

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гохфельда Николая Викторовича «Электронно-микроскопическое изучение атомноупорядочивающихся сплавов на основе Cu-Pd и Cu-Au, подвергнутых интенсивной пластической деформации и последующим отжигам», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа Н.В. Гохфельда посвящена детальному изучению индуцированных мегапластической деформацией структурно-фазовых превращений в сплавах на основе Cu-Pd и Cu-Au. Актуальность темы диссертации Н.В. Гохфельда не вызывает сомнений не только потому, что он использует мощные пластические деформации кручением под высоким давлением или волочением для исследования влияния последних на структурное состояние веществ, но и вследствие того, что результаты работы могут быть востребованы в области современных технологий улучшения различных свойств конструкционных материалов. С другой стороны, полученные данные о механизме и кинетике структурно-фазовых превращений в условиях мегапластической деформации позволяют моделировать новые технологические процессы легирования железом и серебром, а также поведение материалов в условиях экстремальных деформационных нагрузок. Выбранные для исследования атомноупорядочивающиеся сплавы являются перспективными материалами в различных областях транспортной, химической, энергетической, авиакосмической техники для создания электропроводящих и электроконтактных материалов.

В качестве основного метода исследования процессов формирования структуры после мегапластической деформации выбран метод трансмиссионной электронной микроскопии высокого разрешения.

Тематика работы соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, что подтверждается поддержкой данных исследований в рамках различных российских государственных программ (гос. задания ИФМ Уро РАН по теме «Структура», Госконтракта «02.513.11.3197, проекта РФФИ №08-02-00844, проектов УрО РАН №№ 12-П-2-1060, 15-9-2-17).

Таким образом, диссертационная работа Н.В. Гохфельда актуальна с научной, практической и методической точек зрения.

Структура, оформление диссертации, публикации. Диссертация достаточно хорошо структурирована, состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы 155 страниц, включая 102 рисунка, 10 таблиц, 30 формул и 232 наименования цитированной литературы. Основные результаты и выводы диссертации отражены в 7 научных статьях, в том числе в 5 статьях в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, а также были неоднократно представлены на российских и международных конференциях в 28 тезисах докладов и материалах. Автореферат и опубликованные статьи отражают основное содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель, научная новизна и практическая ценность работы; приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературных данных по теме диссертационной работы. Представлено современное состояние исследований структуры и свойств изучаемых материалов, закономерностей процесса атомного упорядочения в них. Во второй главе приведено описание объектов и методов исследований. В третьей главе представлены результаты экспериментального изучения сплавов в исходном состоянии. Рассмотрены вопросы влияния отклонения их химического состава от стехиометрии на атомное упорядочение, фазовый состав и микроструктуру сплавов. В четвертой главе проанализирована роль мегапластической деформации в формировании структуры и свойств сплавов на основе Cu-Pd и Cu-Au. В пятой главе рассмотрены особенности влияния криогенной мегапластической деформации на структуру и свойства сплавов на основе Cu₃Pd. В шестой главе изучено влияние атомного упорядочения на электрические свойства сплавов. Наконец, в седьмой главе представлены результаты изучения лазерного воздействия на сплав Cu₃Pd.

Научная новизна, обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации. Все научные положения, выводы и рекомендации диссертации обоснованы, подтверждены экспериментально, апробированы и опубликованы. Научную новизну имеют большинство результатов, полученных при выполнении систематических экспериментальных исследований фундаментальных закономерностей изменения свойств и структуры в полиметаллических материалах различного химического состава при указанных комбинациях синтеза и деформационных воздействий. В работе получены следующие основные новые научные результаты:

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, начиная от умеренных степеней ($e = 0.5$) до сверхбольших ($e = 7.3$), формирующих субмикро- и нанокристаллическую и ультрамелкозернистую структуру сплавов.

2. Обнаружен эффект ускорения процесса атомного упорядочения при отжиге сплавов после предварительной мегапластической деформации, при котором атомное упорядочение проходит одновременно с рекристаллизацией при участии доминирующих механизмов гетерогенного и гомогенного зарождения и роста атомно-упорядоченных доменов. Определено, что температура фазового перехода «порядок-беспорядок» сплава Cu₃Pd в исходном ультрамелкозернистом состоянии существенно возрастает (от 465 до 535 °).
3. Показано, что после мегапластической деформации в сплавах на основе золота, модельном Cu₇₂Au₂₄Ag₄ и 585 пробы, способных испытывать распад с дисперсионным твердением, последующий отжиг на атомное упорядочение обеспечивает ультрамелкозернистую структуру в условиях реализации эффекта барьерного торможения роста зерен нанодисперсными частицами, обогащенными серебром.
4. Установлено, что мегапластическая деформации сплава Cu₃Pd при криогенных температурах ($T = 77$ К) приводит к большему повышению упрочнения, чем мегапластическая деформация на те же степени при комнатной температуре. Эффект большего упрочнения сохраняется при низкотемпературном отжиге (особенно при 300-400 °), ответственном за атомное упорядочение ультрамелкозернистого сплава.
5. Вскрыты особенности структурно-фазового состояния сплава Cu₃Pd, при разных видах локального лазерного воздействия (термообработка, сварка, резка), обеспечивающих равномерность распределения микротвердости в зоне сварных соединений, гарантируя тем самым их надежность и долговечность.

В заключении работы суммированы основные результаты и выводы, в полной мере отвечающие поставленным целям и задачам.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой цельное, завершенное исследование, начинающееся с определения цели и объектов исследования, постановки задач, обоснованного выбора методов, включающее получение и анализ экспериментальных результатов и формулировку выводов.

Достоверность и степень обоснованности результатов работы гарантируется физической ясностью поставленных задач, адекватностью и большим разнообразием используемых

современных подходов и методов, внутренней непротиворечивостью и доказательностью обсуждения результатов, воспроизводимостью полученных данных и их согласием с известными экспериментальными данными и представлениями.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Научная значимость диссертационной работы Н.В. Гохфельда в области физики конденсированного состояния связана с развитием и углублением представлений о механизмах и кинетике формирования структуры атомно-упорядоченных сплавов систем Cu-Pd и Cu-Au в зависимости от легирования, температуры, степени и способа деформации. Практическое значение работы заключается в разработке способов термической и термомеханической обработки исходных сплавов с комплексным использованием традиционных и новых методов. В результате проведенных исследований исследованы закономерности изменения микроструктуры и механических свойств в зависимости от исходной структуры, от легирующих компонентов и их концентрации, способа мегапластической деформации под давлением. Полученные в работе экспериментальные данные дополняют представления о физике процессов, протекающих при мегапластической деформации атомноупорядочивающихся сплавов. Разработанный деформационно-термический способ, сочетающий мегапластическую деформацию волочением (или прокаткой при комнатной температуре) и отжиг, был апробирован для получения высокопрочного пластичного атомно-упорядоченного сплава Cu₃Pd. В результате достигнуты высокие прочностные ($\sigma_{0.2}$ в пределах 550 \div 750 МПа; σ_B – 670 \div 1000 МПа) и пластические (δ в пределах 5-11%) свойства проволок в атомно-упорядоченном состоянии. Экспериментально полученные параметры эффективного измельчения структуры, повышения прочностных и пластических характеристик атомно-упорядоченных низкоомных электрорезистивных и электроконтактных сплавов после мегапластической деформации и последующих отжигов, дают возможность рекомендовать их для практического использования.

Диссертация написана грамотно, автореферат соответствует содержанию диссертации. Все результаты работы хорошо проиллюстрированы, выводы логически вытекают из содержания диссертации.

Диссертационная работа соответствует пункту 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», пункту 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла

различной природы и дисперсные системы» и пункту 3 «Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния» паспорта специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния.

Вопросы и критические замечания по диссертационной работе.

1. Вызывают недоумение используемые автором в работе термины: периодические структуры (стр.2.,18 «1.3. Рентгеновские исследования периодической структуры»), периодические границы (стр. 20), тотальное атомное разупорядочение (стр. 116, вывод 3).
2. В выводах к гл. 7. «1. Определены механизмы формирования микроструктуры сплава Cu₃Pd...». В тексте главы об этих механизмах ничего не сказано.
3. Список литературы оформлен неодинаково. Ссылки 145-147, 149, 161-162 и еще ряд ссылок по оформлению выпадает из общего списка ссылок по оформлению статей.
4. Не очень понятен вывод 5, к гл. 4 «...Обнаружен эффект ускорения кинетики атомного упорядочения после предварительной МПД за счет комплексной реакции первичной рекристаллизации и атомного упорядочения по механизмам гомогенного и, особенно, деформационного гетерогенного роста доменов».
5. Чем объясняется выбор систем и легирующих элементов изучаемых сплавов? Существуют ли энергетические или размерные критерии предпочтительности замещения легирующей примесью той или иной позиции? Чем обоснован выбор легирующих компонентов?

Сделанные замечания не снижают ценности и высокой положительной оценки диссертационной работы, квалификации, роли и вклада ее автора.

Заключение. Диссертация Н.В. Гохфельда выполнена на высоком современном научном уровне, является законченным и самостоятельным исследованием, в котором с использованием широкого набора экспериментальных методов решена важная и актуальная научная задача установления основных закономерностей и механизмов атомного упорядочения, эволюции микроструктуры и фазового состава при интенсивной пластической деформации и последующей комплексной рекристаллизации и атомного упорядочения сплавов на основе Cu-Pd и Cu-Au. Исследования, выполненные автором диссертации, вносят существенный вклад в решение важной научной задачи физики конденсированного состояния по разработке методов синтеза и способов

термической и механотермической обработки наиболее перспективных для практического применения электрорезистивных атомно-упорядоченных сплавов на основе Cu-Pd и Cu-Au.

Работа соответствует требованиям ВАК и пункту 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, соответствует специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния, а ее автор Н.В. Гохфельд заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук, согласно пунктам 1, 2 и 3 паспорта специальности 01.04.07.

Ведущий научный сотрудник лаборатории пучковых воздействий,
доктор физико-математических наук, профессор,
специальность 01.04.07 — Физика конденсированного состояния
ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН. г. Екатеринбург

— — — — — В. А. Ивченко

дата: 02.03.2020

Адрес организации: Адрес: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), <http://www.iep.uran.ru/>

E-mail: ivchenko2008@mail.ru, тел. +7 (343) 362-3554.

Подпись Ивченко В.А. заверяю

Ученый секретарь ФГБУН

ИЭФ УрО РАН

канд. физ. - мат. наук

Е.Е. Кокорина



Согласовано руководителем

03.03.2020.

Сведения об официальном оппоненте

Ивченко Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния, профессор

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Ведущий научный сотрудник лаборатории пучковых воздействий

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106,

Тел.: (343)2675683, 8 9022635044

ivchenko2008@mail.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. В.А. Ивченко. Полевая ионная микроскопия каскадов атомных смещений в металлах и сплавах после радиационных воздействий разного типа Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 9. С. 143-145.
2. В.А. Ивченко. Анализ механизмов радиационно-индукционного эффекта наноструктуризации приповерхностных объемов металлов Письма в Журнал технической физики. 2014. Т. 40. № 8. С. 6-13.
3. В.А. Ивченко. Экспериментальное моделирование воздействия быстрых нейтронов на Pt пучками заряженных частиц Ar^+ Письма в Журнал технической физики. 2014. Т. 40. № 1. С. 80-87.
4. В.А. Ивченко. Полевая ионная микроскопия граничной области металлических интерфейсов Письма в ЖТФ. - 2015. - Т. 41. Вып. 16. С. 43-51
5. V.A. Ivchenko. Atomic structure of cascades of atomic displacements in metals and alloys after different types of radiation IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016. - V. 110. 012003.
6. V.A. Ivchenko. About mechanisms of radiation-induced effect of nanostructurization of near-surface volumes of metals IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2017. - V. 168, - P. 012010
7. В.А. Ивченко. Атомная структура материалов после интенсивных внешних воздействий (Полевая эмиссионная микроскопия атомной структуры металлических материалов после интенсивных внешних воздействий) – Palmarium Academic Publishing – 2017, 132 с. (Монография)
8. V. A. Ivchenko, V. V. Ovchinnikov. Computer Analysis of the Field Ion Images of Platinum Irradiated with Ar^+ ($E = 30 \text{ keV}$) Ions // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 830. P. 012088.
9. V. A. Ivchenko. The formation of nanopores in metal materials after irradiation by beams of Ar^+ with energy of 30 keV // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 168. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012009.
10. V. A. Ivchenko. Modification of the atomic structure of metallic materials after strong external exposures IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. С. 12012.
11. В.А. Ивченко. Полевая ионная микроскопия металлических интерфейсов после радиационного воздействия Письма о материалах. 2019. Т. 9. № 1 (33). С. 118-123.

12. V. A. Ivchenko. Modification of metal surface under the radiation exposure in the atomic scale 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1281** 012028
13. V. A. Ivchenko. Chapter 7: Field ion microscopy of radiation effects in metallic materials (In book: Hysteresis of Composites, Book edited by: Dr. Li Longbiao) INTECHOPEN LIMITED, Registered in England and Wales No. 11086078, P. 123-145.

Ученый секретарь ФГБУН
ИЭФ УрО РАН
канд. физ. - мат. наук

Е.Е. Кокорина

