

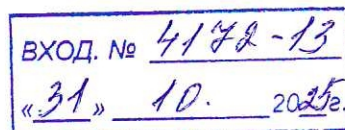
ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Имаева Марселя Фанировича на диссертационную работу Аксенова Дениса Алексеевича «Немонотонное изменение структуры и физико-механических свойств при кручении под высоким давлением сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Диссертационная работа посвящена актуальной теме разработки материалов электротехнического направления, обладающих высокой электропроводностью и прочностью. Одними из наиболее перспективных материалов являются дисперсионно-упрочняемые сплавы системы Cu-Cr-Zr. В формировании свойств этих сплавов важную роль играют фазовые превращения. Известно, что методы интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяют существенно повысить прочность металлов и сплавов, однако, в ряде случаев в условиях высоких напряжений можно наблюдать нетипичные фазовые превращения, например, деформационно-индуцированное растворения частиц вторых фаз. С развитием технологических процессов обработки металлов и сплавов, с внедрением принципов ИПД встает вопрос установления закономерностей и основных механизмов фазовых превращений с целью определения рациональных режимов обработки, направленных на получение комплекса повышенных функциональных свойств материалов. Диссертационная работа Аксенова Д. А. посвящена исследованию изменений структуры и физико-механических свойства сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr, который является одним из самых распространенных и востребованных технических дисперсионно-упрочняемых медных сплавов электротехнического назначения.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении автор обосновывает интерес к низколегированным электропроводным бронзам системы Cu-Cr-Zr как к перспективным конструкционным материалам, сочетающие высокую прочность и электропроводность. Благодаря применению методов ИПД в сплавах Cu-Cr-Zr удастся получать наноструктурированные состояния, обладающие уникальным комплексом физико-механических свойств. В формировании высоких показателей этих бронз огромную роль играют процессы распада пересыщенного твердого раствора (ТР) и характеристики ансамбля частиц, выделяющихся в процессе его распада. В большинстве работ по ИПД сплавов системы Cu-Cr-Zr термомеханическая обработка проводилась после закалки, т.е. в состоянии с пересыщенным твердым раствором, а затем сплав подвергался старению с дисперсионным твердением и сохранением



наноструктурного состояния матрицы. Однако большой интерес представляет воздействие ИПД на предварительно состаренный сплав, содержащий в структуре значительную долю частиц вторых фаз, т.к. в условиях ИПД кинетика фазовых превращений может существенно изменяться и это возможно позволит достичь повышенного комплекса функциональных свойств. В большинстве исследований, выполненных на низколегированных бронзах, не ставилась цель определения картины деформационно-индуцированного растворения в данных системах. Поэтому цель данной работы, заключающаяся в установлении закономерностей структурно-фазовых превращений и формирование комплекса физико-механических свойств при наноструктурировании путем ИПД сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в исходно состаренном состоянии с ансамблем крупных частиц вторых фаз представляется актуальной и обоснованной.

В первой главе представлен литературный обзор на основе 160 ссылок, в котором подробно рассмотрено состояние исследований на момент постановки работы. Отмечается, что медные сплавы с низким содержанием легирующих элементов на фоне остальных бронз и латуней характеризуются уникальным сочетанием высокой прочности и высокой электропроводности. Из высокоэлектропроводных медных сплавов наибольшее распространение получили низколегированные хромциркониевые бронзы. Их активно используют в промышленности и научных исследованиях. Установлено, что в структуре данных сплавов в состоянии равновесия с твёрдым раствором находятся фазы, относящиеся к системам меди с хромом и цирконием. Показано, что в условиях ИПД под действием высоких сдвиговых напряжений и повышенной скорости диффузии может меняться характер фазовых превращений. Описаны результаты работ по изучению на фазовый состав длительности старения, а также влияние на этот процесс содержания хрома и циркония. Подробно рассмотрены механизмы деформационно-индуцированного растворения фаз. Отмечены работы, в которых изучено динамическое равновесие между конкурирующими процессами фазовых превращений в сплавах меди с серебром, кобальтом, оловом подвергнутых ИПД. Экспериментально установлено, что в условиях ИПД одновременно могут протекать два взаимосвязанных процесса: 1) распад пересыщенного твердого раствора с выделением вторичных фаз; 2) деформационно-индуцированное растворение дисперсных частиц в матрице.

Во второй главе описаны материал и методики эксперимента. Были использованы три материала: 1) технически чистой медь; 2) сплав Cu-0,6Cr-0,1Zr отожженный при 1050°C в течение 1 ч с последующей закалкой в воду; 3) тот же сплав после прокатки и старения при 450°C в течение 4 ч, в результате чего было получено крупнозернистое структурное

состояние с предельно низкой концентрацией твердого раствора и ансамблем частиц крупного (более 100 нм) размера.

Описана методика кручения под высоким давлением. Применен комплекс современных методов для исследования структуры и свойств. Все исследования выполнены на образцах из центральной зоны заготовок (R/2). Для анализа структурных и фазовых превращений применен метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), рентгеноструктурного анализа (РСА), растровой и просвечивающей электронной микроскопии (РЭМ и ПЭМ). Автор использовал уникальную методику исследования частиц вторичных фаз – методику экстракционных угольных реплик. Для получения данных по прочностным характеристикам проведены измерения микротвердости по диаметру образцов и механические испытания на растяжение.

Третья глава посвящена исследованию влияния интенсивной пластической деформации кручением под давлением на изменения структуры и свойств сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в состоянии с низкой концентрацией твердого раствора.

При ИПД сплава, подвергнутого длительному старению, наблюдается немонотонное поведение электропроводности и параметра решетки матрицы. Максимальная концентрация ТР достигается после 5-6 оборотов. Эти данные согласуются с результатами изучения эволюции ансамбля частиц вторичных фаз. После малого количества оборотов плотность наноразмерных частиц возрастает, достигая максимума после 4-х оборотов. Но после 6-ти оборотов резко снижается. По мере дальнейшего увеличения количества оборотов плотность наноразмерных вновь растет. Данную закономерность автор объясняет тем, что первоначальный рост плотности наночастиц связан с разрушением исходных крупных частиц (микронного размера). Минимум плотности частиц после 6-ти оборотов связан с растворением частиц, а последующее возрастание их количества – с уменьшением концентрации твердого раствора. Микротвердость коррелирует с данными по электропроводности, параметру решетки и плотностью частиц: после 6-ти проходов наблюдается минимум микротвердости. Расчеты прочности, основанные на измеренных значениях размеров зерен, плотности частиц и дислокаций, а также рассчитанных концентрациях твердого раствора, показывали удовлетворительное согласие с наблюдаемым немонотонным изменением механических свойств сплава, определяемыми характеристиками концентрации твердого раствора и плотности наноразмерных частиц, обеспечивающих основной вклад в упрочнение.

В четвертой главе представлена модель фазовых превращений при наноструктурировании сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в состоянии с низкой концентрацией твердого раствора. В главе проведена всесторонняя интерпретация экспериментальных

данных на основе концентрационного соотношения Гиббса-Томпсона. Важной особенностью теории Гиббса-Томпсона является то, что положение линии равновесия фаз зависит от радиуса кривизны границы раздела, поэтому в каждый данный момент одни частицы находятся в однофазной области и растворяются, а другие – в двухфазной и растут. Предложенная модель качественно объясняет характерные особенности изменения физико-механических свойств сплава по мере накопления деформации в ходе ИПД.

В последнем разделе Главы 4 проведена количественная оценка коэффициента диффузии хрома в меди после 7 -ми проходов ИПД. Для этого автор воспользовался количественными данными по размеру и расположению частиц, полученными методом угольных экстракционных реплик. Установленное значение эквивалентно коэффициенту диффузии при температуре 540-550 °С, что свидетельствует о значительной активизации диффузионных процессов при ИПД.

В целом можно заключить, что автор проделал значительную работу по изучению роли ИПД в фазовых превращениях в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr , обнаружил стадийность процессов растворения вторичных частиц и динамического старения, разработал феноменологическую модель протекающих при ИПД процессов. Полученные результаты могут быть полезны при разработке и оптимизации новых технологических процессов получения наноструктурированных материалов с использованием ИПД.

По работе можно сделать несколько замечаний.

1) Для вычисления степени накопленной деформации автор использует формулу Мизеса 1913 года, которая учитывает только деформацию сдвига. Между тем при кручении тонкого диска под давлением происходит также и его осадка. В этой связи автору следовало бы использовать более корректную формулу Еникеева-Утяшева [1], которая учитывает обе компоненты деформации.

[1] Ф.З. Утяшев. Современные методы интенсивной пластической деформации: учебное пособие/ Ф.З. Утяшев; УГАТУ- Уфа, 2008. – 313 с.

2) Недостаточно полно описана методика измерения удельной электропроводности. Не указано, на каких образцах проводили измерение: на образцах диаметром 3 мм, вырезанных из центральной части, или на целых заготовках диаметром 10 мм? Кроме того, известно, что показания вихретокового измерителя зависят от толщины образца, особенно сильно в области малых толщин. Очевидно, что толщина образцов зависит от количества оборотов. В работе не указано, приводили ли образцы к одной толщине.

3) Не указано как измеряли размер зерен – с учетом или без учета двойниковых границ.

4) Для анализа ансамбля частиц автор использовал методику экстракционных реплик. Однако, в работе не указана ошибка измерения параметров частиц данным методом. Было бы полезно указать несколько результаты, полученные данным методом, согласуются с другими методиками, например, методами рентгеновской дифракции или просвечивающей микроскопии тонких фольг.

5) В таблице 3.2. указан параметр «N». В тексте и формулах 3.12 – 3.16 этот параметр не встречается. Не ясно, что это за параметр.

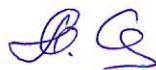
Несмотря на высказанные замечания, считаю, что диссертационная работа Аксенова Д.А. заслуживает положительной оценки. Сделанные замечания не умаляют ее достоинств. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях, из них 6 в журналах перечня ВАК и 2 в журналах, индексируемых в SCOPUS. Реферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой высокого научного уровня, соответствующей п.9. Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. От 16.10.2024), удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы, а ее автор Аксенов Денис Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук.

« 30 » октябрь 2025 г.



Имаев Марсель Фанирович

450001, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39

тел.: (347)282-37-35

e-mail: marcel@imsp.ru

Подпись Имаева М.Ф. удостоверяю:

Начальник отдела кадров ФГБУН
ИПСМ РАН



Соседкина Т.П.