразно, возрастает. После чего при дальнейшем повышении температуры растёт активационно, но уже с другой, меньшей энергией активации (рис.1.). В точке перехода скорость миграции границы возрастает в 20 раз. При снижении температуры наблюдается температурный гистерезис при переходе с верхнего уровня на нижний. Авторы считают, что наблюдаемый гистерезис вызывается примесным торможением границы. Как показано экспериментально авторами [2], на температурных зависимостях подвижности границ наклона (111) с углом разориентации 38° и разным содержанием примеси в Al, гистерезис не наблюдается в очень чистом материале и достаточно грязном. В Al с промежуточным количеством примеси гистерезис наблюдается.

Эффект отрыва наблюдался и в Zn на границе наклона $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ с углом разориентации 86° [1,5-7]. При низких температурах движение активационное, затем в достаточно узком температурном интервале происходит рост подвижности на 1-2 порядка. После чего подвижность не меняется вплоть до температуры плавления. Движение границы становится безактивационное.



Вывод.

Примесь способствует появлению гистерезиса, но причиной его скорее является изменение структуры границы в ходе фазового перехода от упорядоченной структуры границы к неупорядоченной.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-03-00168)

Литература.

1. В.Ю.Аристов, Ч.В.Копецкий, В.Г.Сурсаева, Л.С.Швиндлерман. Эффект отрыва движущейся границы зерна от адсорбированной примеси. Доклады Академии наук СССР. – 1975. - Т.225, № 4. – С.804-806.

2. V. Yu.Aristov, Ch.V.Kopezky, L.S.Shvindlerman. Breakaway of a grain boundary from adsorbed impurity in the aluminium bicrystals of different purity. Scripta met. – 1977. – V.11. -pp. 109-111,.

3. В.Ю.Аристов, Ч.В.Копецкий, Д.А.Молодов, Л.С.Швиндлерман. Кинетические и адсорбционные свойства 36,5°[111] границы наклона в сплавах Al-Fe/ Физика твёрдого тела. – 1980. –Т.22,№11. –С. 3247-3253.

4. В.Ю.Аристов, В.Е. Фрадков, Л.С.Швиндлерман. Эффект отрыва мигрирующей зернограничной полупетли от облака адсорбированной примеси. Физика твёрдого тела. – 1980. – Т. 22, вып. 6. -С. 1817-1823.

5. Ч.В.Копецкий, Л.С.Швиндлерман. Миграция индивидуальной границы зерна в плотноупакованных металлах. Влияние примесного и ориентационного факторов. Металлы высокой чистоты. Изд. «Наука», 1976. - С. 73-104.

6. Ч.В.Копецкий, В.Г.Сурсаева, Л.С.Швиндлерман. Концентрационная зависимость эффекта отрыва границы зерна от адсорбированной примеси. - ФТТ. – 1977. - № 19. - С.604-606.

7. Б.Б. Страумал, В.Г.Сурсаева, Л.С.Швиндлерман. Зависимость скорости безактивационного движения границы зерна от ориентации. - ФММ. – 1980. –Т.49, вып.5. –С. 1021-1026.