

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.003.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИФМ УрО РАН) МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20.03.2020, № 4

О присуждении Гохфельду Николаю Викторовичу, гражданину России,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Электронно-микроскопическое изучение атомноупорядочивающихся сплавов на основе Cu-Pd и Cu-Au, подвергнутых интенсивной пластической деформации и последующим отжигам» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния принята к защите 25.12.2019, протокол № 15, диссертационным советом Д 004.003.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской Академии наук (ИФМ УрО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Гохфельд Николай Викторович, 1983 года рождения, в 2007 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет – УПИ», решением Государственной аттестационной комиссии ему присвоена квалификация «инженер-физик» по специальности «Физика металлов». Работает в должности научного сотрудника лаборатории цветных

сплавов в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории цветных сплавов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, Пушин Владимир Григорьевич работает главным научным сотрудником лаборатории цветных сплавов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

- 1) Ивченко Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории пучковых воздействий, ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), г. Екатеринбург;
 - 2) Смирнов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики деформации, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург
- дали положительные отзывы о диссертации Н.В. Гохфельда.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск, в своем положительном заключении, подписанном главным научным сотрудником, заведующим лабораторией материаловедения сплавов с памятью формы ФГБУН Института физики прочности и материаловедения

Сибирского Отделения РАН, доктором физико-математических наук Лотковым Александром Ивановичем, указала, что «диссертационная работа Гохфельда Н.В. «Электронно-микроскопическое изучение атомноупорядочивающихся сплавов на основе Cu-Pd и Cu-Au, подвергнутых интенсивной пластической деформации и последующим отжигам», соответствует всем требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней и пунктам 1 и 3 Паспорта специальности, а ее автор Н.В.Гохфельд заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 35 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 35 работ, из них статей, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях и входящих в перечень ВАК - 5, тезисов докладов в материалах российских и международных конференций 28. Общий объем научных изданий 9 печатных листов.

В результате проведенных исследований автором установлены основные закономерности структурных и фазовых превращений, структурно-морфологических особенностей и свойств атомноупорядочивающихся сплавов на медно-палладиевой и медно-золотой основах, подвергнутых мегапластической деформации и последующим отжигам.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Особенности формирования наноструктурного состояния в атомноупорядоченных медно-палладиевых сплавах, подвергнутых интенсивной деформации кручением / Л. Н. Буйнова, Н. В. Гохфельд, Н. И. Коуров, В. П. Пилигин, В. Г. Пушин // Деформация и разрушение материалов. — 2009. — Т. 10. — С. 24—29.
2. Влияние легирования железом на электронные свойства и структуру Cu₃Pd / Н. И. Коуров, В. Г. Пушин, Л. Н. Буйнова, А. В. Королев, М. А.

Коротин, Ю. В. Князев, Н. В. Гохфельд // Физика металлов и металловедение. — 2010. — Т. 109, № 1. — С. 365—375.

3. Влияние интенсивной пластической деформации на электронные свойства сплава Cu₇₂Au₂₄Ag₄ / Н. И. Коуров, В. Г. Пушин, А. В. Королев, Ю. В. Князев, Л. Н. Буйнова, Н. В. Гохфельд, В. П. Пилюгин // Физика твердого тела. — 2010. — Т. 52, № 1. — С. 14—19.
4. Особенности упорядочения при отжиге наноструктурных сплавов систем CuPd и CuAu, полученных в результате деформации кручением под высоким давлением / Л. Н. Буйнова, Н. В. Гохфельд, Н. И. Коуров, В. П. Пилюгин, В. Г. Пушин // Деформация и разрушение материалов. — 2013. — Т. 10. — С. 40—46.
5. Структурно-фазовые превращения и свойства атомноупорядочивающегося сплава Cu₃Pd, подвергнутого мегапластической деформации и отжигу / Н. В. Гохфельд, Л. Н. Буйнова, А. В. Пушин, В. Г. Пушин // Известия вузов. Физика. — 2019. — Т. 62, № 12. — С. 119—125.

На диссертацию и автореферат поступило 15 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечается актуальность темы диссертационной работы, научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость. Отзывы без замечаний поступили: от старшего научного сотрудника лаборатории физики высоких давлений, к.ф.-м-н., Пацелова Александр Михайлович, ФГБОУ ВО «Институт физики металлов УРО РАН», г. Екатеринбург; от старшего научного сотрудника лаб. пучковых воздействий, к.ф.-м-н., Тимофеевой Екатерины Евгеньевны, ФГБОУ ВО «Сибирский физико-технический институт им. академика В.Д. Кузнецова», г. Томск; от заведующей кафедрой физики, химии и теоретической механики, д.ф.-м-н., Соловьевой Юлии Владимировны, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск; от

заведующего кафедрой высшей математики, декана общеобразовательного факультета, д.ф.-м-н., Старенченко Владимира Александровича, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск; от профессора кафедры физики, химии и теоретической механики, д.ф.-м-н., Старенченко Светланы Васильевной, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск; от старшего научного сотрудника лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля д.ф.-м.н., доцента Суриковой Натальи Сергеевны ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск; от главного научного сотрудника отдела организации научных исследований и международных связей управления развития науки, заведующего кафедрой теоретической физики, д.т.н., профессора Беляева Виктора Васильевича ГОУ ВО Московский государственный областной университет, Московская обл., г. Мытищи; от инженер 2 категории учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Беляева Андрея Андреевича ГОУ ВО Московский государственный областной университет, Московская обл., г. Мытищи; от Прокошкина Сергея Дмитриевича д.ф.-м.н., профессора, г. н. с. кафедры «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Замечания содержатся в следующих отзывах:

1. От Коневой Нины Александровны заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м-н., профессора каф. «Физика, химия и теоретическая механика», ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск:

1. Результаты гл. 7 можно было в диссертацию не помещать. Цельность работы от этого только бы выиграла.

2. Диссертант установил, что температура фазового перехода «порядок-беспорядок» сплава Cu₃Pd в исходном ультрамелкозернистом состоянии возрастает (от 465 до 535 °C). К сожалению, не обсуждается природа этого интересного явления.

3. В тексте автореферата для SPD используется термин мегапластическая деформация. Между тем в названии диссертации присутствует другой термин интенсивная пластическая деформация.

2. От Старостенкова Михаила Дмитриевича заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м-н., проф., ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул:

Следовало бы подробнее описать полосчатый контраст типа муара, который образуется в результате сопрягающихся АФГ.

3. От Викарчука Анатолия Алексеевича, заслуженного работника Высшей школы, д.ф.-м-н., профессора кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти:

Следует отметить, что актуальная и востребованная работа почему-то выполнялась более 10 лет.

4. От Илларионова Анатолия Геннадьевича, к.т.н., доцента кафедры «Термообработка и физика металлов», ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург:

По тексту возник вопрос: на стр.21 автореферата, в последнем абзаце указывается, что «...микроанализ показал наличие загрязненности в срезе в виде оксидов кремния, титана, алюминия и железа, - Откуда при лазерной резке сплава Cu₃Pd могут появиться в срезе такого типа загрязнения?

5. От Ресниной Натальи Николаевны, д.ф.-м-н., профессора, кафедры «Общей математики и информатики», и от Сибирева Алексея Владимировича, научного сотрудника кафедры теории упругости, к.ф.-м-н., ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург:

1. На странице 11 приведены значения микротвёрдости до МПД и после 15 оборотов. Не ясно имеет ли отношение данный абзац к рисунку 12 на странице 15, где приведены значения микротвёрдости для образцов сплава Cu₃Pd после МПД при комнатной температуре и 77К. На странице 11 отмечено, что последующие отжиги приводят к немонотонному изменению микротвёрдости, однако, на рисунке 12 представлено монотонное снижение твёрдости с увеличением температуры отжига.

2. В таблице 2 не приведены механические свойства сплава Cu₃Pd в исходном, недеформированном состоянии.

3. В работе отмечено, что исследуемые сплавы имеют широкое применение в электронной промышленности благодаря низкому удельному электросопротивлению и подходящим магнитным и оптическим свойствам. На рисунке 15 приведена зависимость удельного электросопротивления от температуры для сплава Cu₃Pd, по которой видно, что после МПД значение удельного электросопротивления превышает 100 мкОм*см, что, как видно на рисунке 16, в 20 раз больше чем в предельно упорядоченном состоянии. Является ли в таком случае оправданным применение МПД для некоторого увеличения прочности данного сплава за счёт такой большой потери электропроводимости?

6. От Потекаева Александра Ивановича, д.ф.-м.-н., профессора, директора Сибирского физико-технического института при Томском госуниверситете, и от Клопотова Анатолия Анатольевича, д.ф.-м.-н., профессора, научного сотрудника Сибирского физико-технического института при Томском госуниверситете, г. Томск:

В автореферате приведены очень интересные данные рентгеноструктурных исследований по влиянию деформации на упорядоченное состояние в сплавах с L₁₂ структурой. В связи с этим представляется очень важным по этим данным определить численные значения параметра дальнего порядка в упорядоченной фазе L₁₂ в зависимости от воздействий внешних условий (температуры, степени деформации).

7. От Добаткина Сергея Владимировича, заведующего лабораторией металловедения цветных и легких металлов, д.т.н., проф., и от Страумала Петра Борисовича, старшего научного сотрудника лаборатории металловедения цветных и легких металлов, к.ф.-м.-н., проф., ФГБУН «Институт metallurgии и материаловедения им. А.А. Байкова» РАН, г. Москва:

1. В автореферате не указаны размеры образцов и используемые давления при деформации кручением.
2. Не вполне корректно называть давления, используемые при кручении, гидростатическими. Даже если кручение проводилось в «лунке», мы имеем квазигидростатическое давление.
8. От Гладковского Сергея Викторовича, заведующего лабораторией деформирования и разрушения, д. т. н., доцента ФГБОУ ВО «Институт машиноведения УРО РАН», г. Екатеринбург:

В расчетной формуле для оценки истинной степени деформации ϵ при кручении под высоким давлением (стр. 9) не определены составляющие деформации и не ясно, кем была впервые предложена данная формула.

Выбор официальных оппонентов доктора физ.-мат. наук, профессора В.А. Ивченко, кандидат технических наук, с.н.с. А.С. Смирнова, а также ведущей организации обосновывается публикациями оппонентов, тематикой структурного подразделения ведущей организации, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Установлено, что мегапластическая деформация приводит к атомному разупорядочению и формированию высокопрочного ультрамелкозернистого состояния в исходно атомно-упорядоченных сплавах на основе систем Cu–Pd и Cu–Au. Процессы атомного разупорядочения и наноструктуризации происходят одновременно. Выявлены этапы последовательного развития мегапластической деформации, обусловливающие формирование субмикро- и нанокристаллической ультрамелкозернистой структуры сплавов, применяемых в авиационной и космической промышленности.
2. Обнаружен эффект ускорения процесса атомного упорядочения при отжиге сплавов после предварительной мегапластической деформации. При этом атомное упорядочение проходит одновременно с рекристаллизацией по механизмам гетерогенного и гомогенного зарождения и роста атомноупорядоченных доменов. Определено, что температура фазового перехода «порядок-беспорядок» сплава Cu₃Pd в ультрамелкозернистом состоянии существенно возрастает по сравнению с исходным.
3. Показано, что после мегапластической деформации в золотомедных сплавах (Cu₇₂Au₂₄Ag₄ и Au 585 пробы), последующий отжиг обеспечивает ультрамелкозернистую структуру в условиях реализации эффекта барьерного торможения роста зерен.
4. Установлено, что мегапластическая деформации сплава Cu₃Pd при криогенных температурах ($T = 77$ К) приводит к большему повышению

упрочнения, чем мегапластическая деформация при комнатной температуре. Эффект большего упрочнения сохраняется при низкотемпературном отжиге, ответственном за атомное упорядочение ультрамелкозернистого сплава.

5. Вскрыты особенности структурно-фазового состояния сплава Cu3Pd при разных видах локального лазерного воздействия (термообработка, сварка, резка), обеспечивающие равномерность распределения микротвердости в зоне сварных соединений.

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что установленные в работе основные закономерности структурных и фазовых превращений, структурно-морфологических особенностей и свойств атомноупорядочивающихся сплавов на медно-палладиевой и медно-золотой основах, подвергнутых мегапластической деформации и последующим отжигам, дополняют представления о физике процессов, протекающих при мегапластической деформации атомноупорядочивающихся сплавов, и закладывают основы для дальнейшего теоретического исследования и практического применения таких материалов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанный деформационно-термический способ, сочетающий мегапластическую деформацию волочением (или прокаткой при комнатной температуре) и отжиг, был апробирован для получения высокопрочного пластичного атомноупорядоченного сплава Cu3Pd. Достигнуты высокие прочностные ($\sigma_{0.2}$ в пределах $550 \div 750$ МПа; $\sigma_B - 670 \div 1000$ МПа) и пластические (δ в пределах 5-11%) свойства проволок. Результаты, полученные при исследовании микроструктуры и свойств сплавов после мегапластической деформации и последующих отжигов, дают возможность рекомендовать их для практического использования с целью эффективного повышения

прочностных и пластических характеристик атомноупорядоченных низкоомных электрорезистивных и электроконтактных сплавов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- экспериментальные результаты, полученные с помощью различных широко апробированных методик, с использованием надежно аттестованных образцов, хорошо воспроизводимы;
- выводы работы не имеют принципиальных расхождений с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других исследователей.

Личный вклад. Диссертационная работа выполнялась Н. В. Гохфельдом под научным руководством и при участии профессора, д.ф.-м.н. В. Г. Пушкина. Лично автором выполнены пробоподготовка, электроэрозионная резка, шлифовка, химическое и электро-химическое травление, ионное утонение, полный цикл приготовления фольг для просвечивающей электронной микроскопии, исследования структуры методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеновского фазового и структурного анализа, измерения микротвердости, проведение испытаний на разрыв, обработка, анализ и обобщение полученных данных. ПЭМ и РЭМ выполнялся автором совместно с сотрудниками лаборатории цветных сплавов к.ф.-м.н. Л. Н. Буйновой и Н. В. Николаевой на оборудовании ЦКП ИФМ УрО РАН. Исследования механических свойств на растяжение проволоки автором проводились совместно с к.т.н. А. В. Пушкиным. Деформирование образцов методом кручения при высоком квазигидростатическом давлении осуществлялось совместно с к.ф.-м.н. В.П. Пилигиным в лаборатории физики высоких давлений ИФМ УрО РАН. Изучение электросопротивления производилось совместно с д.ф.-м.н. Н. И. Коуровым в лаборатории низких температур ИФМ УрО РАН.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи выяснения условий атомного упорядочения в сплавах на основе Cu-Pd и Cu-Au, подвергнутых

интенсивной пластической деформации и последующим отжигам, и соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335.

На заседании 20.03.2020 года диссертационный совет принял решение присудить Гохфельду Николаю Викторовичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 5 доктора наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений, 6 докторов наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – нет, проголосовали: за – 15, против – 1, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель
диссертационного
совета,
доктор физ.-мат.

В.В.Устинов

Ученый секретарь
диссертационного
совета,
доктор физ.-мат. наук

Т.Б. Чарикова

23 марта 2020 г.