

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Уфимский
университет науки и технологий»

д.ф.-м.н., доцент



И.Ф. Шарафуллин

2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Диссертация «Повышенные функциональные свойства холоднокатаных наноструктурных дисперсионно-твердеющих медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr» выполнена на кафедре материаловедения и физики металлов института технологий и материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Саркеева Елена Александровна работала старшим преподавателем кафедры материаловедения и физики металлов института технологий и материалов ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В 2006 г. окончила ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по специальности 150702 - Физика металлов.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по истории и философии науки и иностранному языку, справка о сданном экзамене по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки) выданы в 2023 г. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Александров Игорь Васильевич, заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и физики металлов института технологий и материалов ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Саркеевой Е.А. «Повышенные функциональные свойства холоднокатаных наноструктурных дисперсионно–твердеющих медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr» является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 N 842 (ред. от 25.01.2024). Работа посвящена изучению закономерностей формирования наноструктурных состояний в дисперсионно–твердеющих медных сплавах Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr в процессе термомеханической обработки (ТМО), включающей равноканальное угловое прессование (РКУП), холодную прокатку (ХП) и старение (ТО). На основе анализа полученных экспериментальных данных предложена феноменологическая модель, которая может быть использована для прогнозирования получаемой структуры изделий из медных сплавов с регламентированным уровнем физико-механических свойств. Таким образом, решена научная задача достижения повышенных физико-механических свойств в тонких лентах из сплавов Cu-0,5Cr и Cu-0,5Cr-0,2Zr, и имеющая значение для развития нанотехнологий и объемных наноматериалов.

Все основные результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии:

1. Закономерности формирования наноструктурных состояний в сплавах Cu-0,5Cr, 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.

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

В работах, опубликованных соискателем, приведены следующие результаты, полученные самим соискателем:

В работах [1 – 3, 5, 6, 8, 12, 16, 18] продемонстрирована возможность достижения высокой прочности при достаточной электропроводности сплавов системы Cu-Cr, Cu-Cr-Zr в результате формирования наноструктурного (НС) состояния с использованием комбинации равноканального углового прессования, холодной прокатки и старения.

В работе [4] представлены результаты исследований процесса распада твердого раствора хрома в меди. Построены и проанализированы кривые фазовых превращений.

В работах [4, 5, 7, 8, 17] изучено влияние старения на электропроводность, механические свойства и микроструктуру сплавов Cu-Cr, Cu-Cr-Zr.

В работе [11] исследовано влияние различного содержания Cr и Zr на микроструктуру и свойства сплавов системы Cu-Cr-Zr.

В работах [10, 13, 14] проанализировано влияние различных структурных параметров сплава на уровень прочностных свойств, а также электропроводность в состояниях РКУП, РКУП+ХП и РКУП+ХП+ТО сплавов систем Cu-Cr, Cu-Cr-Zr.

В работе [18] представлена феноменологическая модель формирования наноструктуры в процессе термомеханической обработки, включающей равноканальное угловое прессование, холодную прокатку и старение.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Автор принимал непосредственное личное участие в обсуждении и постановке задач, обзоре известных литературных данных, получении и анализе основных результатов диссертационной работы. Статьи опубликованы совместно с научным руководителем и другими соавторами научного коллектива.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы определяется корректностью постановки задач, 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.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. Установлены закономерности формирования наноструктурных состояний в образцах, подвергнутых РКУП, холодной прокатке и старению, *отличающиеся тем, что* при увеличении степени деформации РКУП последующая ХП приводит 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 размер.

2. Предложена и обоснована феноменологическая модель формирования наноструктуры в процессе холодной прокатки и последующего старения. Модель *отличается тем, что* учитывает характер сформированной дислокационной субструктуры 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 $18 \pm 2\%$, электропроводности $73 \pm 2\%$ 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 заключается в следующем:

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

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, Cu-0,5Cr-0,2Zr, является достижение в образце накопленной деформации от 3 до 5 перед последующим старением.

Определены режимы РКУП, холодной прокатки и последующего старения дисперсионно-твердеющих сплавов системы Cu-Cr и Cu-Cr-Zr, обеспечивающие возможность получения лент с повышенными физико-механическими свойствами в сплаве Cu-0,5Cr ($\sigma_B = 500 \pm 15$ МПа, $\delta = 15 \pm 1\%$, $75 \pm 2\%$ IACS) и в сплаве Cu-0,5Cr-0,2Zr ($\sigma_B = 700 \pm 10$ МПа, $\delta = 18 \pm 2\%$, $73 \pm 2\%$ 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.

Ценность научной работы заключается в том, что в результате выполненных исследований:

Предложена модель, отражающая взаимосвязь полученной в результате ТМО структуры и морфологии выделившихся наноразмерных частиц. Данная модель

позволила понять физические процессы, происходящие в исследованных материалах в результате ТМО и предсказывать свойства на основе сформированной структуры. Это дает возможность в дальнейшем подбирать более эффективные режимы ТМО для достижения заданного уровня свойств материалов.

Обоснование выбранной специальности и отрасли науки диссертации

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.6.6. «Нанотехнологии и наноматериалы», при этом работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

п. 1. «Методы получения наноматериалов, композитных структур, структур пониженной размерности, приборов и интегральных устройств на их основе».

п. 2. «Структурные, морфологические и механические свойства наноматериалов и композитных структур на их основе».

Отрасль науки – физико-математические науки, поскольку приведенные результаты исследований представляют собой научные сведения о закономерности формирования наноструктурных состояний и свойств дисперсионно-твердеющих сплавов системы Cu-Cr, Cu-Cr-Zr, кинетике зарождения и роста наноразмерных частиц вторых фаз в процессе термомеханической обработки, включающей раноканальное угловое прессование, холодную прокатку и старение. Предложена феноменологическая модель формирования наноструктуры, учитывающая кинетику распада твердого раствора с выделением наноразмерных частиц вторых фаз и регламентированное распределение дислокаций, что обеспечивает достижение рационального комплекса свойств.

Полнота изложения материалов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 научных изданиях, в том числе 2 статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки), 6 статей в ведущих зарубежных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 10 статей опубликовано в сборниках трудов научных конференций.

Общий объем публикаций – 5,94 п.л., авторский вклад – 3,1 п.л.

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. Sitdikov, 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) (Уровень в белом списке - K3, МБД – Q3)
3. Evolution of the microstructure, strength, plasticity, and electric conductivity of ultrafine-grained cu–0.5cr alloy after cold rolling and aging / Sarkeeva E.A., Alexandrov I.V. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – Т. 86. – № 11. – С. 1286-1291. (K2: Scopus Q3) (Уровень в белом списке - K3, МБД – Q4)
4. 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. (2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы – Перечень рецензируемых научных изданий)
5. 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. (2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы – Перечень рецензируемых научных изданий).
6. 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. Sitdikov, M.M. Abramova, // Journal of materials engineering and

performance. – 2016. – Vol. 25, Issue 10. – P. 4303-4309. (K1: Web of Science Q2) (Белом списке K2, МБД – Q2))

7. 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)

8. 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

9. 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.

10. 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.

11. 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. Sitdikov, G. I. Raab, W. Wei, I.V. Alexandrov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 447. – 012065.

12. 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).

13. 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.

14. 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.

15. 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

16. 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. Sitdikov // 20th International Metallurgy and Materials Congress: congress proceedings e-book. – Turkey, 2020. – P. 669.

17. Sarkeeva, E.A. Thermal stability of microstructure and properties of Cu-0.5Cr-0.2Zr alloy subject sever 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.

18. Саркеева, Е.А. Повышенные функциональные свойства дисперсионно-твердеющего 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-летию юбилею Заслуженного деятеля науки РФ, профессора, доктора физико-математических наук Валиева Руслана Зуфаровича. Уфа, 2024. С. 61.

Диссертация Саркеевой Елены Александровны соответствует п. 14 Положения о порядке присуждении ученых степеней:

- отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации;

- соискатель ссылается на авторов и источники заимствования.

Диссертация «Повышенные функциональные свойства холоднокатаных наноструктурных дисперсионно-твердеющих медных сплавов систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr» Саркеевой Елены Александровны рекомендуется к защите на

соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.6.6. «Нанотехнологии и наноматериалы» (отрасль науки – физико-математические).

Заключение принято на расширенном заседании кафедры материаловедения и физики металлов ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Присутствовало на заседании 46 человек, в том числе 11 докторов наук.

Результаты голосования: «за» – 46 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Протокол № 10 от «20» февраля 2025 г.

Д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой МиФМ

 Е.В. Парфенов

