

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ ФОРМЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГРАНИЦЫ ЗЕРНА

Сурсаева В.Г.

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

Исследованию фазовых переходов на индивидуальных границах зёрен в металлах в последнее время посвящена целая серия экспериментальных работ. В основном они посвящены фасетированию формы движущейся границы. Известно также, что на границах возможен фазовый переход из неупорядоченной структуры границы к упорядоченной. При изменении структуры границы меняются её свойства, поэтому фазовый переход должен сказаться на изменении свойств. Точное значение температуры фазового перехода косвенно определить с высокой точностью не удаётся, так как при фазовых переходах свойства демонстрируют гистерезис по температуре. При изучении роста зёрен можно ожидать проявления гистерезиса как на температурной зависимости подвижности, так и на температурной зависимости формы движущейся границы. В работе [1] представлены экспериментальные результаты проявления гистерезиса зернограничной подвижности при изучении движения индивидуальной границы. Гистерезис наблюдается в чистых материалах с ограниченным количеством примеси. Поэтому примесь способствует появлению гистерезиса, а причиной, вызывающей гистерезис, является фазовое превращение упорядоченной структуры границы в неупорядоченную структуру. В этой работе представлены косвенные доказательства структурного фазового перехода от неупорядоченной структуры границы к упорядоченной посредством изучения изменения формы и подвижности движущейся некогерентной двойниковой границы.

Естественно, что структурные фазовые переходы будут проявлять себя на специальных границах с совершенной структурой, поэтому в качестве объекта исследования была выбрана в цинке двойниковая граница из-за хорошо известной и воспроизводимой кристаллогеометрии. Двойники деформации получали при приложении к плоскому (10*200*1мм) монокристаллу концентрированной нагрузки. Двойник в виде тонкой прослойки прорастал насквозь монокристалла. На плоской поверхности монокристалла полученные деформацией двойники имели вид узкой полупетли с двумя параллельными когерентными плоскими границами и некогерентной плоской границей в вершине (рис.1). Изучали движение и форму некогерентной границы двойника под действием постоянной движущей силы, возникающей в результате сокращения когерентных участков границы [2]. Изотермические отжиги проводились в температурном интервале 177–410°C в высокотемпературной приставке к микроскопу в атмосфере аргона. Наблюдение *in situ* [3] за смещением и формой границы в ходе изотермических отжигов велось с помощью оптического микроскопа с использованием поляризованного света. Если это фазовый структурный переход, то он должен проявить себя и на температурной зависимости подвижности границы. Движение границы с высокой плотностью узлов совпадения должно характеризоваться низкой энтальпией активации, а движение границы с низкой плотностью узлов совпадения – высоким значением энтальпии активации. Что и мы наблюдаем на рис.4. [3] При низких температурах 177-340C структура двойниковой границы упорядоченная, при высоких 340-412C разупорядоченная. Изучение движения некогерентной двойниковой границы в температурном интервале позволило установить, что энтальпия активации миграции меняется скачком от нуля в температурном интервале 177-340C до постоянной величины в температурном интервале 340-412C. Температурный ход зависимости зернограничной подвижности можно объяснить следующим образом. В температурном интервале 177-340C, в

котором граница имеет упорядоченную структуру, движение границы происходит путём кооперативного бездиффузионного перемещения атомов, подстраивающихся под решётку растущего зерна, при этом каждый атом смещается на расстояние менее межатомного [4]. Энтальпия активации такого движения мала или практически равна нулю. Выше 340С имеет место фазовый переход структуры из упорядоченной в разупорядоченную. Высокотемпературный интервал характеризуется монотонной зависимостью зернограницной подвижности от обратной температуры с постоянной энтальпией активации 1.14 эВ. На рис.4 представлены полученные экспериментально данные температурной зависимости подвижности двойниковой некогерентной границы для 15 двойников, ширина которых меняется в пределах 10-25 мкм. Участок безактивационного движения для некоторых двойников распространяется от 177С до 380С. Однако для большинства двойников наблюдается активационное движение лишь от 340С.

Гистерезис зернограницной формы — неоднозначная петлеобразная зависимость формы границы от обратной температуры при её циклическом изменении. Вне зоны гистерезиса, которая ограничена верхней и нижней точками смыкания петли гистерезиса, наблюдается совпадение значений формы от обратной температуры. Температурная зависимость положения движущейся границы двойника показана на рис.3. Каждая указанная точка отвечает равновесному состоянию системы. Точки 1-7 соответствуют значениям положения движущегося участка границы, полученным при изотермических отжигах по схеме ступенчатого охлаждения. Исходное значение соответствует точке 1. При 412 С угол составляет 73°, а при 400 С 54°. Такое изменение положения происходит за счёт образования ступенек на границе (рис.2). Сначала образуется одна ступенька, затем каждая ступенька дробится еще на две и так продолжается, пока граница не становится гладкой под углом 54° к когерентной границе при наблюдении в оптический микроскоп. Дальнейшее снижение температуры отжига до 340С не приводит к изменению положения границы. При отжигах 7-17 по схеме ступенчатого нагрева наблюдается постепенное увеличение угла от 54° при отжиге при 340С до 73° градусов при отжиге до 360С. Если ступенчатое охлаждение сменить ступенчатым нагревом, видно, что линия положения границы идёт не так круто, как при ступенчатом охлаждении. Линии изменения положения границы, полученные по схеме ступенчатого нагрева и охлаждения, смещены по температуре на 60 градусов (340С-400С). Мы предполагаем, ступенчатое охлаждение от 412 С началось выше температуры фазового перехода и закончилось при 340С ниже температуры фазового перехода. Вероятно, что в области 340С 412С имеет место фазовый переход упорядоченной структуры в неупорядоченную, что приводит к увеличению энергии границы. Чтобы полная энергия системы не увеличивалась, граница должна сократить свою длину, например, за счёт изменения угла подхода к когерентной границе. Как известно, зернограницная энергии слабо меняется с температурой, поэтому нагрев от 365С до 410С не приводит к изменению положения границы

Выводы.

Мы сделали предположение, что фазовый переход из неупорядоченного положения границы в упорядоченное происходит в интервале 340 – 380С. Точное значение температуры фазового перехода таким косвенным способом определить нельзя из-за существования гистерезиса как формы, так и зернограницной подвижности некогерентной двойниковой границы.



Рисунок 1- Изображение движущегося фронта некогерентной двойниковой границы под углом 54° к когерентной границе. Ширина двойника 70 мкм



Рисунок 2 - Изображение движущегося фронта некогерентной двойниковой границы в процессе перестройки структуры границы. Ширина двойника 70 мкм. $T=390\text{C}$

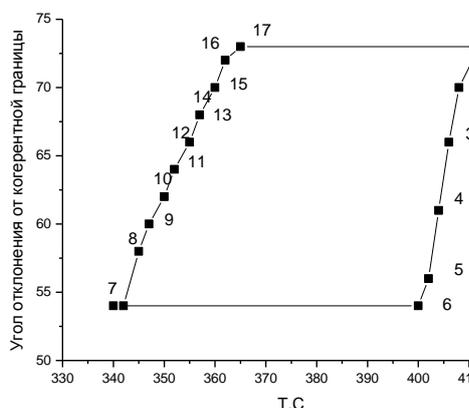


Рисунок 3 - Температурная зависимость угла между положением плоского движущейся и неподвижной когерентной двойниковой границами. Ширина двойника 70 мкм

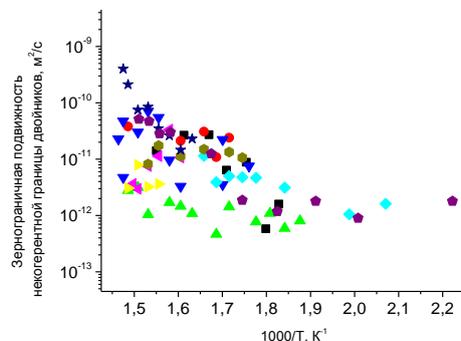


Рисунок 4 - Температурная зависимость подвижности некогерентной двойниковой границы в цинке для 15 двойников, ширина которых менялась в пределах 10-25 мкм

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

Литература.

1. Сурсаева В.Г. Горнакова А.С. Гистерезис подвижности при движении границы. В сборнике трудов Международного симпозиума перспективные материалы и технологии, 27-31 мая 2019, Брест.
2. Сурсаева В.Г. Влияние структурного фазового перехода на движение некогерентной двойниковой границы в цинке. Деформация и разрушение материалов.-2010. -№10. - С.10-14
3. Sursaeva V.G. Effect of faceting on twin grain boundary motion in zinc. Materials Letters. – 2010. T.64. –С.105-107.
4. Сурсаева В.Г. Изучение кинетики исчезновения двойников деформации в цинке при отжиге. Деформация и разрушение материалов. – 2006. -№10. – С.16-20.
5. 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.