

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Сахарова Никиты Владимировича

**«Экспериментальное и теоретическое исследование влияния зернограницных дефектов на кинетику роста зерен в чистой меди»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Процесс термообработки предварительно деформированного металла, направленный на получение полностью рекристаллизованного материала или металла с заданными параметрами микроструктуры (например, среднего размера зерен) относится к стандартным технологическим процессам, применяемым при производстве широкого круга изделий. Классическая феноменологическая теория (формальная теория рекристаллизации) оказывается неприменимой для описания целого ряда закономерностей, наблюдаемых при первичной рекристаллизации. Это указывает на необходимость использования новых подходов к описанию первичной рекристаллизации. Одним из перспективных подходов, который может быть использован для построения моделей первичной рекристаллизации, является подход, основанный на детальном анализе дефектов, формирующихся в материале при деформации и претерпевающих изменения и превращения в процессе термической обработки. Теоретические работы, которые описывали бы процессы рекристаллизации и роста зерен «на языке» теории дефектов, немногочисленны. Это делает диссертацию Сахарова Н.В., посвященную теоретическому и экспериментальному исследованию влияния дефектов на кинетику роста зерен, весьма актуальной.

### **Научная новизна**

В ходе решения поставленных задач автору диссертации удалось получить несколько новых научных результатов. Наиболее значимыми из них, на мой взгляд, являются следующие теоретические модели, разработанные по результатам исследования:

1. Построена модель первичной рекристаллизации в меди высокой чистоты. Результаты моделирования позволили установить, что при высоких степенях предварительной деформации в чистых металлах зародыши рекристаллизации формируются уже на стадии деформации. В модели продемонстрировано, что объемная доля рекристаллизованного материала экспоненциально зависит от времени

изотермического отжига, а энергия активации процесса совпадает с энергией активации диффузии по неравновесным границам зерен.

2. Разработана модель влияния примесей на процесс первичной рекристаллизации чистых металлов. В предложенной модели показано, что изменение энергии активации рекристаллизации в меди разной чистоты обусловлено различной концентрацией примесей в границах зерен и, как следствие, разной величиной относительного свободного объема границ зерен.

3. Предложена новая модель влияния двойников отжига на торможение движущихся границ зерен в высокочистых металлах с низкой энергией дефекта упаковки. Согласно предложенной модели, двойники отжига, сформированные в материале на стадии первичной рекристаллизации, являются «стопорами» границ зерен и обеспечивают повышенную термическую стабильность зеренной структуры металла.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Основные положения, вынесенные на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации, являются обоснованными с точки зрения современных представлений теории дефектов. Все модели, предложенные в диссертационном исследовании, равно как и их численные реализации, сформулированы на строгом математическом языке. Результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах и прошли апробацию на российских и международных конференциях.

С учетом вышесказанного, можно сделать вывод о том, что степень достоверности положений оппонируемой диссертации отвечает всем предъявляемым требованиям.

### **Значимость полученных результатов для науки и практики**

Диссертационное исследование Сахарова Н.В. является важным научным трудом, выполненным на высоком методическом уровне. Результаты исследования, несомненно, представляют интерес для физики дефектов. Результаты, полученные в диссертации, вносят существенный вклад в развитие представлений о механизмах процессов первичной и собирательной рекристаллизации и влиянии дефектов структуры на кинетику их протекания. Подходы, использованные при построении моделей, могут быть использованы при разработке новых моделей и теорий, описывающих различные аспекты эволюции дефектной структуры материалов при отжиге.

## Анализ содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и трех приложений.

Во введении приведено обоснование актуальности исследования, сформулированы цели и основные задачи работы. Представлена информация о степени новизны достигнутых результатов и информация об их апробации.

В первой главе автор приводит результаты обзора основных теоретических представлений и экспериментальных работ, посвященных изучению первичной рекристаллизации и роста зерен. В первой части обзора анализируются типичные экспериментальные значения энергии активации  $Q$  и параметра уравнения Аврами  $n$ , получаемые исследователями при изучении первичной рекристаллизации с использованием формальной теории рекристаллизации и уравнения Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова. Следующая часть обзора посвящена обобщению данных, относящихся к изучению первичной рекристаллизации в материалах разной химической чистоты. В третьей части обзора приведены результаты анализа работ, посвященных исследованию влияния двойников отжига на рост зерен в высокочистых металлах. В первой главе также представлено краткое изложение основ теории неравновесных границ зерен, методы и подходы которой используются в последующих главах диссертации. Глава завершается подробным описанием задач, поставленных автором диссертационного исследования.

Во второй главе автор подробно описывает методики экспериментальных исследований, которые были задействованы в работе. Очень подробно описана методика дифракции обратно отраженных электронов, проведено ее сравнение с другими методами структурных исследований – оптической и электронной микроскопией. В этой же главе приводится описание объектов экспериментальных исследований и способах пробоподготовки образцов.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований, структурированные аналогично тому, как структурированы результаты литобзора в первой главе. Сначала приводятся результаты экспериментального исследования первичной рекристаллизации в меди разной степени химической чистоты, затем – результаты экспериментального изучения влияния двойников отжига на рост зерен в процессе собирательной рекристаллизации.

В главах с четвертой по шестую автор подробно описывает результаты моделирования. Модель первичной рекристаллизации представлена в четвертой

главе, модель влияния примесей на кинетику первичной рекристаллизации – в пятой, а модель влияния двойников отжига на рост зерен – в шестой. Каждая глава, посвященная моделированию, заканчивается подробным сопоставлением его результатов с результатами экспериментальных исследований.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

### **Замечания по содержанию работы**

1. При изучении первичной рекристаллизации экспериментальные исследования были выполнены на образцах меди чистотой 99,9995%, 99,995% и 99,99% (5N5, 4N5 и 4N, соответственно), однако для изучения роста зерен была выбрана медь 4N5 и 4N, материал чистотой 5N5 не был исследован. Причины такой избирательности не указаны в диссертации.

2. Для определения объемной доли рекристаллизованного материала в отожженных образцах диссертантом была использована методика дифракции отраженных электронов (EBSD). При этом информация о кристаллографической ориентации зерен, спектре разориентировок границ не использовалась при построении модели первичной рекристаллизации. В связи с этим использование методики EBSD кажется излишним – можно было бы обойтись более простыми и эффективными методами структурных исследований – оптической и электронной микроскопией.

3. Для подтверждения адекватности модели первичной рекристаллизации, предложенной в диссертации, были проведены вычисления параметров  $R_1^2$  и  $R_2^2$ , применительно к которым было указано только то, что они «характеризуют точность аппроксимации» экспериментальных данных прямыми в выбранных координатах. Учитывая высокое значение, которое придается этим параметрам (фактически, по их величине выносится суждение о годности или негодности предлагаемой модели), необходимо подробнее описать процедуру их вычисления.

4. Известно, что на процесс роста зерен может оказывать влияние наличие кристаллографической текстуры в материале. При этом одной из экспериментальных методик, используемых для анализа кристаллографических текстур, является методика EBSD, которая была использована в качестве основной в диссертационном исследовании. Таким образом, в распоряжении автора диссертации был значительный объем данных, характеризующих тип кристаллографических текстур, которые сформированы в исследованных образцах. Однако, эти данные не были использованы

– влияние текстур на первичную и собирательную рекристаллизацию не было проанализировано.

Приведенные замечания не имеют принципиального характера и не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

### **Общее заключение**

Диссертационная работа Сахарова Н.В. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему: разработка нового подхода к описанию процесса роста зерен в высокочистой меди, который основывается на гипотезе о том, что кинетика процесса определяется особенностями поведения зернограницных дефектов в границах зерен.

Диссертационная работа «Экспериментальное и теоретическое исследование влияния зернограницных дефектов на кинетику роста зерен в чистой меди» по объему и оригинальности полученных результатов, научной и практической значимости, выводов, целям и задачам соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, а ее автор, Сахаров Никита Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

директор Института структурной макрокинетики  
и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова  
Российской академии наук,  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

Алымов Михаил Иванович

25 ноября 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения  
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН),  
142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8.  
Тел.: +7 (49652) 46-376, E-mail: [alymov@ism.ac.ru](mailto:alymov@ism.ac.ru)

Подпись Алымова М.И. заверяю.  
Ученый секретарь ИСМАН, к.т.н.

Петров Евгений Владимирович