

## 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.

Управление механизмами атомного упорядочения и кинетикой формирования структурно-фазовых превращений в условиях мегапластической деформации позволяют синтезировать новые материалы, сочетающие как низкое электрическое сопротивление, так и высокие механические свойства, являющиеся востребованными в области современных конструкционных материалов. В результате исследование данных сплавов имеет большое значение не только с точки зрения фундаментальных вопросов физики конденсированного состояния, но и с точки зрения применения в различных областях производства для создания электропроводящих и электроконтактных материалов нового поколения. В этой связи задачи экспериментального исследования, сформулированные в диссертации, являются, несомненно, **актуальными**. Выбранный в диссертации метод просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения является одним из основных современных локальных методов для исследования структуры атомноупорядочивающихся сплавов.

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).

### Структура и основное содержание работы.

Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, включает 102 рисунка, 10 таблиц и состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 232 наименований. 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 и опубликованы в 28 тезисах докладов и материалах. Автореферат и опубликованные статьи отражают основное содержание диссертации.

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, цель и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны, теоретической и практической значимости, приведены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, обозначены степень достоверности и апробация результатов.

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 Cu<sub>3</sub>Pd. В шестой главе изучено влияние атомного упорядочения на электрические свойства сплавов. В седьмой главе представлены результаты изучения лазерного воздействия на сплав Cu<sub>3</sub>Pd. Диссертационная работа представляет собой законченный научный труд, содержащий существенные новые результаты, которые сформулированы в **Заключении** к диссертации.

### **Научная новизна.**

К основным результатам диссертации, обладающими научной новизной и практической ценностью, относятся следующие результаты.

1. Впервые показано, что мегапластическая деформация приводит к полному атомному разупорядочению и формированию высокопрочного ультрамелкозернистого состояния в исходно атомноупорядоченных сплавах на основе систем *Cu-Pd* и *Cu-Au*. Процессы атомного разупорядочения и диспергирования происходят совместно.

2. Обнаружен эффект ускорения процесса атомного упорядочения при отжиге сплавов после предварительной мегапластической деформации, обусловленный совместными механизмами первичной рекристаллизации и одновременного атомного упорядочения посредством деформационно-индуцированного гомогенного и особенно гетерогенного роста атомноупорядоченных кристаллитов-доменов. Установлено, что мегапластическая деформация и последующая термообработка при температурах ниже фазового перехода «порядок-беспорядок» позволяет получить высокопрочное ультрамелкозернистое и низкоэлектрорезистивное атомноупорядоченное состояний.

3. Установлено, что мегапластическая деформация при криогенной температуре ( $T = 77$  К) приводит к более сильному, чем деформация на те же степени при комнатной температуре, упрочнению сплава Cu<sub>3</sub>Pd и эффект большего упрочнения сохраняется при последующем низкотемпературном отжиге (особенно

при 300 – 400 °С), ответственном за атомное упорядочение ультрамелкозернистого сплава.

4. Определены этапы последовательного развития мегапластической деформации, начиная с умеренных величин ( $e = 0,5$ ) до сверхбольших ( $e = 7,3$ ), ответственных за формирование субмикро- и нанокристаллических состояний. Обнаружено два новых эффекта: температура фазового перехода «порядок-беспорядок» существенно возросла (от 465 до 535 °С) при отжиге сплава  $Cu_3Pd$  в исходном ультрамелкозернистом состоянии; одновременно с этим значительно ускорился процесс атомного упорядочения при изотермической обработке после мегапластической деформации и последующем охлаждении после нагрева выше температуры фазового перехода «порядок-беспорядок».

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Научная значимость работы заключается в получении новых экспериментальных данных, позволяющих дополнить представления о физике процессов, протекающих при мегапластической деформации атомноупорядочивающихся сплавов. На основе экспериментальных данных предложен режим деформационно-термической обработки, сочетающий мегапластическую деформацию волочением и отжиг для формирования высоких прочностных свойств в атомноупорядоченном сплаве  $Cu_3Pd$ . Результаты, полученные при исследовании микроструктуры и свойств сплавов после мегапластической деформации и последующих отжигов, дают возможность рекомендовать их для практического использования с целью эффективного измельчения структуры, повышения прочностных и пластических характеристик атомноупорядоченных низкоомных электрорезистивных и электроконтактных сплавов.

### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Стр. 61. В работе написано, что микротвердость измерялась с использованием индетеров Берковича и Виккерса. Однако данные проводятся только для микротвердости по методу Виккерса.
2. Стр. 62. В работе указано, что «Температура образца изменялась от 250 К до 1000 К с помощью специального устройства, состоящего из нагревательной системы и регулятора температуры. Измерение температуры осуществлялось в зависимости от температурного интервала различными термopарами и термодатчиками с погрешностью не более 0,1 К.». Погрешность 0,1 °К по отношению к температуре 1000 °К составляет 0,01%, что значительно меньше стандартной погрешности измерений термopарами, которая составляет 1%.
3. В работе для расчета истинной деформации при кручении дисков на наковальнях Бриджмена используется не общепринятая мера деформации (уравнения 2.5-2.7).

Не ясно, почему величина истинной деформации не находится, как  $\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{I_2(D_\varepsilon)}$

, где  $D_\varepsilon$  - девиатор тензора деформаций.

4. Как известно, в экспериментах на кручение тонких дисков в наковальнях Бриджмена накопленная степень деформации изменяется от осевой точки диска к его краю. Большинство экспериментальных сведений приводится без указания места взятия пробы для определения твердости и проведения структурно-фазового анализа.
5. На стр. 76 отмечается, что «Экспериментальные кривые микротвердости хорошо согласуются с расчетными значениями величины деформации (рисунок 4.7б)». Данное утверждение необходимо доказывать через корреляционный анализ, чего в работе не приведено.
6. Стр. 82. Не ясно, чем обусловлен выбор угла разориентировки зерен при ДОРЭ-анализе больше  $2^\circ$ ?
7. На стр. 82. написано, что «После отжига при более низких температурах (300 °С, 400 °С, 450 °С) метод ДОРЭ не выявил элементов зеренно-субзеренной структуры...». В работе не указано, чем можно объяснить невозможность проведения ДОРЭ-анализа.
8. В работе при анализе методом ДОРЭ не указана величина разориентации, по которой границы относились к мало- и высокоугловым.
9. Стр. 87. Непонятно про какие валки идет речь, если описывались экспериментальные результаты после волочения проволоки.
10. На Стр. 97 (вывод б) фактически утверждается, что разработан новый деформационно-термический способ, который был применен для получения высокопрочной пластичной проволоки атомноупорядоченного сплава  $Cu_3Pd$ . Однако из работы неясно, что принципиально нового предложил автор в деформационно-термическом способе получения заготовок и изделий.

### **Заключение.**

Высказанные выше критические замечания не снижают научной новизны и практической ценности выполненной работы, не опровергают основных научных положений и результатов диссертации и не оказывают решающего влияния на общую положительную оценку диссертационной работы.

Научные положения и выводы, представленные в диссертационной работе соискателя, полученные посредством экспериментального исследования, являются обоснованными и достоверными. Результаты диссертации обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Автореферат отражает содержание диссертации, ее основные результаты и выводы, которые обсуждены на научных конференциях и достаточно полно опубликованы в научной печати, в том числе в изданиях, определенных ВАК.

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 Николай Викторович Гохфельд заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук, согласно пунктам 1, 2 и 3 паспорта специальности 01.04.07.

Старший научный сотрудник лаборатории механики деформаций,  
кандидат технических наук,  
специальность 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела  
ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

А. С. Смирнов  
дата: 03.03.2020

Адрес организации: Адрес: 620049 г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО  
РАН), <http://www.imach.uran.ru/>

E-mail: [smirnov@imach.uran.ru](mailto:smirnov@imach.uran.ru), тел. +7 (343) 362-30-26

Подпись Смирнова А.С. заверяю  
Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН  
канд. техн. наук



А.М. Поволоцая

*Создана с помощью*

## Сведения об официальном оппоненте.

**ФИО:** Смирнов Александр Сергеевич.

**Ученая степень, звание:** кандидат технических наук, специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

**Полное наименование организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук.

**Должность:** старший научный сотрудник лаборатории механики деформаций.

**Почтовый адрес:** 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

**Тел.:** (343)362-30-26.

**E-mail:** smirnov@imach.uran.ru.

### Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. A.S. Smirnov, V.P. Shveikin, E.O. Smirnova, G.A. Belozerov, A.V. Konovalov, D.I. Vichuzhanin, O.Yu. Muizemnek. Effect of Silicon Carbide Particles on the Mechanical and Plastic Properties of the AlMg6/10% SiC Metal Matrix Composite // Journal of Composite Materials. – 2018. – Vol. 52. – Iss. 24. – P. 3351–3363.
2. A.S. Smirnov, G.A. Belozerov, E.O. Smirnova, A.V. Konovalov, O.Yu. Muizemnek. Specimen Preparation for Metal Matrix Composites with a High Volume Fraction of Reinforcing Particles for EBSD Analysis // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25 – Iss. 7. – P. 2907-2913.
3. A.S. Smirnov, A.V. Konovalov, G.A. Belozerov, V.P. Shveikin, E.O. Smirnova. Peculiarities of the rheological behavior and structure formation of aluminum under deformation at near-solidus temperatures // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2016. – Vol.23. – Iss. 5. – P. 563-571.
4. A.S. Smirnov, A.V. Konovalov, O. Yu. Muizemnek. Simulation of strain resistance of alloys due to barrier effects // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2015. – Iss. 1. – P. 61-72.
5. A.S. Smirnov, A. V Konovalov, V.G. Pushin, A.N. Uksusnikov, A.A. Zvonkov, and I.M. Zajcev, Peculiarities of the Rheological Behavior for the Al-Mg-Sc-Zr Alloy Under High-Temperature Deformation, J. Mater. Eng. Perform. – 2014. – Vol. 23 – Iss. 12. P. 4271–4277.

Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН  
канд. техн. наук



А.М. Поволоцая