

ОТЗЫВ

официального оппонента Бориса Борисовича Страумала на диссертационную работу Дениса Алексеевича Аксенова на тему «Немонотонное изменение структуры и физико-механических свойств при кручении под высоким давлением сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Актуальность темы исследования

Сплавы системы Cu-Cr-Zr относят к перспективным конструкционным материалам, так как они позволяют достичь высоких характеристик электропроводности и прочности. Особенно высокие значения прочности на сплавах данной системы возможно получать при обработке методами интенсивной пластической деформации (ИПД), которые позволяют измельчать зёрнистую структуру до ультрамелкозернистого/наноструктурного состояния. При этом важную роль в достижении высоких прочностных характеристик в данном классе сплавов играют фазовые превращения, а именно – процессы распада пересыщенного твердого раствора с образованием упрочняющих наночастиц.

При использовании традиционной схемы обработки термоупрочняемых сплавов системы Cu-Cr-Zr упрочнение происходит на втором и третьем этапе обработки после высокотемпературного отжига в процессе деформационной обработки. Материал упрочняется за счет наклепа и старения за счет распада пересыщенного твердого раствора. Во многих работах, посвященных анализу структурных изменений в процессе обработки методами ИПД, отмечались фазовые превращения, не характерные для традиционных деформационных методов, такие как например аморфизация и кристаллизация в аморфных сплавах, механосплавление и растворение частиц вторых фаз. Как правило для разработки физических моделей происходящих фазовых превращений необходимо учитывать особенности

каждого сплава в отдельности, поэтому задача изучения кинетики фазовых превращений в условиях ИПД остается актуальной.

Большую значимость представленной темы исследования составляет дальнейшее развитие высокопроизводительных деформационных методов, основанных на принципах ИПД. Поскольку процессы динамического старения и растворения частиц вторых фаз играют большую роль в формировании высоких значений прочности термоупрочняемых медных сплавов, необходима идентификация и изучение механизмов структурно-фазовых превращений для рационализации режимов деформационной обработки при повышении технологичности промышленных процессов.

Общая характеристика работы

Представленная диссертационная работа изложена на 120 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 44 рисунка и 7 таблиц. Список цитируемой литературы включает 160 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения о личном вкладе автора, приводится список публикаций автора по теме диссертации и данные об апробации работы. **В первой главе** содержится аналитический обзор научной литературы по теме исследования. Описаны работы по изучению структурно-фазовых превращений, происходящих в условиях интенсивной пластической деформации в различных металлах, сплавах, а также аморфных материалах. Рассмотрены также работы, в которых представлены модели растворения частиц вторых фаз.

Во второй главе содержится описание материалов, использованных в работе, режимов термомеханической обработки и основных методов исследования структуры и физико-механических характеристик. Дано описание процедуры получения различных исходных структурных состояний

сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr с пересыщенным твердым раствором (ТР) и с низкой концентрацией в твердом растворе.

В третьей главе представлены результаты исследования изменения структуры и физико-механических свойств при кручении под высоким давлением (КВД) технически чистой меди М1 и сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в двух исходных структурных состояниях (первое состояние с пересыщенным ТР и второе – с низкой концентрацией в ТР). Проведена оценка вкладов механизмов упрочнения в предел текучести.

Установлено немонотонное изменение концентрации твердого раствора при КВД сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr . Показано, что в условиях КВД на начальном этапе при накопленной степени деформации ϵ от 0 до $\epsilon \approx 70$ происходит преимущественно механическое измельчение исходных частиц вторых фаз до наноструктурных размеров. А также формирование частиц с острыми гранями. На следующем этапе при увеличении степени ϵ до ≈ 110 происходит растворение частиц неравновесной формы, что приводит к повышению концентрации твердого раствора. На третьем этапе происходит распад пересыщенного твердого раствора и дисперсионное упрочнение материала.

В четвертой главе проведен анализ полученных экспериментальных данных и представлена феноменологическая модель, объясняющая немонотонные фазовые превращения в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr с исходно низкой концентрацией ТР при КВД на основе известного соотношения Гиббса-Томпсона. Данное концентрационное соотношение учитывает радиус кривизны и величину поверхностной энергии частиц. Поэтому образование частиц с малым радиусом кривизны в процессе КВД переводит их в состояние, соответствующее однофазной области выше концентрационной кривой диаграммы состояния, что приводит к их растворению. Представлены результаты оценки коэффициента диффузии хрома в медной матрице на седьмом обороте КВД. Этот коэффициент диффузии составил $2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$.

По результатам проведённого исследования сделаны общие выводы, которые представлены в разделе "Заключение".

Научная новизна

1. Установлена стадийность структурно-фазовых превращений сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr , имеющем в исходном состоянии ансамбль крупных частиц и низкую концентрацию в ТР.
2. Установлена немонотонная зависимость изменения электропроводности и механических свойств в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr от накопленной степени деформации при КВД, обусловленная обнаруженными закономерностями структурно-фазовых превращений частиц вторых фаз.
3. Разработана феноменологическая структурно-фазовых превращений сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr с исходно низкой концентрацией в ТР, объясняющая их немонотонное изменение при КВД.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Установлена роль ИПД в фазовых превращениях в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr при КВД. В условиях КВД происходит механическое измельчение частиц вторых фаз с образованием острых граней. Данное состояние для частиц является неравновесным вследствие чего в процессе деформации происходит их растворение и увеличение концентрации ТР. Описанный механизм обусловлен эффектом Гиббса-Томпсона, который заключается в изменении радиуса кривизны частицы и поверхностной энергии.
2. Разработанная феноменологическая модель фазовых превращений сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr имеющем в исходном состоянии ансамбль крупных частиц и низкую концентрацию ТР, позволяет объяснить немонотонное изменение концентрации твердого раствора и физико-механических свойств при КВД.

3. Идентификация механизма и анализ происходящих фазовых превращений при ИПД сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в состоянии пересыщенного ТР и с низкой его концентрацией помогут рационализировать режимы деформационной обработки высокотехнологичными методами, основанными на принципах ИПД.

Достоверность результатов и выводов

Научные выводы основаны на результатах анализа статистически достоверных экспериментальных данных, полученным при помощи современных методов исследования и в частности специальной методики угольных экстракционных реплик. Результаты исследования прошли обсуждение на научных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК и международные системы цитирования Scopus.

Замечания по диссертационной работе

К диссертационной работе Д.А. Аксенова имеются следующие замечания и вопросы:

1. Автор в разделе актуальности указывает такие высокопроизводительные методы как асимметричная прокатка и волочение со сдвигом, однако не уделяет внимание данным методам в первой главе работы.
2. Вихретоковый метод измерения электропроводности имеет ограничения по геометрическим параметрам образца исследования. Образцы после кручения под высоким давлением имеют малую толщину. В этом ключе в методике электропроводности недостаточно уделено внимания вопросу точности и достоверности получаемых данных по электропроводности.
3. Известно, что в условиях КВД напряженное состояние неоднородно по диаметру образца. Можно ли ожидать немонотонное изменение структуры и свойств по диаметру образца?

4. В работах нашей лаборатории в ИФТТ РАН показано, что при больших степенях деформации сплавов меди с другими элементами образуется состояние динамического равновесия твердого раствора и выделений второй фазы, соответствующей некоторой эффективной температуре. Насколько результаты вашей работы согласуются с результатами, наблюдаемыми нами и можно ли оценить эффективную температуру вашего сплава.

Сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость и общую оценку диссертационной работы, которая выполнена на высоком научно-техническом уровне, и представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 17 научно-технических конференциях, а также опубликованы в 8 научных статьях, из них 6 в рецензируемых журналах из перечня ВАК, а две в журналах из перечня Scopus.

Основное содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы достаточно полно отражены в автореферате. Опубликованные работы соответствуют тематике проведённого исследования и данным, представленным в диссертации.

Соответствие диссертационной работы указанной специальности

Диссертационная работа Дениса Алексеевича Аксенова по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (отрасль технические науки) по п.2 «Структурные, морфологические и механические свойства наноматериалов и композитных структур на их основе» и п.9 «Моделирование свойств, физических явлений и технологических процессов в наноматериалах и композитных структурах».

**Заключение о соответствии диссертационной работы критериям,
установленным в Положении о присуждении ученых степеней**

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению, представленная диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. №62), а её автор, Аксенов Денис Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Официальный оппонент Страумал Борис Борисович
Заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, старший научный сотрудник

Б.Б. Страумал

Борис Борисович Страумал

Подпись Б.Б. Страумала заверяю

Ученый секретарь ИФТТРАН

к.ф.-м.н.



Алексей Николаевич Терещенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
142432 г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

e-mail: straumal@issp.ac.ru <http://www.issp.ac.ru/> тел. + 7 (496)52 283-00

Дата составления отзыва «31» октября 2025 года