

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 217.035.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ  
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ  
МЕТАЛЛУРГИИ ИМ. И.П. БАРДИНА» МИНИСТЕРСТВА  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 11 февраля 2019 г. № 2.2

О присуждении Морозовой Анне Игоревне, гражданке Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Эволюция структуры и физико-механических свойств низколегированных сплавов системы Cu-Cr-Zr в процессе деформационно-термической обработки» по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите **24 октября 2018 г.**, протокол № 4.1, диссертационным советом Д 217.035.01 на базе Федерального государственного унитарного предприятия Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2, в соответствии с приказом № 105/нк от 11.04.2012 г. и частичным изменением № 194/нк от 22.04.2013 г.

**Соискатель** Морозова Анна Игоревна, 1993 года рождения, в 2015 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по специальности «Наноматериалы». В 2015 году поступила в очную аспирантуру НИУ «БелГУ» по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния». **Справка об обучении** в аспирантуре и сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2018 г. аспирантурой НИУ «БелГУ».

**Работает** младшим научным сотрудником в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего

образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Научный руководитель** - доктор физико-математических наук Беляков Андрей Николаевич, лаборатория механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

**Еникеев Нариман Айратович**, доктор физико - математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», Институт физики перспективных материалов, старший научный сотрудник;

**Столяров Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук, лаборатория узлов трения для экстремальных условий, главный научный сотрудник

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, в своём **положительном заключении**, подписанном Рохлиным Лазарем Леоновичем, д.т.н., профессором,

заместителем заведующего лабораторией металловедения цветных и легких металлов, Шамраем Владимиром Федоровичем, д.ф.-м.н., профессором, заведующим лабораторией кристаллоструктурных исследований ИМЕТ РАН, утвержденный Комлевым Владимиром Сергеевичем, член-корр. РАН, директором ИМЕТ РАН, **указала, что научная новизна и значимость работы определяется** установлением механизмов структурных изменений в результате воздействия деформационно-термических обработок и оценки влияния эволюции структурных параметров на основные физико-механические свойства Cu-Cr-Zr сплавов.

**Соискатель** имеет 25 научных публикаций, в том числе по теме диссертации опубликованы 10 работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ при Минобрнауки России.

Научные публикации посвящены исследованию фазового состава сплавов системы Cu-Cr-Zr, влиянию равноканального углового прессования при повышенной температуре на эволюцию микроструктуры сплавов, влиянию формирующейся микроструктуры на механические свойства, электрическую проводимость и износостойкость Cu-Cr-Zr сплавов. Публикации корректно отражают содержание диссертации.

Соискатель лично проводил экспериментальные исследования, принимал непосредственное участие в проведении деформационно-термических обработок, интерпретации и обсуждении результатов экспериментов, подготовке и написании статей.

**Наиболее значимые научные работы** по теме диссертации:

1. **Morozova, A.** Microstructure and properties of fine grained Cu-Cr-Zr alloys after thermo-mechanical treatments / A. Morozova, R. Mishnev, A. Belyakov, R. Kaibyshev // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2018. – Т. 54. – №. 1. – С. 56-92.
2. **Morozova, A., Kaibyshev, R.** Grain refinement and strengthening of a Cu–0.1 Cr–0.06 Zr alloy subjected to equal channel angular pressing // *Philosophical Magazine*. – 2017. – Т. 97. – №. 24. – С. 2053-2076.
3. Zhilyaev, A. P. Grain refinement kinetics and strengthening mechanisms in Cu–0.3 Cr–0.5 Zr alloy subjected to intense plastic deformation / A. P. Zhilyaev, I.

Shakhova, A. Morozova, A. Belyakov, R. Kaibyshev // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 654. – С. 131-142.

На автореферат поступило **10 положительных** отзывов, из них 5 с замечаниями. Во всех отзывах отмечена актуальность темы диссертационной работы, направленной на поиск путей улучшения механических и электрических свойств медных сплавов. Особо отмечены следующие положительные стороны работы: использование современных экспериментальных средств и методик проведения исследований (**В.В. Березовская (УрФУ), В.М. Фарбер и О.В. Селиванова (УрФУ), Д.В. Гундеров (ИФМК УНЦ РАН), В.Н. Чувильдеев (ННГУ), М.В. Дегтярев (ИФМ УРО РАН), М.Г. Исаенкова (НИЯУ МИФИ)**). Изучение закономерностей и механизмов эволюции структуры в процессе деформации и старения и их влияние на механические свойства, электропроводность и износостойкость Cu-Cr-Zr сплавов (**В.В. Березовская (УрФУ), В.Н. Чувильдеев (ННГУ), М.Г. Исаенкова (НИЯУ МИФИ), С.Н. Фаизова (УГНТУ)**). Детальное исследование структуры, фазового состава и физико-механических свойств сплавов системы Cu-Cr-Zr после различных режимов деформационно-термической обработки (**В.В. Березовская (УрФУ), В.Е. Громов и С.А. Невский (СибГИУ), М.Г. Исаенкова (НИЯУ МИФИ), С.Н. Фаизова (УГНТУ), К.Ю. Окишев (ЮУрГУ)**). Установление стадийности распада пересыщенного твердого раствора Cu-Cr-Zr сплавов, природы и ориентационных соотношений выделяющихся вторичных фаз с матрицей и механизмов взаимодействия дислокаций с частицами (**В.В. Березовская (УрФУ), В.М. Фарбер и О.В. Селиванова (УрФУ), В.Н. Чувильдеев (ННГУ), М.В. Дегтярев (ИФМ УРО РАН), В.Г. Пушин и Н.Н. Куранова (ИФМ УРО РАН), С.Н. Фаизова (УГНТУ), К.Ю. Окишев (ЮУрГУ)**). Установление основного механизма измельчения зерен в сплавах после равноканального углового прессования при повышенной температуре - непрерывной динамической рекристаллизации, кинетика которой определяется формированием полос сдвига (**В.Е. Громов и С.А. Невский (СибГИУ), В.В. Березовская (УрФУ), Д.В. Гундеров (ИФМК УНЦ РАН), С.Н. Фаизова (УГНТУ)**). Впервые обнаруженные зависимости размера зерен и плотности

дислокаций от степени деформации (**В.Е. Громов и С.А. Невский (СибГИУ), Д.В. Гундеров (ИФМК УНЦ РАН), К.Ю. Окишев (ЮУрГУ)**). Проведение оценки компонент упрочнения сплавов после различных обработок. (**В.В. Березовская (УрФУ), М.В. Дегтярев (ИФМ УРО РАН), В.Г. Пушин и Н.Н. Куранова (ИФМ УРО РАН), М.Г. Исаенкова (НИЯУ МИФИ)**). Установление основного фактора, ответственного за изменение электрической проводимости сплавов Cu-Cr-Zr - степени распада пересыщенного твердого раствора (**В.В. Березовская (УрФУ), М.В. Дегтярев (ИФМ УРО РАН), В.Г. Пушин и Н.Н. Куранова (ИФМ УРО РАН)**). Указано, что практическая значимость работы определяется установленными зависимостями между степенью деформации, структурными изменениями, прочностью и электропроводностью (**В.В. Березовская (УрФУ), В.Е. Громов и С.А. Невский (СибГИУ), Д.В. Гундеров (ИФМК УНЦ РАН), М.Г. Исаенкова (НИЯУ МИФИ), К.Ю. Окишев (ЮУрГУ)**), полученным патентом на режим термомеханической обработки медных сплавов (**В.В. Березовская (УрФУ), В.Г. Пушин и Н.Н. Куранова (ИФМ УРО РАН)**), исследованием износостойкости Cu-Cr-Zr сплавов (**В.Н. Чувильдеев (ННГУ), В.М. Фарбер и О.В. Селиванова (УрФУ), С.Н. Фаизова (УГНТУ)**). Результаты работы могут быть использованы для разработки новых высокопрочных медных сплавов электротехнического назначения и способов их обработки (**В.Н. Чувильдеев (ННГУ), В.Е. Громов и С.А. Невский (СибГИУ)**).

#### **Перечень замечаний в отзывах на автореферат:**

Исследованные сплавы сложно отнести к бронзам, уровень легирования и прочность которых выше, а область применения иная (**В.В. Березовская (УрФУ)**). Из автореферата не ясно, оценивался ли температурный порог рекристаллизации сплавов после РКУП (**В.В. Березовская (УрФУ)**). Размер частиц после РКУП составляет 3-5 нм, однако согласно тексту, в сплаве Cu-0,1Cr-0,1Zr после старения их размер существенно уменьшился (**В.В. Березовская (УрФУ)**). Корректно ли считать все структурные изменения при РКУП следствием только динамической рекристаллизации, хотя технологический процесс, по-видимому, включает подогрев образца между проходами, при котором возможно стремительное развитие постдинамической и

статической рекристаллизации (**М.В. Дегтярев (ИФМ УрО РАН)**). Не корректно сформулированы подписи к рис.1 (твердость и электропроводность измеряли после старения, а не в процессе), рис. 2 и 4 (не указана температура распада) (**М.В. Дегтярев (ИФМ УрО РАН)**). Нуждаются в объяснении следующие результаты: повышение температуры отжига крупнозернистых бронз до 600 °С и более приводит к уменьшению электропроводности, геометрические размеры частиц хрома с ГЦК и ОЦК-решеткой в бронзе с большим количеством хрома и циркония Cu-0,3Cr-0,5Zr оказываются меньше, чем размеры частиц в сплаве Cu-0,1Cr-0,1Zr после аналогичных режимов старения (**В.Н. Чувильдеев (ННГУ)**). Показано, что параметры уравнения Аврами, описывающего кинетику выделения частиц второй фазы, оказываются различными для сплавов Cu-0.1Cr-0.1Zr и Cu-0.3Cr-0.5Zr. Как известно, величина коэффициента  $U$  в уравнении Аврами связана с механизмом распада. Поскольку автор утверждает, что механизмы распада в сплавах Cu-0.1Cr-0.1Zr и Cu-0.3Cr-0.5Zr одинаковы, то автору следует объяснить обнаруженные им различия в величинах коэффициента  $U$  для сплавов с различным содержанием хрома и циркония (**В.Н. Чувильдеев (ННГУ)**). В уравнении (3) для зависимости объемной доли от времени отжига пропущен нормировочный коэффициент  $f_{v0}$  – максимальная объемная доля частиц, величина которой зависит от температуры старения и предела растворимости (**В.Н. Чувильдеев (ННГУ)**). Вызывает вопрос оценка значимости различных вкладов в электросопротивления, приведенная в литературном обзоре текста диссертации, где постулируется, «дополнительное рассеяние электронов, приводящее к увеличению электрического сопротивления, происходит в сплавах, в которых расстояние между структурными дефектами составляет менее 40 нм», т.е. меньше длины пробега в чистой меди. Однако, согласно правилу Маттисена, если длина рассеяния 40 нм соответствует 100% IACS, то дополнительные дефекты, для которых длина рассеяния, например, 100 нм, приведут к снижению проводимости до 71% (**С.Н. Фаизова (УГНТУ)**). Отсутствуют (по крайней мере, в автореферате) значения кинетических констант уравнений (3), (7), (8), тем более, что из рис. 4 и 7 видно, что эти константы сильно различаются для

процессов образования разных частиц. Желательно было бы узнать мнение автора о природе этих различий (**К.Ю. Окишев (ЮУрГУ)**).

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Разработана** методика оценки объемной доли частиц, выделяющихся в процессе старения пересыщенных твердых растворов сплавов Cu-Cr-Zr на основе зависимости Маттиссена.

**Доказаны** закономерности фазовых превращений и ориентационные соотношения при выделении дисперсных частиц хрома с объемно-центрированной и гранецентрированной кубической решетками и CuZr с объемно-центрированной кубической решеткой в процессе старения медных сплавов Cu-Cr-Zr.

**Предложен** оригинальный механизм неоднородной эволюции структуры медных сплавов Cu-Cr-Zr в процессе равноканального углового прессования при температуре 400°C, на основе которого получены зависимости размера зерен и плотности дислокаций от степени деформации.

**Теоретическая значимость работы обусловлена тем, что**

**Доказано** неоднородное развитие непрерывной динамической рекристаллизации в медных сплавах Cu-Cr-Zr в процессе деформации при 400°C, обусловленное формированием ультрамелкозернистой структуры преимущественно в деформационных микрополосах, плотность которых увеличивается с увеличением степени деформации.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** способы оценки вкладов различных механизмов, влияющих на величину электрического сопротивления, в общее электросопротивление деформированных и отожженных сплавов Cu-Cr-Zr, а также методы расчета дислокационного и зернограничного упрочнения при различных критических углах разориентировки границ зерен.

**Раскрыты** причины роста электрической проводимости в сплавах Cu-Cr-Zr с пересыщенным твердым раствором в процессе равноканального углового прессования при повышенной температуре.

**Изучены** механизмы взаимодействия дислокаций с частицами хрома с объемно-центрированной и гранецентрированной кубической решетками после старения на максимальную твердость при различных температурах и причины смены механизмов дисперсионного упрочнения при увеличении размера дисперсных частиц.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**Разработан** и запатентован режим термомеханической обработки медных сплавов, обеспечивающий получение высоких прочностных свойств при сохранении высокой электропроводности.

**Определены** перспективы практического использования моделей оценки полноты распада пересыщенного твердого раствора и способов расчета дисперсионного, зернограничного и дислокационного упрочнения медных сплавов системы Cu-Cr-Zr, подвергнутых деформационно-термической обработке.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**Экспериментальные данные получены** на сертифицированном оборудовании, достигнута высокая воспроизводимость результатов на разных сплавах и в различных экспериментальных условиях.

**Использованы** современные независимые методы исследования микроструктуры. Анализ экспериментальных результатов выполнен на основе современных представлений о деформационном поведении материалов.

**Установлено** качественное соответствие авторских результатов с данными, полученными и опубликованными ранее другими исследователями.

**Личный вклад соискателя состоит в том,** что диссертант проводила микроструктурные исследования, включая оптическую металлографию, просвечивающую и растровую электронную микроскопию, механические испытания, измерения электрической проводимости, принимала непосредственное участие в проведении деформационно-термической обработки и трибологических испытаний, интерпретации и обсуждении результатов экспериментов, подготовке и публикации научных статей.



**Диссертация** является законченной квалификационной работой, в которой **решена научная задача** - установлены общие закономерности и механизмы эволюции структуры в процессе теплой интенсивной пластической деформации, стадийность выделения фаз при старении и влияние формирующейся структуры и дисперсных частиц на механические свойства, электрическую проводимость и износостойкость Cu-Cr-Zr бронз. Диссертация соответствует критериям п.п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г.

На заседании 11 февраля 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Морозовой А.И. ученую степень кандидата физико-математических наук (протокол № 2.2).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» (физико-математические науки – 6, технические науки – 2) и 8 докторов наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» (технические науки), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 16, «против» – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор



А.М. Глезер

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., с.н.с.

Н.М. Александрова

Дата оформления Заключения: «12» февраля 2019 г.