

На правах рукописи



Саркеева Елена Александровна

**ПОВЫШЕННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
ХОЛОДНОКАТАНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ
ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ МЕДНЫХ СПЛАВОВ
СИСТЕМ Cu-Cr и Cu-Cr-Zr**

Специальность

2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Уфа – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель **Александров Игорь Васильевич**,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Страумал Борис Борисович**,
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики твёрдого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук»,
заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах

Попов Владимир Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук»,
главный научный сотрудник лаборатории диффузии

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»)

Защита состоится «25» ноября 2025 г. в 12³⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.14 в ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте www.uust.ru.

Автореферат разослан « » 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.479.14,
к.т.н., доцент



Е.В. Бобрук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Перспективные дисперсионно-твердеющие медные сплавы систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr получили широкое распространение в ключевых отраслях промышленности таких-как транспортное машиностроение, электротехника и электроника. Основное преимущество данных сплавов обусловлено уникальным сочетанием взаимоисключающих свойств: высокой электропроводности и механической прочности. Данное сочетание свойств делает их незаменимыми при изготовлении ответственных изделий проводниковых систем и определяет их энергоэффективность и безопасность эксплуатации.

Однако стремительное развитие технологий предъявляет к этим материалам все более жесткие требования. В частности, контактные провода должны сохранять стабильно высокие физические и механические свойства при экстремальных механических нагрузках и повышенных температурах. В связи с этим поиск инновационных подходов для одновременного достижения высоких значений заданных свойств представляет собой одну из наиболее актуальных задач.

Анализ научной литературы указывает на большой объем исследований, посвященных поиску путей решения данной задачи. Особый интерес представляют работы по наноструктурированию медных сплавов методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Наноструктурные состояния (НС), образованные в ходе ИПД, обладают рядом характерных черт, таких как малый размер зерна в пределах десятков и сотен нанометров, высокая плотность дислокаций, высокая доля высокоугловых границ зерен (ГЗ), а также сегрегации легирующих элементов, наночастицы вторых фаз, нанодвойники и др. Дефекты морфологии, размер и распределение которых дополнительно повышают прочность материалов. Однако, для изготовления, например, выводной рамки интегральной схемы, получения листов и лент необходимо подвергнуть полученные полуфабрикаты дополнительной деформационной обработке – холодной прокатке (ХП).

Как показано на примере медных и титановых сплавов, сочетание методов ИПД с классическими методами деформационных обработок оказывается весьма выгодно. Изменение напряженно-деформированного состояния при переходе от РКУП к холодной прокатке может активизировать новые системы скольжения дислокаций или системы двойникования. При этом можно спрогнозировать рост плотности дислокаций и двойников, которые положительно повлияют на прочность, однако слабо на электропроводность. Формирование острой текстуры при прокатке способствует не только дополнительному текстурному упрочнению, но и улучшению электропроводности.

В термически упрочняемых сплавах наряду с формированием НС состояний ключевыми являются процессы, происходящие при старении. Эти процессы определяются особенностями кинетики распада пересыщенного твердого раствора и образованием наноразмерных частиц вторых фаз. Наноразмерные частицы, с одной стороны, упрочняют материал, блокируя движение дислокаций и миграцию границ зерен, а с другой – они обеспечивают увеличение электропроводности, за счет уменьшения рассеяния электронов на искажениях кристаллической решетки, вызванных атомами легирующих элементов. На распад пересыщенного твердого раствора существенное влияние оказывают микроструктурные характеристики, сформированные в ходе деформации, включая высокую плотность дислокаций, концентрацию вакансий и сформированные субструктуры. Указанные изменения могут оказывать как

положительное, так и отрицательное воздействие на прочность и электропроводность материалов.

Степень разработанности темы исследования. В последние годы было представлено множество работ, посвященных исследованию влияния холодной прокатки на микроструктуру и свойства материалов в наноструктурном состоянии. Эти исследования проводились как зарубежными, так и российскими авторами, такими как, Александров И.В., Беляков А.Н., Валиев Р.З., Вей В. (Wei W.), Столяров В.В., Hazra S., Song D., Мишин О.В., Степанов Н.Д. и другие.

Работы этих авторов в основном фокусируются на чистых меди и титане, а также алюминиевых сплавах. Только небольшая часть исследований посвящена изучению воздействия холодной прокатки на наноструктурные сплавы систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr.

Анализ современных исследований показывает что, на момент постановки задач данной диссертационной работы оставался открытым вопрос об особенностях изменения наноструктурных состояний сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr и их связи с прочностью, пластичностью и электропроводностью, формируемыми в результате термомеханической обработки (ТМО), включающей РКУП, ХП и старение. Кроме того, актуальной задачей является определение режимов получения тонких наноструктурных лент из электротехнических сплавов на примере Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr (вес.-%).

Цель диссертационной работы.

Установить влияние термомеханической обработки, включающей равноканальное угловое прессование, холодную прокатку и старение, на закономерности формирования наноструктурного состояния и изменение прочности, пластичности и электропроводности в дисперсионно-твердеющих медных сплавах Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Установить закономерности формирования наноструктурных состояний в выбранных дисперсионно-твердеющих медных сплавах в процессе ТМО, включающей РКУП, ХП и старение.

2. Разработать феноменологическую модель формирования наноструктуры в процессе холодной прокатки в зависимости от степени деформации и последующего старения крупнозернистого и наноструктурного состояний дисперсионно-твердеющих медных сплавов.

3. Определить функциональные свойства наноструктурных медных сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, полученных ТМО, включающей РКУП, ХП и старение.

4. Установить взаимосвязь между параметрами микроструктуры, прочностью и электропроводностью, обеспечивающими рациональное сочетание прочности, пластичности и электропроводности в холоднокатанных наноструктурных образцах сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr.

Научная новизна заключается в том, что в работе:

1. Установлены закономерности формирования наноструктурных состояний в образцах, подвергнутых РКУП, холодной прокатке и старению, отличающиеся тем, что при увеличении степени деформации РКУП последующая ХП и старение приводят к формированию двух типов наноструктуры с различной дислокационной субструктурой. Принципиальными отличиями наноструктур являются размер зерен/субзерен, пространственное распределение дислокаций и наночастиц вторых фаз, а также их морфология.

2. Предложена и обоснована феноменологическая модель формирования наноструктуры в процессе холодной прокатки и последующего старения. Модель

отличается тем, что учитывает характер сформированной дислокационной субструктурой и состояние границ зерен в ходе ХП медных сплавов в наноструктурном состоянии.

3. В результате реализации термомеханической обработки, включающей РКУП, ХП и старение, *впервые* удалось достичь рационального сочетания временного сопротивления 700 ± 10 МПа, пластичности $18\pm2\%$, электропроводности $73\pm2\%$ IACS в тонких лентах сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr.

4. Установлено, что формирование наноструктурных состояний в образцах, подвергнутых РКУП, холодной прокатке и старению приводит к изменению кинетики зарождения и роста наноразмерных частиц вторых фаз, *отличающейся* аномально высокой скоростью распада пересыщенного твердого раствора, за счет ускорения диффузионных процессов, а именно, уменьшения энергии активации выделения и роста наноразмерных частиц.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Предложенная феноменологическая модель трансформации наноструктуры может быть использована для прогнозирования получаемой структуры изделий из медных сплавов с регламентированными уровнем механических свойств и электропроводностью.

Определена предельная степень деформации дисперсионно-твердеющих сплавов системы Cu-Cr и Cu-Cr-Zr для получения листов и лент с рациональным сочетанием прочности и электропроводности. Установлено, что необходимым условием для получения оптимального сочетания прочности и электропроводности в сплавах Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, является достижение в образце степени деформации от 3 до 5 перед последующим старением.

Определены режимы РКУП, холодной прокатки и последующего старения дисперсионно-твердеющих сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr, обеспечивающие возможность получения лент с повышенными физико-механическими свойствами в сплаве Cu-0,5Cr ($\sigma_B = 500\pm15$ МПа, $\delta = 15\pm1\%$, $75\pm2\%$ IACS) и в сплаве Cu-0,5Cr-0,2Zr ($\sigma_B = 700\pm10$ МПа, $\delta = 18\pm2\%$, $73\pm2\%$ IACS). Разработанные режимы обеспечивают возможность достижения наноструктурного состояния, характеризующегося однородной наноструктурой с дисперсными выделениями наночастиц размером 6–8 нм для сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, соответственно.

Достоверность полученных результатов обосновывается и подтверждается проведением экспериментов на поверенном оборудовании с подтвержденной точностью измерений и использованием лицензионного программного обеспечения, корректной постановкой задач исследования с применением современных взаимодополняющих методик исследования, воспроизводимостью полученных результатов. Достоверность полученных результатов так же подтверждается публикацией основных результатов исследований в рецензируемых научных журналах.

Методология и методы исследования. В методологическую основу решения поставленных целей и задач данной диссертационной работы легли работы ведущих отечественных и зарубежных ученых. Исследования проводили на дисперсионно-твердеющих медных сплавах Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr (вес. %), подвергнутых равноканальному угловому прессованию, холодной прокатке и старению.

Качественный и количественный анализ полученных микроструктур и фазового состава проводили методами оптической микроскопии, растровой электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Механические характеристики материалов оценивались с использованием

стандартных испытаний на одноосное растяжение и измерения микротвердости. Измерение электрических характеристик проводили методом вихревых токов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Закономерности формирования наноструктурных состояний в сплавах Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr в процессе ТМО, включающей равноканальное угловое прессование, холодную прокатку и старение.

2. Феноменологическая модель формирования наноструктуры в дисперсионно-твердеющих медных сплавах, учитывающая кинетику распада твердого раствора с выделением наноразмерных частиц вторых фаз и регламентированное распределение дислокаций, обеспечивающие достижение рационального комплекса свойств.

3. Рациональное сочетание прочности, пластичности и электропроводности в тонких лентах, полученных в процессе ТМО, включающей равноканальное угловое прессование, холодную прокатку и старение сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr.

4. Кинетика зарождения и роста наноразмерных частиц вторых фаз в дисперсионно-твердеющих медных сплавах систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr.

Степень достоверности и аprobация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях: The 13th International Conference on «Superplasticity in Advanced Materials. ICSAM 2018». St. Petersburg, Russia (August 19-22, 2018 г); Открытая школа-конференция стран СНГ «УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ». Уфа, Россия (1-5 октября 2018 г); The Sixth International Symposium «BULK NANOMATERIALS: from fundamentals to innovations. BNM-2019». Уфа, Россия (25-27 сентября, 2019 г); Открытая школа-конференция стран СНГ «УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ». Уфа, Россия (5-9 октября 2020 г); XIV Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения». Уфа, Россия (1-3 ноября 2020 г); «20th International Metallurgy and Materials Congress. IMMC 2021». Haziran, Turkey (10-12 June 2021); Международная конференция «ФизикА. СПБ/2021». Санкт-Петербург, Россия (18-22 октября 2021 г); XVI Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения». Уфа, Россия (25-27 октября 2022 г); 6-я Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2022». Пермь, Россия (10–14 октября 2022 г); Международной конференции «UUST Nanomaterials Days», посвященная 75-летнему юбилею Заслуженного деятеля науки РФ, профессора, д.ф.-м.н. Валиева Руслана Зуфаровича. Уфа, 2024, Россия (26–27 сентября 2024 г).

Исследования проводились в рамках выполнения проекта № 16.1969.2017/4.6 и проекта № 0838-2020-0006 Министерства науки и высшего образования РФ.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 18 статей, из которых 2 статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки). Перечень статей приведен в конце авторефера.

Личный вклад соискателя проявляется в планировании и проведении экспериментов, постановке целей и задач исследования, а также в определении путей их реализации. Автор лично участвовал во всех этапах получения результатов, представленных в диссертации. Интерпретация и обобщение данных, а также подготовка и написание статей выполнялись совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 157 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В работе представлены 67 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 180 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы данной диссертационной работы, в соответствии с которой поставлена цель и сформулированы задачи исследований, научная новизна полученных результатов, теоретическая и практическая значимость работы, а также отражены положения, выносимые на защиту, обоснованы степень достоверности и апробация результатов работы, приведены сведения о публикациях и личном вкладе автора, структура и объем диссертации, связь с научными проектами.

В **первой главе** проведен анализ литературных данных по эволюции микроструктуры и свойств меди и медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr в ходе равноканального углового прессования (РКУП) и прокатки. Описаны особенности изменения структуры и свойств в ходе прокатки в после РКУП. Отмечены недостаточно изученные вопросы в данной области. На основании обзора литературы были сформулированы цели и задачи диссертационной работы

Во **второй главе** описаны используемые в исследовании методики. В качестве материалов исследования выбраны медные сплавы Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, широко используемые в различных отраслях промышленности. Для формирования пересыщенного твердого раствора образцы обоих сплавов выдерживали в течение 0,5 часа при 1000°C и далее закаливали в 5%-ном растворе NaCl. Полученные состояния приняты за исходные состояния данных сплавов.

Ультрамелокзернистая (УМЗ) структура была сформирована методом ИПД равноканальным угловым прессованием. Число проходов варьировали от 1 до 8. РКУП проводилось при комнатной температуре по маршрутам Вс и А.

Исследование влияние холодной прокатки на эволюцию микроструктуры и свойств в крупнозернистом (КЗ) и УМЗ состояниях проводили на образцах сплава Cu-0,5Cr. Прокатку осуществляли при комнатной температуре, степень обжатия варьировали от 40% до 95%. Для сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr степень обжатия составила 60%. За один проход во время прокатки уменьшение толщины не превышало примерно 5%. Между проходами заготовки охлаждали на воздухе, чтобы минимизировать влияние деформационного нагрева на микроструктуру.

Для установления особенностей полученных наноструктурных состояний использовали современные методики металлографического анализа, РЭМ, ПЭМ и РСА.

Механические свойства сплавов оценивали методами измерения микротвердости и одноосного растяжения. Электропроводность измеряли методом вихревых токов.

В **третьей главе** представлены результаты изучения эволюции микроструктуры медных сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, подвергнутых холодной прокатке (ХП), равноканальному угловому прессованию (РКУП), комбинированной обработке РКУП с последующей ХП и последующему старению. Микроструктурные исследования проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в трёх взаимно перпендикулярных сечениях, а также методом рентгеноструктурного анализа (РСА).

Исследования ПЭМ показали, что ХП КЗ сплава Cu-0,5Cr приводит к формированию ламеллярной сильно фрагментированной микроструктуры (Рисунок 1, а). Сформированные границы уширены и изогнуты и окружают внутренние области ячеек с меньшей плотностью дислокаций. Средний поперечный размер ячейки в состоянии после

ХП95 ($e = 3,5$) (ХП с 95% обжатием) составил 200 ± 15 нм. Сформированная микроструктура отличалась высокой плотностью дислокаций, равной $2,58 \cdot 10^{14}$ м⁻², и преимущественно малоугловыми (МУГ) границами зерен, доля которых достигла 87%.

Последующее старение при 425°C в течение 40 мин. привело к распаду пересыщенного твердого раствора, о чем свидетельствует уменьшение параметра решетки и выделение наноразмерных частиц со средним размером 8 ± 1 нм. Также старение холоднокатанных КЗ образцов привело к увеличению среднего размера ламелей до 377 ± 30 нм. Плотность дислокаций снизилась на 30–32%, а размер областей когерентного рассеяния (ОКР) увеличился на 10–20% в зависимости от состояния.

Деформация методом РКУП приводит к значительному измельчению структурных элементов и преобразованию микроструктуры исходного состояния в наноструктуру за счет дислокационных перестроек. По мере увеличения числа проходов РКУП с 1 до 8 средний размер зерна/субзерна уменьшается с 90 ± 9 мкм до 250 ± 15 нм. Уменьшается и размер ОКР с 195 ± 11 нм до 123 ± 13 нм. Это подтверждает значительное измельчение микроструктуры. Часть границ приобретает высокоугловую разориентацию. Все изображения тонкой структуры показали, что сформированная наноструктура содержит высокую плотность дислокаций.

Несмотря на то, что образцы были продеформированы при комнатной температуре, в тонкой структуре образцов после 4 ($e = 4,6$) и 8 ($e = 9,2$) проходов РКУП наблюдается незначительное количество наноразмерных частиц с размером около 3–4 нм (Рисунок 2). Эти наночастицы, обладающие контрастом, напоминающим «кофейные зерна», идентифицировали как хромовую ГЦК фазу.

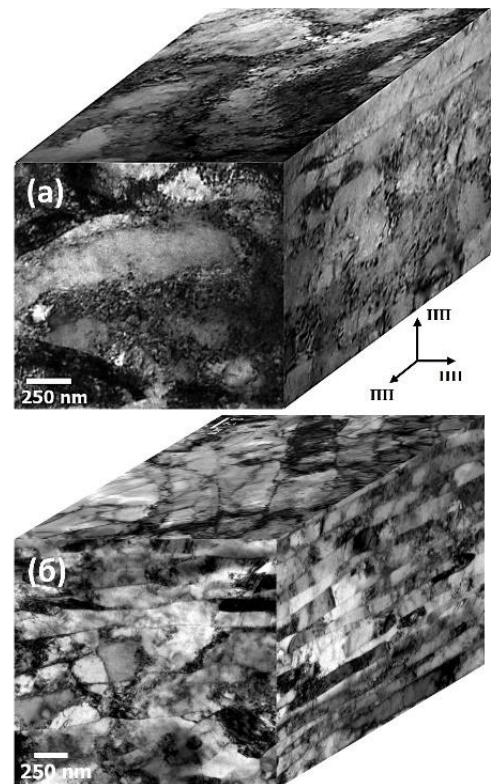


Рисунок 1 – Микроструктура сплава Cu-0,5Cr после
а) ХП90 ($e = 2,7$);
б) РКУП4+ХП90 ($e = 7,3$)

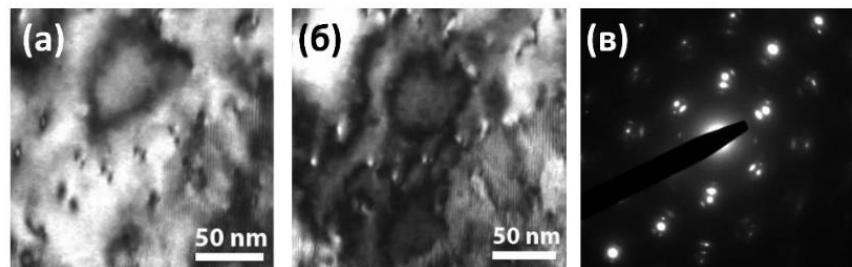


Рисунок 2 – Наноразмерные частицы в медной матрице сплава Cu-0,5Cr: (а) светлопольное изображение, (б) темнопольное изображение, (в) дифракционная картина, соответствующая рис. 1 (а), ПЭМ

В процессе старения состояний после РКУП наблюдается уменьшение плотности дислокаций и, как следствие, снижение внутренних напряжений, составляющее от 10 до 15%. Кроме того, в ходе старения на 10 % увеличивается размер ОКР, уменьшается

плотность дислокаций на 15% после 4 и 8 проходов РКУП. В результате проведения РКУП и последующего старения в сплаве Cu-0,5Cr сформировано наноструктурное состояние, характеризующееся средним размером зерна/субзерна 300 ± 15 нм и наноразмерными выделениями диаметром 10 ± 1 нм (РКУП8+ТО).

Холодная прокатка образцов, подвергнутых РКУП, привела к значительной трансформации структуры. Увеличение степени обжатия при ХП сопровождалось развитием ламеллярной микроструктуры (Рисунок 1, б) в продольном вертикальном сечении образца независимо от числа проходов РКУП. Показано, что размер зерна оказывает влияние на дисперсность структуры, сформированной в ходе ХП. ХП после 4 проходов РКУП привела к уменьшению поперечного размера ламелей с 300 ± 20 нм до 180 ± 20 нм в состоянии РКУП4+ХП95 ($e = 7,8$). При этом холодная прокатка после 8 проходов РКУП привела к уменьшению размера ламелей с 250 ± 15 нм до 160 ± 10 нм в состоянии РКУП8+ХП95 ($e = 12,7$).

Число проходов РКУП также влияет на характер дислокационной структуры, сформированной при последующей прокатке. ХП образцов после одного и двух проходов РКУП приводит к формированию в образцах ячеистой микроструктуры с высокой плотностью дислокаций, которые однородно распределены в теле ячеек (Рисунок 3, а). ХП

образцов в комбинации с 4 или 8 проходами РКУП привела к формированию ячеистой микроструктуры с более тонкими и резкими границами, а тело ячеек оказалось свободно от дислокаций (Рисунок 3, б). Изменение контраста границ говорит об увеличении разориентировки границ зерен/субзерен с МУГ на преимущественно высокоугловую (ВУГ). Это подтверждают результаты анализа методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). Увеличение степени деформации при РКУП приводит к росту доли ВУГ границ зерен с 27% до 56% при последующей прокатке.

Обобщенные результаты исследований методом РСА НС образцов, подвергнутых ХП, приведены на Рисунке 4. По мере увеличения степени обжатия при плоской прокатке размер ОКР уменьшается (Рисунок 4, а). Видно, что увеличение числа проходов РКУП влияет на скорость уменьшения размера ОКР при последующей прокатке.

На Рисунке 4, б представлена зависимость плотности дислокаций от числа проходов РКУП. При анализе графика можно выделить следующую тенденцию: ХП образцов, подвергнутых 1–2 проходам РКУП, приводит к заметному увеличению среднего значения плотности дислокаций. Однако с увеличением числа проходов РКУП до 4–8 плотность дислокаций после ХП начинает снижаться. Это может быть связано с более активным взаимодействием дислокаций с границами при уменьшении размера зерен. В результате большая часть дислокаций перемещается из тела зерна в приграничные области за счет полей напряжений от границ, особенно от ступеней на границах и от тройных стыков.

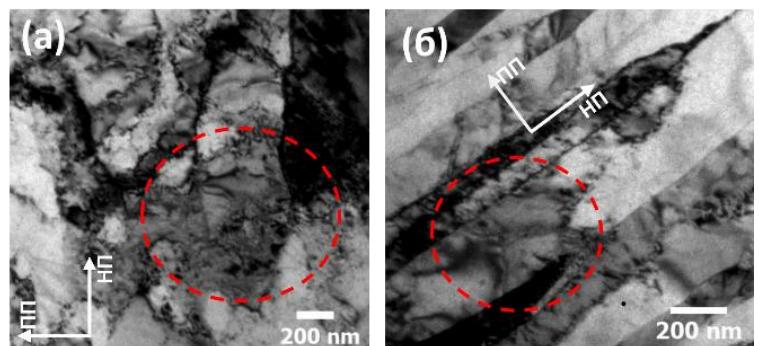


Рисунок 3 – Тонкая структура НС сплава Cu-0,5Cr: а) РКУП2+ХП60 ($e = 3,4$), б) РКУП8+ХП95 ($e = 12,7$)

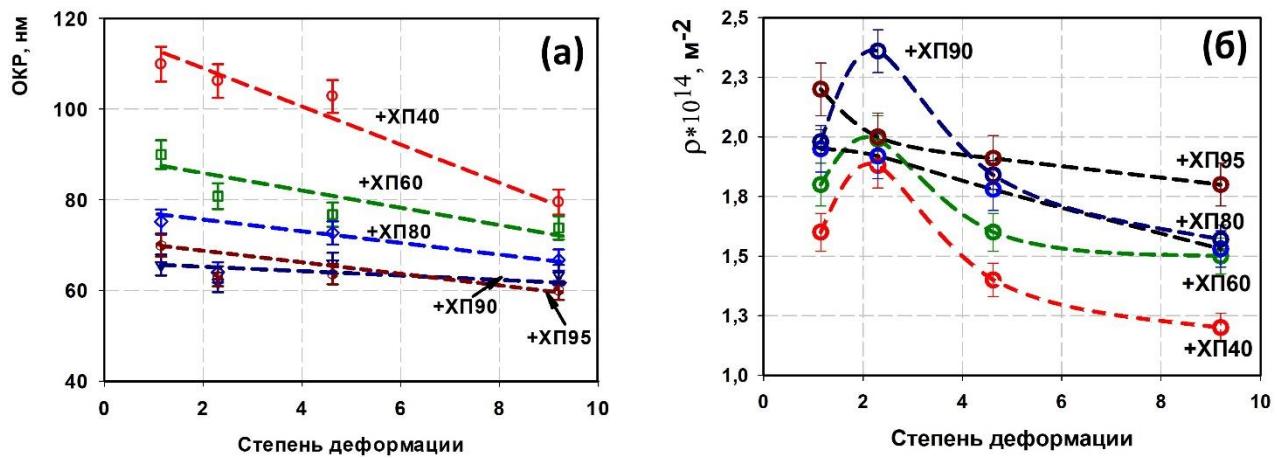


Рисунок 4 – Параметры микроструктуры сплава Cu-0,5Cr после РКУП+ХП: а) ОКР, б) плотность дислокаций

В этих областях активно происходят процессы взаимодействия и аннигиляции дислокаций. Как следствие, ультрамелкие зерна имеют довольно свободную от дислокаций внутреннюю часть, как это наблюдается при помощи ПЭМ (Рисунок 3, б). Также, относительно большое количество дислокаций в границах зерен принимает участие в увеличении угла разориентации между зернами.

В результате старения происходит распад пересыщенного твёрдого раствора с выделением наноразмерных частиц вторых фаз. Наблюдаемые наноразмерные частицы идентифицировали как хромовую ОЦК фазу. Как показали исследования тонкой структуры, характер дислокационной структуры, сформированной в результате РКУП и последующей прокатки, оказал значительное влияние на зарождение и развитие наноразмерных частиц второй фазы. ХП после 1–2 проходов РКУП приводит к выпадению наночастиц, распределенных однородно как в теле, так и по границам ячеек с высокой плотностью дислокаций (Рисунок 5, а). В результате ХП после 4–8 проходов РКУП сформировались более крупные наночастицы, расположенные преимущественно по границам (Рисунок 5, б). При этом увеличение степени деформации привело к увеличению среднего размера наночастиц (Рисунок 6).

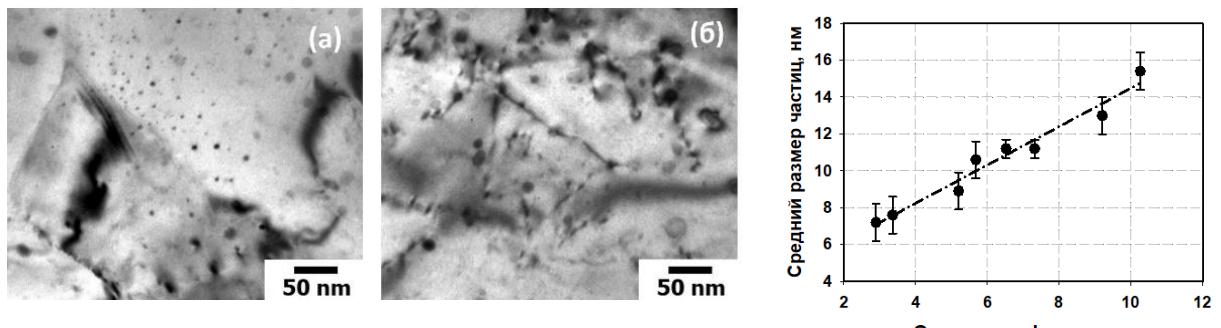


Рисунок 5 – Тонкая структура сплава Cu-0,5Cr:
а) РКУП2+ХП60+ТО ($e = 3,4$);
б) РКУП8+ХП95+ТО ($e = 12,7$)

Рисунок 6 – Зависимость среднего размера наночастиц от накопленной степени деформации в НС сплаве Cu-0,5Cr после старения

Исследования тонкой структуры были выполнены и в случае сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr. Было обнаружено, что в результате использования аналогичных режимов ТМО

формируются идентичные ламеллярные наноструктуры. Добавка Zr привела к формированию наноструктуры со значительно меньшим средним размером зерна/субзерна 175 ± 60 нм после РКУП4+ХП60 ($e = 4,3$) и 125 ± 50 нм после РКУП8+ХП60 ($e = 7,4$) и более высоким значениям плотности дислокаций. Исследования методом ПЭМ показали наличие наночастиц двух фаз, это частицы Cr и Cu₅Zr.

В результате проведённых исследований и анализа эволюции микроструктуры сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr было установлено, что добавка циркония не оказывает существенного влияния на общую тенденцию формирования микроструктуры. Микроструктурные особенности в обеих системах в результате комплексной деформации и термической обработки развивались сходным образом, что позволило выделить три основных типа структур и предложить феноменологическую модель трансформации микроструктуры крупнозернистого и наноструктурного состояний дисперсионнотвердеющих медных сплавов в процессе ТМО.

В результате ХП крупнозернистого состояния вплоть до степени деформации $e = 3,5$ формируется хорошо развитая ячеистая микроструктура (1 тип «крупнозернистая холоднокатаная»). Сформированная микроструктура отличалась высокой плотностью дислокаций, и преимущественно МУГ границами зерен. Стенки ячеек несовершенные, состоят из спутанных дислокационных линий. Дислокации равномерно распределены внутри ячеек (Рисунок 7, а). Последующее старение приводит к распаду пересыщенного твердого раствора, частицы второй фазы выделяются неоднородно как в теле, так и вдоль границ ячеек (Рисунок 7, б).

2 тип «смешанная холоднокатаная» формируется в результате РКУП (1–2 прохода) в сочетании с последующей ХП при средних степенях деформации ($1,75 < e < 5$). Сформированная ячеистая микроструктура характеризуется высокой плотностью дислокаций, равномерно распределённых в теле ячеек. Границы ячеек становятся более узкими и упорядоченными, вследствие возрастания угла разориентировки границ. Высокая плотность дислокаций способствует увеличению количества центров зарождения второй фазы (Рисунок 7, в). При последующем старении происходит зарождение однородно распределённых наноразмерных частиц вторых фаз, что дополнительно увеличивает прочность данных состояний (Рисунок 7, г).

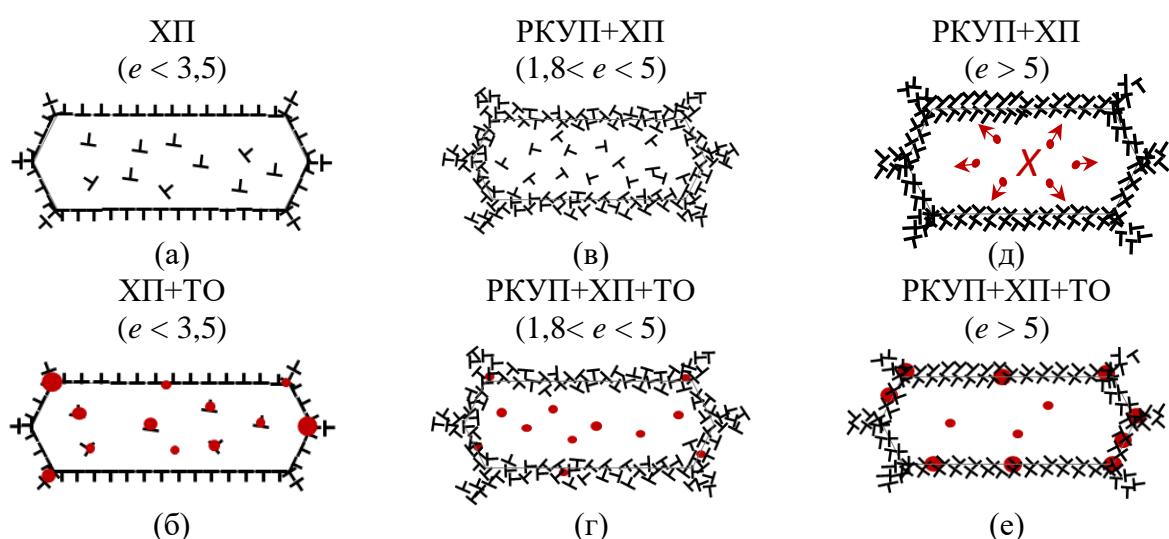


Рисунок 7 – Феноменологическая модель трансформации микроструктуры в ходе ХП образцов в КЗ и УМЗ состояниях и последующем старении

При дальнейшем увеличении степени деформации ($e > 5$) в результате 4–8 проходов РКУП в состояниях РКУП+ХП (3 тип «УМЗ холоднокатаная») дислокации перемещаются в приграничную область зерен/субзерен, тем самым увеличивая их взаимодействие и вероятность аннигиляции. Это приводит к возрастанию угла разориентировки границ зерен/субзерен и уменьшению их толщины. Кроме того, дислокации также вносят значительный вклад в образование второй фазы. Они выступают в качестве «транспортной магистрали» для ускоренного перемещения атомов легирующих элементов, поскольку коэффициент диффузии вдоль дислокаций на порядок выше, чем в кристаллической решетке. С другой стороны, высокая концентрация вакансий, созданных во время деформации, так же влияет на распределение атомов растворенных веществ. В случае, когда атомы примеси достаточно подвижны в комплексе с вакансией, вакансия захватывает примесный атом и движется к стокам, которыми преимущественно являются ВУГ (Рисунок 7, д). Там избыточные вакансии исчезают, а атомы примеси остаются и образуют сегрегацию неравновесную, но достаточно стабильную из-за малой подвижности в отсутствии вакансии. В результате частицы второй фазы зарождаются преимущественно на границах и быстро коагулируют (Рисунок 7, е). Это объясняет уменьшение вклада дисперсионного упрочнения и более высокие показатели электропроводности, результаты исследования которых представлены в главе 4 и главе 5, соответственно.

В четвертой главе приведены результаты изменения механических свойств сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr после ТМО, включающую РКУП, ХП и старение.

Увеличение степени обжатия до 95% ($e = 3,5$) при ХП образцов с КЗ микроструктурой позволяет достичь временного сопротивления 480 МПа в сплаве Cu-0,5Cr, при этом относительное удлинение уменьшается до 8%. Прокаткаnanoструктурного состояния привела к увеличению прочности до 605 МПа в состоянии РКУП8+ХП95 ($e = 12,7$) (Рисунок 8, а), при относительном удлинении, равном – 13%. Такая разница может быть объяснена состоянием границ зерен. После РКУП увеличивается доля ВУГ границ, пластичность материала повышается.

В сплаве Cu-0,5Cr-0,2Zr с увеличением степени приложенной деформации временное сопротивление возрастает до 660 МПа в состоянии РКУП8+ХП60 (Рисунок 8, б).

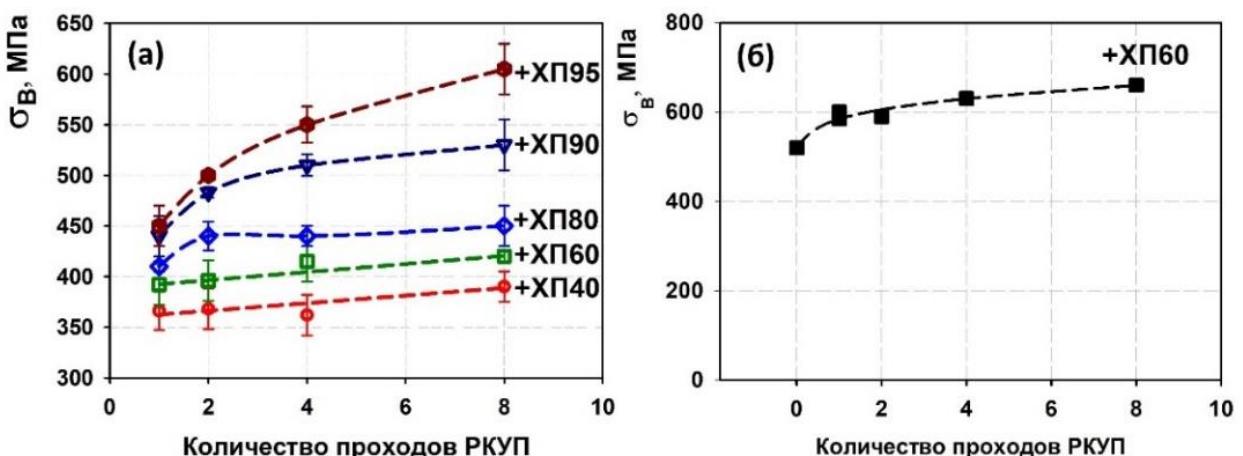


Рисунок 8 – Изменение временного сопротивления сплавов Cu-0,5Cr (а) и Cu-0,5Cr-0,2Zr (б) в зависимости от числа проходов РКУП

Старение приводит к различному изменению прочностных характеристик материала в зависимости от степени накопленной деформации (Рисунок 9). В сплаве Си-

0,5Cr при степени деформации $e < 5$ наблюдается увеличение прочности в результате старения. При степенях деформации $e > 5$ происходит разупрочнение, связанное с процессами возврата. Аналогичная тенденция отмечается и для сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr.

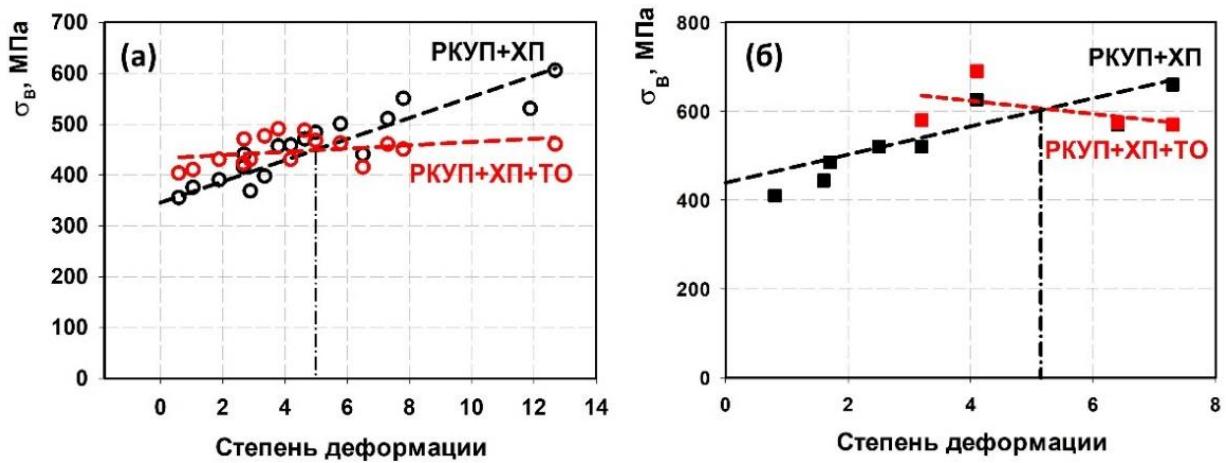


Рисунок 9 – Зависимость механических характеристик образцов при растяжении от степени деформации в ходе РКУП и ХП: а) Cu-0,5Cr; б) Cu-0,5Cr-0,2Zr

Прочностные характеристики металлов и сплавов определяются комплексом механизмов, среди которых для дисперсионно-твердеющих сплавов основными являются твердорастворное упрочнение, дисперсионное упрочнение и структурное упрочнение. Для выявления роли отдельных механизмов упрочнения в формировании высокопрочного состояния медных сплавов провели оценку их вклада на основе полученных микроструктурных параметров. На Рисунке 10 приведена количественная оценка отдельных вкладов в упрочнение и экспериментальные значения предела текучести сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr. Представлен расчет для образцов, обработанных по схемам: ТМО1 ($e = 2,7$ для сплава Cu-0,5Cr и сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr), ТМО2 ($e = 3,36$ для сплава Cu-0,5Cr, $e = 3,26$ для сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr), ТМО3 ($e = 12,7$ для сплава Cu-0,5Cr, $e = 6,46$ для сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr).

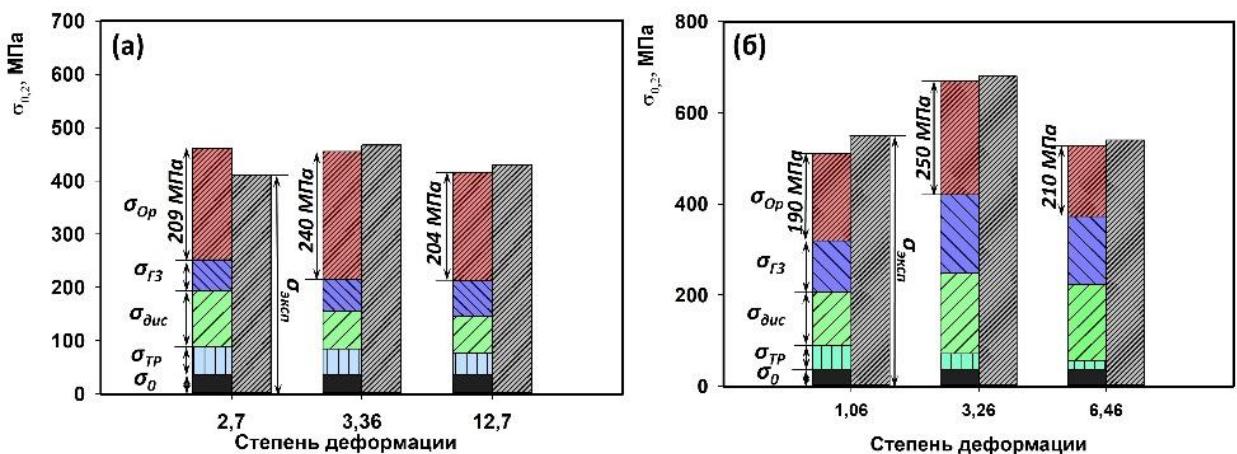


Рисунок 10 – Количественная оценка вкладов механизмов упрочнения в предел текучести сплавов Cu-0,5Cr (а) и Cu-0,5Cr-0,2Zr (б).

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что в сплаве Cu-0,5Cr формирование высокопрочного состояния определяется дисперсионным упрочнением, вклад которого является основным по сравнению с остальными вкладами и составляет

~45–55 % в зависимости от степени деформации. Данный вклад максимален после ТМО2, когда размер наночастиц составил 9 нм, а наночастицы равномерно распределены в теле зерен/субзерен, что указывает на их способность эффективно препятствовать движению дислокаций. С увеличением размера наночастиц после ТМО3 вклад дисперсионного упрочнения уменьшается и составляет 48%. Дислокационное упрочнение составляет 19...30 %. Независимо от степени деформации зернограничный вклад составляет 14...15%.

Для сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr наряду с упрочнением, связанным с наночастицами и составляющим ~29–41%, ощущимый вклад вносят дислокации (34...40%). Аналогично, как и для сплава Cu-0,5Cr, зернограничный вклад составляет 15...16% независимо от степени деформации.

В пятой главе изучено влияние ТМО 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.

Как видно из Рисунка 11, величина электропроводности не сильно зависит от степени деформации для сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr. В процессе старения происходит распад твердого раствора, в результате которого выделяются наночастицы вторых фаз и происходит их укрупнение. Параллельно с этим протекают процессы возврата в микроструктуре. Все это обеспечивает увеличение электропроводности с 35–37% IACS до 68–75% IACS для всех деформированных состояний. Следует отметить, что электропроводность с увеличением степени деформации восстанавливается значительно лучше (Рисунок 11, а). Такая же тенденция наблюдается и в сплаве Cu-0,5Cr-0,2Zr (Рисунок 11, б).

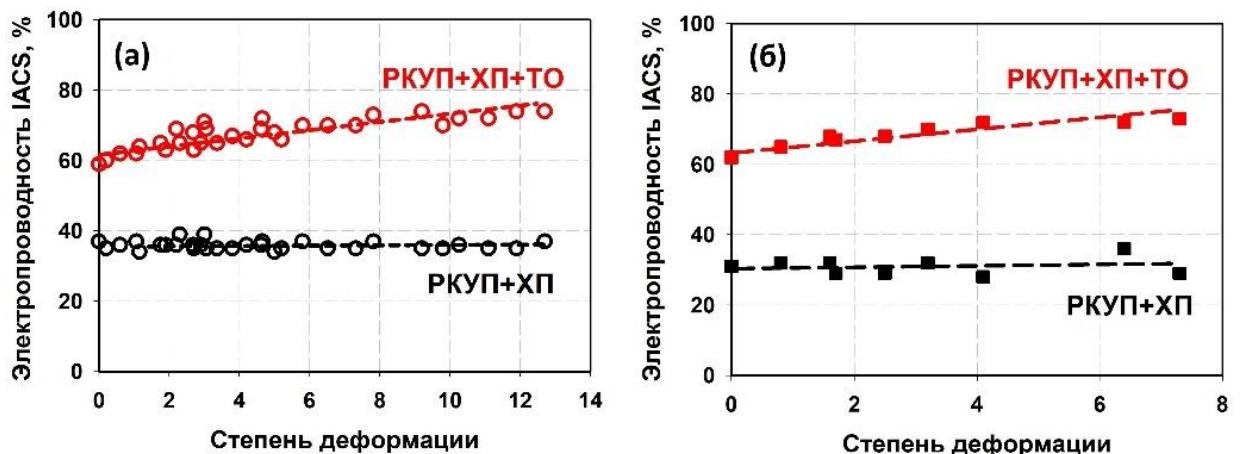


Рисунок 11 – Зависимость электропроводности от степени деформации после РКУП + ХП и последующего старения для сплавов Cu-0,5Cr (а); Cu-0,5Cr-0,2Zr (б).

Для понимания взаимосвязи между микроструктурными особенностями и комбинацией электрических свойств, был оценен вклад различных структурных параметров в удельное электрическое сопротивление. Вклады оценивались исходя из правила Маттиссена – Флемминга.

$$\rho = \rho_0 + C_{\text{вак}} \Delta \rho_{\text{вак}} + L_{\text{дис}} \Delta \rho_{\text{дис}} + S_{\text{Г3}} \Delta \rho_{\text{Г3}} + \sum_i C_{\text{TP}}^i \Delta \rho_{\text{TP}}, \quad (1)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление чистой меди. Поскольку измерения удельного электросопротивления проводили при комнатной температуре, в данной

диссертационной работе удельное электрическое сопротивление чистой Cu при комнатной температуре было принято равным $\rho_0 = 1,72 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{см}$.

$\Delta\rho_{\text{вак}}$, $\Delta\rho_{\text{дис}}$, $\Delta\rho_{\text{Г3}}$, $\Delta\rho_{\text{TP}}$ - константы, учитывающие вклад вакансий, дислокаций, границ зерен и легирующих элементов в медной матрице соответственно.

$C_{\text{вак}}$ – концентрация вакансий, $L_{\text{дис}}$ – плотность дислокаций, $S_{\text{Г3}}$ – доля границ зерен на единицу объема и C_{TP}^i – концентрация атомов растворенного i -го вещества в матрице.

Установлено, что изменение удельного электросопротивления сплава Cu-0,5Cr контролируется обеднением твердого раствора атомами легирующих элементов. Доминирование данного механизма настолько сильное, что превышает суммарный вклад дислокационного ($\rho_{\text{дис}}$) и зернограничного ($\rho_{\text{Г3}}$) вкладов (Рисунок 12).

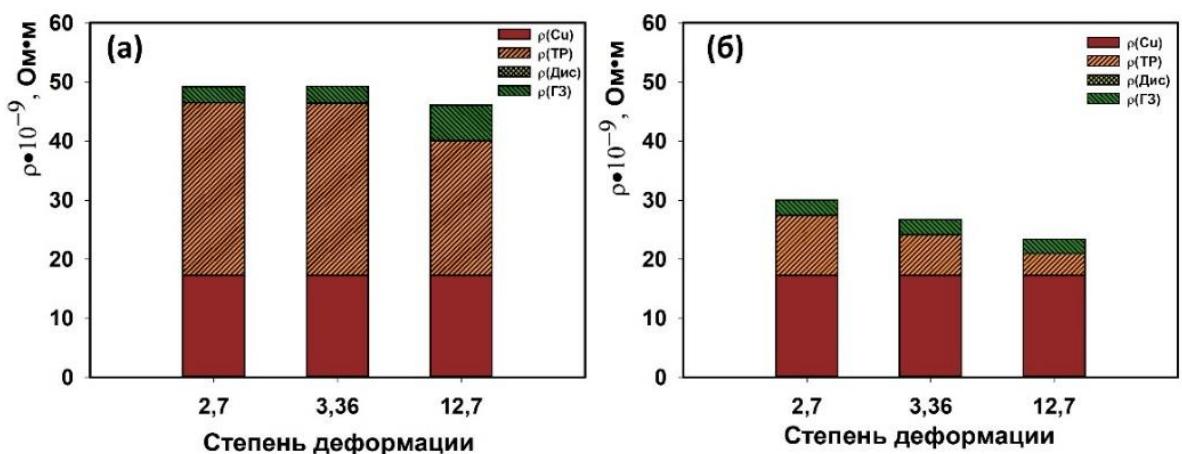


Рисунок 12 – Вклады различных параметров в электросопротивление сплава Cu-0,5Cr после: а) РКУП+ХП; б) РКУП+ХП+ТО

Следовательно, количество выделившейся второй фазы существенно влияет на проводимость. Как известно, предварительная деформация может существенно повлиять на кинетику распада твердого раствора, так как атомы легирующих элементов, растворенные в решётке медной матрицы, при взаимодействии с дефектами, внесёнными в процессе ТМО, могут значительно изменить характер выделений частиц второй фазы. Следовательно, для контроля свойств сплавов необходимо контролировать кинетику распада пересыщенного твердого раствора.

Кинетику распада пересыщенного твердого раствора обычно оценивают путем расчета энергии активации, которая характеризует процесс диффузии и имеет тем большее значение, чем сильнее атом связан со своим местом в решётке. Наиболее известным и применимым соотношением для описания процесса фазового превращения является уравнение Джонсона-Меля-Аврами-Колмогорова, которое используется для описания кинетики фазового превращения (оценки объемной доли), особенно диффузионно-контролируемых процессов:

$$f = 1 - \exp(-kt^n), \quad (2)$$

где f – объемная доля превращенной фазы,

t – время старения,

k – постоянная отвечающая за скорость превращения,

n – константа.

На основании известной зависимости Матиссена, связывающей электрическую проводимость с долей распада твердого раствора, можно определить объемную долю выделившейся второй фазы:

$$f = \frac{\sigma_i - \sigma_0}{\sigma_\infty - \sigma_0}, \quad (3)$$

где σ_i – проводимость после старения в течение времени t ,

σ_0, σ_∞ – проводимость до и после протекания фазового превращения.

На основании уравнений (2),

(3) построены кинетические кривые фазового превращения, показанные на Рисунке 13. Увеличение степени деформации приводит к аномальному ускорению распада твердого раствора. Следовательно, увеличивается скорость зародышеобразования и растет доля второй фазы. С увеличением продолжительности времени старения и приближении к равновесному значению концентрации легирующих элементов в медной матрице скорость распада твердого раствора постепенно снижается.

Поскольку выделение второй фазы является диффузионным процессом, который требует энергетических затрат и связан с преодолением потенциального барьера, энергия активации является ключевым параметром для расчета скорости выделения частиц второй фазы.

Энергия активации может быть рассчитана с помощью уравнения Аррениуса (4):

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (4)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, не зависящий от температуры,

E_a – энергия активации распада твердого раствора,

T – температура старения,

R – универсальная газовая постоянная ($R=8,31 \text{Дж/мольК}$).

Прологарифмировав уравнение (4), построена зависимость $\lg k$ от $1/T$, представленная на Рисунке 14.

Энергия активации E_a выделения частиц из медной матрицы определена путем вычисления угла наклона линии на кинетических диаграммах (Рисунок 14) в зависимости от температуры. Полученные результаты показали, что энергия, необходимая для зарождения и роста частиц, в состоянии ХП95 ($e = 3,6$) составила 67 кДж/моль, в то время как для состояния РКУП8+ХП95 ($e = 12,7$) – 20 кДж/моль. Следовательно, увеличение степени деформации,

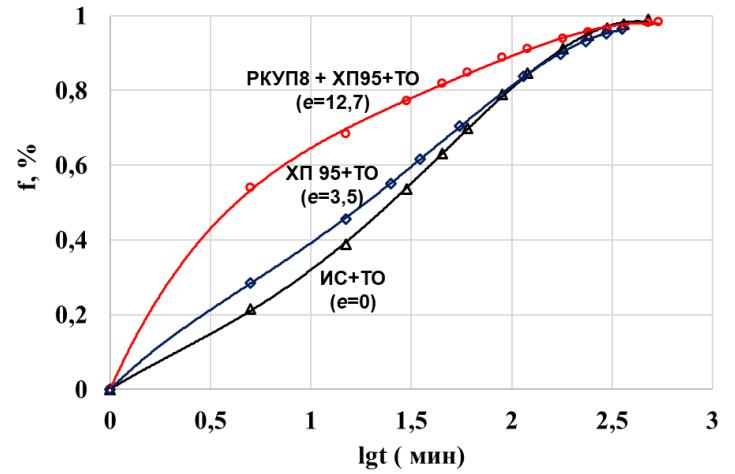


Рисунок 13 – Кинетические кривые фазового превращения в сплаве Cu-0,5Cr при старении

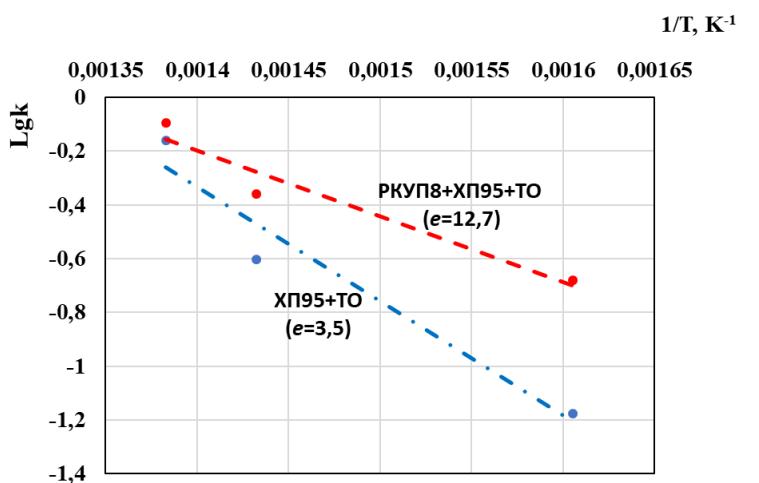


Рисунок 14 – Графики зависимости $\lg k$ в от $1/T$ в соответствии с уравнением Аррениуса

которое сопровождается предварительным формированием УМЗ микроструктуры, приводит к снижению энергии активации выделения и роста частиц второй фазы.

Это свидетельствует о том, что процесс выпадения частиц становится более эффективным за счет ускорения диффузионных процессов, что хорошо объясняет повышенные значения электропроводности после проведения старения сплава в состоянии с большими степенями приложенной деформации.

Основные результаты и выводы

1. В результате проведённых исследований и анализа эволюции микроструктуры сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr было установлено, что добавка циркония не оказывает существенного влияния на общую тенденцию формирования микроструктуры. Микроструктурные особенности в обеих системах развивались сходным образом. В результате ТМО, включающей в себя ХП ($e < 3,5$) и старение, РКУП+ХП ($1,8 < e < 5$) и старение, РКУП+ХП ($e > 5$) и старение, сформированы три типа структурных состояний в сплавах Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr. Основными признаками «крупнозернистого холоднокатаного» состояния являются средний размер зерна/субзерна в диапазоне 400–450 нм, высокая доля МУГ (88%) и наноразмерные частицы, распределенные равномерно как в теле, так и по границам зерен/субзерен. В случае «смешанного холоднокатаного» состояния в микроструктуре преобладают зерна/субзерна со средним размером около 350–400 нм, долей ВУГ (27%) и наноразмерными частицами вторых фаз ($d_{cp} = 6\text{--}10$ нм), сосредоточенными преимущественно в теле зерна. «УМЗ холоднокатаное» состояние характеризуется средним размером зерна 250–350 нм, высокой долей ВУГ (57%) и наночастицами ($d_{cp} = 9\text{--}11$ нм), распределенными преимущественно по границам зерен.

2. Разработана феноменологическая модель, позволяющая объяснить механизмы формирования каждого из трех указанных состояний. Модель позволяет понимать физические процессы, происходящие в материалах в результате ТМО обработок, и предсказывать свойства материала на основе сформированной структуры. Это дает возможность в дальнейшем подбирать более эффективный режим ТМО для достижения заданного уровня свойств материала.

3. Степени деформации от 3 до 5, обеспечивают рациональное сочетание прочности и электропроводности в листах и лентах, изготовленных из дисперсионно твердеющих сплавов Cu-0,5Cr ($\sigma_B = 500 \pm 15$ МПа, $\delta = 15 \pm 1\%$, 75 ± 2 IACS) и в сплаве Cu-0,5Cr-0,2Zr ($\sigma_B = 700 \pm 10$ МПа, $\delta = 18 \pm 2\%$, 73 ± 2 IACS). Показано, что достижение рационального комплекса свойств обусловлено реализаций дисперсионного упрочнения от наноразмерных частиц вторых фаз, реализованного как в ходе РКУП+ХП, так и последующего старения.

4. Установлено, что сочетание РКУП и ХП играет существенное влияние на распад пересыщенного твердого раствора. Уменьшение размера зерен/субзерен и увеличение доли ВУГ способствуют дислокационной перестройке и аннигиляцией дислокаций. Это приводит к ускорению диффузионных процессов и снижению энергии активации выделения и роста наночастиц Cr ($E_a=20,3$ кДж/моль). В результате отмечается аномальное ускорение распада пересыщенного твердого раствора, что способствует более быстрому восстановлению электропроводности.

Статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо в научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

1. Sarkeeva, E.A. Elevated tribological characteristics of ultrafine grained conductive Cu-0.5Cr-0.2Zr alloy / E.A. Sarkeeva, M.M. Abramova, R.A. Oreshkina, V.D. Situdikov, K.X. Wei, W. Wei, F.F. Musin, I.V. Alexandrov // Materials physics and mechanics – 2015. – Vol. 24, Issue 3. – P. 211-217. (K2: Web of Science Q4)
2. Саркеева, Е.А. Эволюция микроструктуры, прочности, пластичности и электропроводности в ультрамелкозернистом сплаве Cu-0,5Cr при холодной прокатке и старении / Е.А. Саркеева, И.В. Александров // «Известия Российской академии наук. Серия физическая». – 2022. – Т. 86. № 11. – С. 1553-1559. (K3)
3. Саркеева Е.А. Влияние старения на микроструктуру и свойства УМЗ сплава Cu-0,5Cr, полученного равноканальным угловым прессованием и холодной прокаткой / Е.А. Саркеева, И.В. Александров // Materials. Technologies. Design. – 2024. – Т. 6. № 2 (17). – С. 92-98. (BAK, 2.6.6)
4. Саркеева Е.А. Высокие прочность, электропроводность и термостабильность наноструктурного сплава Cu-0,5Cr-0,2Zr, полученного равноканальным угловым прессованием, холодной прокаткой и старением / Е.А. Саркеева, И.В. Александров // Materials. Technologies. Design. – 2024. – Т. 6. – № 3 (18). – С. 83-91. (BAK, 2.6.6).
5. Sarkeeva, E.A. Microstructure Evolution in a Cu-0.5Cr-0.2Zr Alloy Subjected to Equal Channel Angular Pressing, Rolling or Aging / E.A. Sarkeeva, I.V. Alexandrov, V.D. Situdikov, M.M. Abramova, // Journal of materials engineering and performance. – 2016. – Vol. 25, Issue 10. – P. 4303-4309. (K1: Web of Science Q2)
6. Sarkeeva, E.A. Thermal stability of microstructure and properties of Cu-0.5Cr-0.2Zr alloy subjected to ECAP and cold rolling / E.A. Sarkeeva, M.M. Abramova, W. Wei // Defect and Diffusion Forum. – 2018. – Vol. 385. – P. 278-283. (K2: Scopus Q3)
7. Sarkeeva, E.A. Influence of temperature of severe plastic deformation and aging on microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of the Cu-Cr-Zr alloy / E.A. Sarkeeva, M.M. Abramova, I.V. Alexandrov // Defect and Diffusion Forum. – 2018. – Vol. 385. – P. 273-277. (K2: Scopus Q3)

Другие публикации по теме диссертации

8. Sarkeeva, E.A. Effect of cold rolling on microstructure and mechanical properties of Cu-0,5%Cr-0,2%Zr subjected to ECAP with various numbers of passes / M.M. Abramova, E.A. Sarkeeva, W. Wei // MATEC Web of Conferences – 2017. – Vol.129. – 02031.
9. Sarkeeva, E.A. Formation of a state with high strength and electrical conductivity in the Cu-0.5%Cr-0.2%Zr alloy / E.A. Sarkeeva, M.M. Abramova, W. Wei // MATEC Web of Conferences –2017. – Vol. 129.– 02030.
10. Sarkeeva, E.A. The effect of Cr and Zr content on the microstructure and properties of the Cu-Cr-Zr system alloy / E. A. Sarkeeva; V.D. Situdikov, G. I. Raab, W. Wei, I.V. Alexandrov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 447. – 012065. (Scopus).
11. Sarkeeva, E.A. Effect of cold rolling on the structure and properties of the UFG Cu-0.5wt%Cr alloy / E.A. Sarkeeva, G.I. Raab, W. Wei, I.V. Alexandrov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 672. – 012056. (Scopus).
12. Sarkeeva, E.A. Contribution of structural factors to the specific electrical resistance of nanostructured Cu-Cr-Zr alloy / R.G. Chembarisova, E.A. Sarkeeva, I.V. Alexandrov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 672. – 012023. (Scopus).

13. Sarkeeva, E.A. Analysis of the effect of equal-channel angular pressing on the strength and electrical conductivity of low-alloyed alloys of the Cu-Cr-Zr system / R.G. Chembarisova, E.A. Sarkeeva, I.V. Alexandrov, W. Wei // Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – Vol.1431(1). – 012065. (Scopus).
14. Sarkeeva, E.A. Effect of cold rolling on the structure and properties of the UFG Cu-0.5wt%Cr alloy / E A Sarkeeva, G I Raab, W Wei, I V Alexandrov // The Sixth International Symposium «BULK NANOMATERIALS: from fundamentals to innovations. BNM-2019» Уфа, Россия, 2019. P. 83
15. Sarkeeva, E.A. Microstructure, high strength and electrical conductivity of the UFG Cu-0.5%Cr-0.2%Zr alloy processed by HPT / I.V. Alexandrov, W. Wei, E. A. Sarkeeva, V. Situdikov // 20th International Metallurgy and Materials Congress: congress proceedings e-book. – Turkey, 2020. – P. 669.
16. Sarkeeva, E.A. Thermal stability of microstructure and properties of Cu-0.5Cr-0.2Zr alloy subject to plastic deformation in combination with cold rolling, Sarkeeva E., Abramova M., Wei We., В книге: 13th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials ICSAM 2018. Abstracts. Editors by R. Kaibyshev, M. Tikhonova, A. Dolzhenko. – 2018. – P. 84_1.
17. Саркеева Е.А. Повышенные свойства сплава Cu-0,5CR, подвергнутого РКУП, прокатке и старению / З. Р. Эмиралиева, Е. А. Саркеева // Мавлютовские чтения : материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции, Уфа, 25–27 октября 2022 года. Том 2. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 413-418.
18. Саркеева, Е.А. Повышенные функциональные свойства дисперсионнотвердеющего медного сплава Cu-0,5Cr подвергнутого интенсивной пластической деформации и холодной прокатке / Саркеева Е.А., Александров И.В. // В сборнике: UUST Nanomaterials Days. Сборник материалов Международной конференции, посвященной 75-летнему юбилею Заслуженного деятеля науки РФ, профессора, доктора физико-математических наук Валиева Руслана Зуфаровича. – Уфа, 2024. – С. 61.

Соискатель



Саркеева Е.А.