

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2
Тел.: +7 (495) 777-93-01; факс: +7 (495) 777-93-00
e-mail: chermet@chermet.net
www.chermet.net

Первый заместитель генерального
директора ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им.
И.П. Бардина»



Еремин
Геннадий
Николаевич

«14» 11 2024 год № 5118-4110
на № от

ОТЗЫВ

ведущей организации – Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» – 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 диссертации

Изучение процессов рекристаллизации и роста зерен вызывает интерес ученых на протяжении десятков лет. Неослабевающий интерес исследователей к этой области материаловедения во многом обусловлен высокой практической значимостью рекристаллизации и роста зерен: именно эти процессы определяют параметры микроструктуры материалов в состоянии после деформации и последующих отжигов – технологических операций, повсеместно применяемых для изготовления различных изделий и полуфабрикатов. Успехи ученых в области изучения рекристаллизации и роста зерен позволили сформулировать общие закономерности, описывающие структурные изменения, которые претерпевает материал в процессе термомеханической обработки.

Однако сложность и многогранность процессов, одновременно протекающих в материалах при деформации и отжиге, не всегда позволяет точно описывать изменение микроструктуры материалов в рамках имеющихся теоретических моделей. Таким образом, построение новых моделей, позволяющих с разных сторон взглянуть на рекристаллизацию и рост зерен, является весьма актуальным.

В области экспериментальных методов, используемых для изучения рекристаллизации и роста зерен, в настоящее время наблюдается существенный прогресс. Так, с появлением методики дифракции отраженных электронов (EBSD) стало возможным изучение разориентировок в больших ансамблях зерен и, как следствие, определение количественных характеристик ансамблей двойников отжига, формирующихся в металлах с низкой энергией дефекта упаковки. При этом работы исследователей, посвященные двойникам отжига, в основном, сфокусированы на изучении механизмов образования двойников; вопросы их влияния на рекристаллизацию и рост зерен пока остаются в тени.

Диссертационная работа Н.В. Сахарова посвящена изучению первичной и собирательной рекристаллизации в высокочистой меди – материале с высокой долей двойников отжига. В исследовании проанализировано влияние дефектов на кинетику первичной и собирательной рекристаллизации, проведен теоретический анализ особенностей взаимодействия границ с зернограничными дефектами, исследовано влияние двойников отжига на кинетику роста зерен. В связи с вышесказанным, тема диссертационной работы Н.В. Сахарова представляется весьма актуальной.

Научная новизна диссертационной работы

Используя методы и подходы, развитые в теории неравновесных границ зерен, Сахаров Н.В. получил ряд новых интересных результатов, которые представлены в диссертации и отражены в научных положениях, выносимых на защиту. Особо следует отметить результаты теоретических исследований, перечисленные ниже.

1. В исследовании построена новая модель первичной рекристаллизации меди, подвергнутой интенсивной пластической деформации. Показано, что при высокой степени предварительной деформации процесс формирования зародышей рекристаллизации завершается уже на стадии деформации, при отжиге новые зародыши не образуются. При последующем отжиге кинетика увеличения размеров сформированных зародышей контролируется кинетикой эволюции зернограничных дефектов. Показано, что временная зависимость объемной доли рекристаллизованного материала описывается экспоненциальной зависимостью, аналогичной уравнению Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова с коэффициентом $n = 1$ и энергией активации, равной энергии активации диффузии по неравновесным границам зерен.

2. В диссертационном исследовании построена модель влияния примесей на кинетику первичной рекристаллизации. Показано, что в высокочистой меди,

подвергнутой интенсивной пластической деформации, величина энергии активации первичной рекристаллизации определяется изменением относительного свободного объема границ зерен, вызванного «заметанием» атомов примесей в процессе миграции границ.

3. В исследовании предложена новая модель влияния двойников отжига на рост зерен в высокочистой меди. В модели показано, что в материале высокой чистоты основной причиной торможения границ при собирательной рекристаллизации являются двойники отжига, примыкающие к границам зерен.

Основное содержание диссертации

Структура диссертации соответствует логике исследования и включает в себя введение, шесть глав, заключение и список литературы из 105-ти наименований. Работа изложена на 132-х страницах, содержит 41 рисунок и 19 таблиц.

Во введении сформулированы задачи, решаемые в диссертационной работе, представлены положения, выносимые на защиту, обоснована актуальность работы, ее новизна и практическая значимость.

В первой главе представлены результаты литературного обзора по теме исследования. Также приведено описание основных положений теории неравновесных границ зерен, основные подходы и понятия которой использованы при построении теоретических моделей.

Во второй главе подробно описаны объекты исследования и методики, использованные при проведении экспериментов. Приведено подробное обоснование выбора основной экспериментальной методики, использованной при проведении структурных исследований образцов отожженной меди (методики дифракции отраженных электронов).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований высокочистой меди. Приведены результаты изучения первичной и собирательной рекристаллизации меди разной химической чистоты.

Основные результаты – результаты моделирования – представлены в главах с четвертой по шестую. В четвертой главе приведено подробное описание модели первичной рекристаллизации. В модели предложено новое определение понятия зародыша рекристаллизации. Зародыш определяется как свободный от дефектов участок материала, который окружен большеугловыми границами с распределенными в них дефектами. Показано, что наличие зернограницных дефектов существенным образом

влияет на кинетику протекания первичной рекристаллизации. В модели подробно проанализированы изменения, происходящие с зернограницными дефектами при отжиге, и показано, что временная зависимость объемной доли рекристаллизованного материала имеет экспоненциальный вид. Результаты вычислений, выполненных с применением предложенной модели, показали, что расчетные значения энергии активации зернограницной диффузии совпадают с характерными значениями энергии активации диффузии по неравновесным границам зерен.

В пятой главе описана модель влияния примесей на первичную рекристаллизацию чистой меди, приведены результаты ее сопоставления с экспериментом. Согласно предлагаемой модели, изменение энергии активации первичной рекристаллизации обусловлено изменением относительного свободного объема границ зерен, вызванным попаданием атомов примесей в границы. В модели получено уравнение, связывающее объемную концентрацию основных примесей с энергией активации первичной рекристаллизации. Показано, что результаты расчетов по уравнениям, полученным в предложенной модели, хорошо согласуются с результатами эксперимента.

В шестой главе представлена модель влияния двойников отжига на рост зерен в высокочистой меди. В предложенной модели объясняется эффект торможения движущихся границ зерен в меди высокой чистоты. Показано, что в качестве «стопоров» движущихся границ выступают двойники отжига, сформированные в материале на стадии первичной рекристаллизации. Торможение обусловлено необходимостью затрат энергии на создание нового участка границы общего типа вместо участка двойниковой (специальной) границы. В модели получено уравнение, связывающее объемную долю и размер двойников отжига с величиной силы торможения движущейся границы. Приведены результаты сопоставления результатов расчетов по уравнению, предложенному в модели, с экспериментальными значениями силы торможения. Продemonстрировано удовлетворительное согласие теории и эксперимента.

Практическая значимость диссертационной работы

Разработанные модели первичной рекристаллизации могут быть полезны при оптимизации режимов термообработки деформированных металлов высокой чистоты. Подход, предложенный в модели влияния двойников отжига на рост зерен, может быть использован для стабилизации зеренной структуры высокочистых металлов с низкой энергией дефекта упаковки.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе

Результаты моделирования, полученные в работе, хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, полученных диссертантом, и результатами экспериментов других авторов. Это подтверждает достоверность основных результатов и обоснованность выводов и положений, вынесенных на защиту. Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в 4-х научных публикациях в ведущих российских журналах. Результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

Представленные материалы диссертационной работы Сахарова Н.В. не лишены недостатков, по которым можно сделать ряд замечаний.

1. Описание модели первичной рекристаллизации, изложенное в главе 4, не позволяет отчетливо определить границы ее применимости. В частности, непонятно, будет ли «работать» модель применительно к материалам, деформированным до высоких степеней деформации (например, полученных методами интенсивной пластической деформации, такими как равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением и пр.). Также неясно, можно ли ее применять для описания рекристаллизации металлов, степень предварительной деформации которых, напротив, невысока. Кажется целесообразным сформулировать границы применимости модели в виде интервала значений степени деформации, в котором модель «работает».

2. Актуальным также является вопрос о возможности применения модели для описания первичной рекристаллизации сталей: было бы полезно указать, для каких сталей (или групп сталей) может быть использована модель первичной рекристаллизации, разработанная в диссертации.

3. Применительно к модели влияния примесей на первичную рекристаллизацию может быть сформулировано замечание, аналогичное приведенному в п.1: из описания модели непонятно, при каких концентрациях примесей (или при, каком уровне химической чистоты материала) она еще «работает», а при каких ее использование уже затруднено. От каких параметров материала зависят границы применимости модели? По возможности, эти границы следует привести в виде интервала значений объемной концентрации примесей.

4. В модели влияния примесей на кинетику первичной рекристаллизации, описанной в пятой главе диссертации, не конкретизирован тип примесей, которые могут

влиять на изменение относительного свободного объема границ. Из текста следует, что примеси легких элементов, таких как водород, кислород, углерод и азот, исключены из рассмотрения. На это также указывают результаты химического анализа исследованных материалов, приведенные в таблице 10 (глава 3). Следует уточнить, возможно ли в предложенной модели учесть влияние примесей легких элементов на кинетику рекристаллизации.

5. На рисунке 6 в первой главе диссертации приведено схематичное описание двойников отжига различных типов. Как следует из рисунка, в материалах могут формироваться двойники разных конфигураций. В модели влияния двойников отжига на рост зерен, описанной в главе 6, рассмотрены только двойники, «примыкающие к границам зерен». Под это определение попадают двойники, обозначенные на рисунке 6, как «В» и «С», двойники типа «А» и «D» не рассматриваются. Возможность не учитывать двойники типа «А» и «D» необходимо обосновать.

Общая оценка диссертационной работы

Отмеченные недостатки не уменьшают ценность работы и не влияют на основные выводы и защищаемые положения. Все выводы и положения, выносимые на защиту, обладают актуальностью и новизной, а личный вклад соискателя не вызывает сомнений. В целом диссертация Сахарова Никиты Владимировича выполнена на достаточно высоком уровне и является завершенной научно-исследовательской работой.

Автореферат полностью соответствует содержанию и структуре диссертации, а также адекватно отражает полученные в работе результаты.

На основании изложенного считаем, что диссертация Сахарова Никиты Владимировича соответствует паспорту специальности 1.3.8.Физика конденсированного состояния и требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, в том числе пп. 9-10 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Сахаров Никита Владимирович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8.Физика конденсированного состояния.

Диссертация соискателя и отзыв на нее были заслушаны и обсуждены на расширенном заседании научно-технического совета научного центра Металловедения и

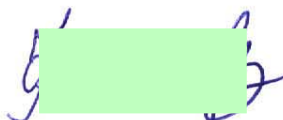
физики металлов ГНЦ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» 23 октября 2024 г. (протокол № 10). Результаты голосования: «За» – 18 чел., «Против» – нет, «Воздержались» – нет.

Зам. председателя НТС НЦ МФМ



д.ф.-м.н., доцент Сундеев Р.В.

Секретарь НТС НЦ МФМ



к.ф.-м.н. Филиппова В.П.

Сведения о ведущей организации

Адрес: 105005, г. Москва, ул. Радио, дом 23/9, стр.2

Наименование организации: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

Телефон: +7 (495) 777-93-01

Адрес электронной почты: chermet@chermet.net