

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НИУ «БелГУ»)



**НИУ
БелГУ**
BELGOROD STATE
UNIVERSITY (BSU)

Победы ул., д. 85, г. Белгород, 308015; e-mail: info@bsu.edu.ru,
тел.: (4722) 30-12-11, факс 30-10-12, Web: http://www.bsu.edu.ru
ОКПО 02079230, ОГРН 1023101664519, ИНН/КПП 3123035312/312301001

№ _____

№ _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по
стратегическому развитию,
науке и инновациям
И.В. Скрипникова



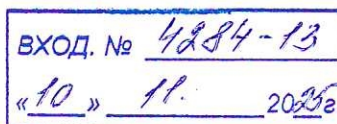
ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Белгородский государственный национальный
исследовательский университет» на диссертационную работу
Саркеевой Елены Александровны на тему «Повышенные функциональные
свойства холоднокатаных наноструктурных дисперсионно–твердеющих
медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Актуальность темы диссертационной работы

Постоянное развитие техники и технологий предъявляет к материалам все более жесткие требования по механическим и эксплуатационным свойствам. В настоящее время используемые материалы зачастую не удовлетворяют требуемым характеристикам хотя бы по одному параметру, что приводит к необходимости использования либо более дорогостоящих аналогов, либо структурная модификация имеющихся путем механической и термической обработок. Как известно, прочность и электропроводность медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr являются взаимоисключающими характеристиками, которые играют важную роль в обеспечении безопасности и энергосбережения. В связи с этим одновременное достижение высоких значений заданных свойств является актуальной задачей.

Особый интерес представляет наноструктурирование медных сплавов интенсивной пластической деформацией (ИПД), которая создаёт ультрамелкозернистую структуру, резко повышающую прочность. Для получения конечных изделий, таких как ленты или выводные рамки, заготовки дополнительно подвергают холодной прокатке, что ещё больше



увеличивает прочность за счёт роста плотности дефектов, хотя это слабо влияет на электропроводность. Дополнительное упрочнение и рост электропроводности достигаются за счёт старения, в ходе которого образуются наночастицы вторых фаз.

В этой связи диссертационная работа Саркеевой Елены Александровны, направленная на поиск путей увеличения функциональных свойств холоднокатаных наноструктурных дисперсионно-твердеющих медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr, представляет несомненную актуальность как с научной, так и с практической точки зрения.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 137 страницы. Работа содержит 63 рисунка и 10 таблиц, список цитируемой литературы включает 146 источников. Содержание и структура диссертации соответствуют поставленной цели исследования и находятся в логическом единстве.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту, сведения о личном вкладе автора в работу, также приводится список публикаций автора по теме диссертации и сведения об апробации работы.

В первой главе автор проводит литературный анализ научных статей и изданий отечественных и зарубежных авторов по тематике работы. Представлен анализ научных публикаций по эволюции микроструктуры и свойств меди и медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr в ходе РКУП и прокатки.

Во второй главе приведена информация о рассматриваемом материале, используемом оборудовании и методиках механических испытаний. В качестве материала исследования были выбраны медные сплавы Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, которые были подвергнуты ИПД равноканальному угловому прессованию (РКУП) с последующей холодной прокаткой (ХП). Затем были проведены испытания на механические свойства, измерения электропроводности и анализ микроструктуры различных состояний.

В третьей главе представлены результаты изучения эволюции микроструктуры медных сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, подвергнутых ХП, РКУП, РКУП+ХП и последующему старению. Исследования показали, что комбинация интенсивной пластической деформации (РКУП) и холодной прокатки (ХП) позволяет сформировать в сплаве Cu-0,5Cr ультрамелкозернистую наноструктуру. По мере увеличения общей деформации микроструктура трансформируется от ячеистой к ламеллярной с ростом доли высокоугловых границ, а последующее старение приводит к выделению наночастиц хрома. Характер дислокационной структуры, созданной на этапе деформации, определяет размер и распределение этих упрочняющих частиц: при меньшей деформации они

распределены равномерно, а при высокой — образуются преимущественно по границам зерен.

В четвертой главе представлены результаты механических свойств сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr после ТМО, включающую РКУП, ХП и старение. Комбинированная обработка методами РКУП и холодной прокатки позволила значительно повысить прочность сплавов: до 605 МПа для Cu-0,5Cr и до 660 МПа для Cu-0,5Cr-0,2Zr. Старение приводит к дополнительному упрочнению при умеренных деформациях ($\epsilon < 5$), но вызывает разупрочнение при высоких степенях деформации из-за процессов возврата. Количественный анализ показал, что основной вклад в прочность сплава Cu-0,5Cr вносит дисперсионное упрочнение (45-55%), в то время как в сплаве Cu-0,5Cr-0,2Zr ключевую роль играют как дисперсионное (29-41%), так и дислокационное (34-40%) упрочнение. Для обоих сплавов вклад зернограницного упрочнения не превышал 16% независимо от степени деформации.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния термомеханической обработки на электропроводность сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr. Проведен анализ вкладов различных структурных параметров в электросопротивление сплава Cu-0,5Cr. Проведен анализ кинетики старения сплава Cu-0,5Cr в образцах с различной степенью деформации. Электропроводность сплавов Cu-Cr после старения резко возрастает до 68-75% IACS, так как распад твердого раствора и выделение наночастиц уменьшают рассеяние электронов. Ключевым фактором является обеднение матрицы легирующими элементами, чей вклад в сопротивление доминирует над влиянием дислокаций и границ зерен. Предварительная деформация значительно ускоряет этот распад, снижая энергию активации процесса с 67 кДж/моль до 20,3 кДж/моль, что объясняет более высокую проводимость сильнее деформированных состояний.

В заключении приведены общие выводы, сделанные по полученным в диссертационной работе результатам, а также перспективы дальнейшего развития темы.

Научная новизна результатов, изложенных в диссертации

Научная новизна диссертационной работы Саркеевой Е.А. не вызывает сомнения и заключается в следующем:

1. Исследовано образование наноструктуры в дисперсионно-твердеющих медных сплавах после РКУП, холодной прокатки и старения. Показано, что с ростом степени деформации при РКУП последующая прокатка формирует два типа наноструктур, различающихся размером зерен/субзерен, распределением дислокаций, морфологией и пространственным расположением наночастиц вторых фаз.

2. Разработана и теоретически обоснована феноменологическая модель, описывающая формирование наноструктуры в процессе холодной прокатки и последующего старения. Особенностью модели является учёт

характера дислокационной субструктуры и состояния границ зерен, формирующихся при прокатке наноструктурированных медных сплавов.

3. Впервые удалось достичь оптимального сочетания механических и электропроводных свойств в тонких лентах сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr после термомеханической обработки (РКУП, ХП и старение): временное сопротивление 700 ± 10 МПа, относительное удлинение $18 \pm 2\%$ и электропроводность $73 \pm 2\%$ IACS.

4. Показано, что формирование наноструктуры в результате РКУП, холодной прокатки и старения изменяет кинетику образования наночастиц вторых фаз. Это проявляется в аномально высокой скорости распада пересыщенного твёрдого раствора из-за ускорения диффузионных процессов, в частности, за счёт снижения энергии активации выделения и роста наноразмерных частиц.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов подтверждается использованием современных методов исследований, использованием поверенного оборудования, большим объемом экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов также подтверждается публикациями результатов исследований в реферируемых научных изданиях из перечня ВАК, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, а также представлением их на тематических конференциях. Качественный и количественный анализ полученных структур проводили методами оптической микроскопии (ОМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА). Механические свойства определяли разрушающими методами контроля. Аттестацию электрических свойств проводили методом вихревых токов.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором работы, заключается в следующем:

Достоинством диссертационной работы Саркеевой Е.А. является то, что автору удалось подробно установить фундаментальные закономерности формирования наноструктуры в медных сплавах при комбинированной термомеханической обработке. Исследование раскрывает взаимосвязь между степенью деформации (РКУП, ХП), типом возникающей дислокационной субструктуры (ячеистая/ламеллярная), эволюцией границ зерен (МУГ/ВУГ) и последующим распадом твердого раствора. Была разработана и обоснована феноменологическая модель, которая объясняет, как характер дислокационной структуры, созданной на этапе деформации, влияет на механизм и кинетику выделения наночастиц при старении. Дано количественное объяснение аномального ускорения распада твердого раствора. Установлено, что предварительное наноструктурирование значительно снижает энергию активации процесса выделения частиц (с 67 до 20.3 кДж/моль). Теоретически подтверждено, что основной вклад в

прочность вносит дисперсионное упрочнение, а в электропроводность — степень обеднения матрицы легирующими элементами.

Практическая ценность работы обусловлена разработкой и оптимизацией технологии ТМО для получения медных сплавов с оптимальным сочетанием прочности, пластичности и электропроводности. Показано, что последовательное применение РКУП, холодной прокатки и старения позволяет целенаправленно формировать требуемую микроструктуру. Достигнут комплекс свойств в промышленно важном сплаве Cu-0,5Cr-0,2Zr: прочность 700 МПа, пластичность 18% и электропроводность 73% IACS. Полученные результаты имеют прямое применение в электротехнической и электронной промышленности. Материалы с таким сочетанием свойств подходят для изготовления высоконагруженных выводных рамок интегральных схем, токопроводящих шин, контактов и других элементов, где одновременно требуются высокая механическая надежность и минимальные потери энергии.

Замечания:

Отмечая достоинства диссертационной работы Е.А. Саркеевой, в качестве замечаний следует указать:

1. Выделите, пожалуйста, основное отличие выполненной диссертационной работы от других работ по данной тематике?
2. Каковы перспективы дальнейшего практического использования технологического маршрута, полученного в рамках диссертационной работы?
3. Почему для сплавов Cu-0,5Cr-0,2Zr и Cu-0,5Cr были определены температуры старения 450°C и 425°C соответственно? Были ли исследованы другие температуры?
4. Каким образом была оценена плотность дислокаций? Только рентгеновским методом? Была ли использована просвечивающая электронная микроскопия?
5. С какой целью был добавлен Zr, который не внес никакого вклада в механизмы упрочнения?
6. При РКУП рост частиц определяется трубочной диффузией. Однако согласно изображениям ПЭМ частицы выделяются не на дислокациях, а в матрице. Какой был деформационный разогрев материала? Могли ли частицы выделиться в конце деформации либо при охлаждении?
7. Старение сильнодеформированного материала приводит к тому, что выделяются крупные частицы вдоль границ зерен, которые не вносят существенного вклада в упрочнение. Следовало бы изменить условия старения (температуру или скорость нагрева), чтобы дисперсионное упрочнение не снижалось.

Приведенные выше замечания носят рекомендательный характер и не снижают значимость проведенной работы.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Анализ цели и задач диссертации, методов и методик их решения, полученных экспериментальных результатов и научных закономерностей и предложенных теоретических обоснований, а также сформулированных выводов и практических рекомендаций позволяет заключить, что диссертация Саркеевой Елены Александровны «Повышенные функциональные свойства холоднокатаных наноструктурных дисперсионно-твердеющих медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr» соответствует паспорту специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы в следующих пунктах:

п.1.2 «Исследование влияния параметров элементов структуры на свойства наноматериалов»,

п. 1.5 «Исследование взаимосвязи химического и фазового составов, структурного состояния с физическими, механическими, химическими, технологическими, эксплуатационными и другими свойствами наноматериалов».

Заключение

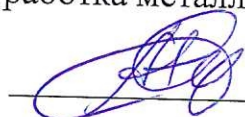
Рассмотрев диссертационную работу Саркеевой Елены Александровны, считаем, что в представленной работе получен ряд важных и новых экспериментальных результатов, выводы обоснованы и сформулированы корректно. Полученные результаты показывают, что комбинированная термомеханическая обработка (РКУП и холодная прокатка) с последующим старением позволяет целенаправленно формировать в медных сплавах три типа наноструктур, что обеспечивает рекордное сочетание высокой прочности (до 700 МПа) и электропроводности (до 75% IACS) за счёт управления процессами дисперсионного упрочнения и ускоренного распада твёрдого раствора.. Содержание диссертации отражено в достаточном количестве статей, опубликованных в рецензируемых периодических изданиях, входящих в список ВАК, а также в материалах и трудах научных конференций. Автореферат диссертации и публикации диссертанта достаточно полно отражают содержание диссертации. Диссертация и автореферат оформлены в полном соответствии с установленными в ГОСТ Р 7.0.11-2011 требованиями.

В целом, по научному уровню полученных результатов, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа Саркеевой Е.А. соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденных Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62), а её автор, Саркеева Елена Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы.

Диссертация соискателя и отзыв на нее были заслушаны и обсуждены на расширенном заседании кафедры материаловедения и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» 10 сентября 2025 г. (протокол № 1). Результаты голосования: «За» — 16 чел., «Против» — нет, «Воздержались» — нет.

Отзыв подготовила:

И.о. заведующего кафедрой материаловедения
и нанотехнологий ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ»
д. техн. н. по специальности 2.6.1 Металловедение
и термическая обработка металлов и сплавов



/ Федосеева Александра Эдуардовна

30.10.2025

Сведения о ведущей организации

Адрес: 308015, Белгородская область, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Телефон: +7 (4722) 30-12-11

Адрес электронной почты: Info@bsuedu.ru

Личную подпись
удостоверяю
Специалист отдела
кадрового обеспечения
Управления
организационного и
и кадрового обеспечения «

Федосеева А. Э.
Иван Иванович
31 10 2025

