ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/21

**ЭВОЛЮЦИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ОБЪЕМА ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОТЖИГЕ
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО НИКЕЛЯ И МЕДИ**

^{1,2}Кузнецов П.В., ^{1,2}Панин В.Е., ¹Рахматулина Т.В., ²Лаптев Р.С., ²Бордулев Ю.С.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

²*НИИ Томский политехнический университет, Томск, Россия*

В рамках концепции деформируемого твердого тела как многоуровневой иерархически организованной системы термодинамика процесса формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры описывается кривой зависимости потенциала Гиббса $F(v)$ от молярного объема v с учетом локальных минимумов, соответствующих образованию дефектов различной размерности, таких как вакансии, дислокации, границы разнообразного типа, а также вакансионных комплексов и нанопор [1]. Характерной чертой каждого типа дефекта является его определенный избыточный объем по сравнению с совершенной решеткой. Поэтому каждому ансамблю дефектов определенного типа в структуре УМЗ металла или сплава соответствует минимум на зависимости потенциала Гиббса от избыточного объема. В этой связи процесс отжига УМЗ и НК материалов можно рассматривать как возврат кристалла в основное состояние через систему локальных минимумов на зависимости термодинамического потенциала Гиббса $F(v)$ от молярного объема. Кроме того, низкотемпературный отжиг представляет также практический интерес с точки зрения исследования термической стабильности УМЗ состояния материала и его дальнейшего поведения при механическом нагружении.

Целью работы является количественная оценка избыточного объема и связанной с ним энергии, запасенных в УМЗ меди и никеле в процессе равноканального углового прессования (РКУП) и последующей прокатки и ее перераспределение в виде дефектов различной размерности при низкотемпературном отжиге.

В качестве объектов исследования выбраны чистые никель и медь, УМЗ структура которых получена методом РКУП. Чистые металлы выбраны с целью исключения влияния структурно-фазовых превращений и второй фазы на энергию границ зерен. В этом случае в выражении потенциальной энергии Гиббса вклад от членов, связанных с энтропией системы и химическим потенциалом ее компонент, незначителен.

Пространственные характеристики УМЗ структуры никеля и меди исследовали с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Оценка объема, освобождаемого при отжиге малоугловых и большеугловых границ (МУГ и БУГ), проводилась на основе подхода, развитого в [2].

Путем анализа зависимостей средних размеров элементов зеренно-субзеренной структуры (ЗСС) УМЗ меди и никеля от температуры на разных масштабных уровнях выявлены два структурных уровня деформации - уровень зеренной и субзеренной структуры. С ростом температуры на уровне субзерна наблюдали огрубление структуры, а на уровне зерна ее измельчение. Установлено, что величина объема, освобождаемого за счет роста субзерен и удаления МУГ, превышает величину избыточного объема границ новых зерен, образующихся при измельчении структуры. Полученные оценки указывают на энергетическую возможность этих двух процессов при отжиге.

С помощью позитронной аннигиляции (ПА) показано, что преимущественными центрами захвата позитронов в УМЗ никеле и меди являются дислокации, вакансии и их небольшие комплексы $\sim 2-9$ вакансий, которые проявляют высокую стабильность и сохраняются в структуре после низкотемпературного отжига. Величину избыточного объема, связанного с вакансиями и вакансионными комплексами в УМЗ никеле и меди в свежеприготовленном состоянии и после низкотемпературного отжига оценивали, используя модель захвата позитронов для двух типов дефектов [3]. Установлено, что избыточный объем, освобождаемый за счет отжига вакансионных кластеров, на три порядка меньше объема, освобождаемого за счет удаления МУГ в УМЗ меди и никеле при отжиге. Относительный

Секция 1. Основные принципы и методология физической мезомеханики материалов с иерархической структурой

объем, выделяемый при отжиге вакансионных кластеров в УМЗ меди, более чем в четыре раза превышает соответствующий объем в УМЗ никеле. Предполагается, что это связано с высокой термодинамической стабильностью деформационных дефектов в УМЗ никеле.

Количественную оценку относительной энергии внутренних границ раздела проводили путем измерения двугранного угла зернограницной канавки. Анализ интегральных функций распределения энергии (ИФРЭ), полученных после отжига образцов при разных температурах, позволил оценить перераспределение энергии между внутренними границами раздела с учетом избыточной энергии, связанной с отжигом вакансий и вакансионных комплексов, а также оценить вклад БУГ и МУГ.

ИФРЭ внутренних границ раздела УМЗ никеля как после РКУП и прокатки, так и после низкотемпературных отжигов имеют Гауссов вид. Только у рекристаллизованных образцов никеля ИФРЭ имеет степенной вид. Наличие низкотемпературных зон гиперболического возрастания ИФРЭ связано с высокой стабильностью малоугловых границ в УМЗ никеле. Отсутствие таких границ в рекристаллизованных образцах никеля обуславливает степенное возрастание ИФРЭ. Гауссов вид ИФРЭ внутренних границ раздела УМЗ меди наблюдается только у образцов после РКУП и прокатки. После низкотемпературного отжига при всех исследованных температурах, а также у рекристаллизованных образцов, ИФРЭ имеют только степенной вид. Это означает, что МУГ в меди менее стабильны и отжигаются при небольших температурах. Полученные различия обсуждаются с учетом разных температур плавления, энергий дефекта упаковки и электронной структуры двух металлов.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований СО РАН на 2017-2020 годы, проект III.23.1.1.

Литература

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения// Физическая мезомеханика. 2009. Т.12. №4. С.7-26.
2. Palumbo G., Thorpe S. On the contribution of triple junction to the structure and properties of nanocrystalline materials// Scr. Metall. V.24. 1990. P.1347-1350.
3. Staab T.E.M., Krause-Rehberg R., Kieback B. Review Positron annihilation in fine-grained materials and fine powders—an application to the sintering of metal powders// J. Mater. Sci. 1999 V.34. P.3833 – 3851.