

**УТВЕРЖДАЮ**

Руководитель Федерального  
государственного бюджетного  
научного учреждения Уфимского  
федерального исследовательского  
центра Российской академии наук,  
доктор биологических наук

Мартыненко Василий Борисович



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
Уфимского федерального исследовательского центра Российской  
академии наук

**Диссертация** «Немонотонное изменение структуры и физико-  
механических свойств при кручении под высоким давлением сплава Cu-0,6Cr-  
0,1Zr» выполнена в лаборатории физики твердого тела Института физики  
молекул и кристаллов – обособленного структурного подразделения  
Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского  
федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИФМК  
УФИЦ РАН) Министерства науки и высшего образования Российской  
Федерации.

**В период подготовки диссертации соискатель Аксенов Денис**  
Алексеевич обучался в аспирантуре по основной профессиональной  
образовательной программе послевузовского профессионального образования  
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и работал  
младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Институте физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук.

**В 2008г. окончил ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по специальности «Физика металлов».**

**В 2015 году окончил аспирантуру ФГБУН «Институт физики молекул и кристаллов» Уфимского научного центра Российской академии наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.**

**Удостоверение о сданных кандидатских экзаменах** по истории и философии науки (отрасль науки физико-математические) и иностранному языку и справка о сданном кандидатском экзамене по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (отрасль науки физико-математические) выданы в 2025 г. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Научный руководитель** – кандидат физико-математических наук Фаизова Светлана Никитична, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Диссертация Аксенова Д.А. «Немонотонное изменение структуры и физико-механических свойств при кручении под высоким давлением сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr» является законченной научно-квалифицированной работой высокого научного уровня, соответствующей п.9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 16.10.2024). Работа посвящена установлению закономерностей структурно-фазовых превращений и формирования комплекса физико-механических свойств, при наноструктурировании путем КВД сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в исходно состаренном состоянии с ансамблем крупных частиц вторых фаз.

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

-экспериментальные доказательства немонотонного изменения концентрации пересыщенного твердого раствора в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr с исходным ансамблем крупных частиц вторых фаз при наноструктурировании методом КВД и изменения характеристик первичного ансамбля частиц вторых фаз, полученные с помощью методики угольных экстракционных реплик и просвечивающей электронной микроскопии, вихревокового метода измерения электропроводности и рентгеноструктурного метода;

-зависимость структурно-фазовых превращений и формирования комплекса физико-механических свойств, при наноструктурировании путем КВД сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в исходно состаренном состоянии с ансамблем крупных частиц вторых фаз;

-экспериментальные доказательства влияния интенсивной пластической деформации на морфологию и размеры частиц вторых фаз, что приводит к изменению кинетики фазовых превращений в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr с исходным ансамблем крупных частиц вторых фаз при КВД;

-феноменологическая модель фазовых превращений, происходящих в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr с исходным ансамблем крупных частиц вторых фаз при КВД.

В основных работах, приведенных в автореферате, соискателем лично получены следующие результаты:

В работе [1, 8] установлено влияние исходного состояния структуры сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr на изменение структуры и физико-механических свойств в процессе КВД.

В работах [2-4] –подтверждено немонотонное изменение структурных характеристик и параметров и физико-механических свойств в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr с исходным ансамблем крупных частиц вторых фаз при наноструктурировании методом КВД. В работе [2] приведены расчеты вкладов структурных механизмов в результирующую прочность сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr.

В работах [3, 5-7] –установлено влияние интенсивной пластической деформации как отдельного фактора на размеры и морфологию частиц вторых фаз.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 3 – [1-4, 8], по главе 4 – [3, 5-7]. 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 членами научного коллектива, а также с коллегами из ведущих отечественных и зарубежных научных центров.

**Достоверность научных результатов и выводов** представленных в данной диссертационной работе подтверждается использованием комплекса современных апробированных и сертифицированных методов исследований, таких как оптическая и электронная микроскопия, методика угольных экстракционных реплик, механические испытания на растяжение и измерение микротвердости, интерпретацией экспериментальных данных на основе известных теоретических представлений и определением погрешностей измерений, воспроизводимостью и согласованностью результатов. Достоверность и надежность полученных результатов работы подтверждается публикацией основных результатов в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ и международную базу данных Scopus, представлением и обсуждением полученных результатов и выводов на профильных Всероссийских и Международных конференциях.

**Научная новизна исследований заключается в следующем:**

1. Установлено, что трансформация структуры сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr, имеющем в исходном состоянии ансамбль крупных частиц и низкую концентрацию ТР имеет стадийный характер. На первой стадии при нарастании накопленной степени деформации до  $e \approx 70$  происходит преимущественно механическое измельчение исходных частиц вторых фаз. На второй стадии при

дальнейшем росте накопленной степени деформации до  $e \approx 110$  происходит преимущественно растворение частиц вторых фаз с формированием пересыщенного твердого раствора. На третьей стадии при  $e > 125$  происходит динамическое старение с распадом пересыщенного твердого раствора.

2. Установлена зависимость электропроводности и механических характеристик в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr от накопленной степени деформации при КВД, отличающаяся от ранее опубликованных работ тем, что изменение данных характеристик в процессе КВД происходит немонотонно и определяется обнаруженными закономерностями структурно-фазовых превращений частиц вторых фаз.

3. Разработана феноменологическая модель структурно-фазовых превращений в сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr, объясняющая их немонотонное изменение в процессе КВД для исходно состаренного состояния с ансамблем крупных частиц.

**Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:**

Результаты настоящей работы важны для более глубокого понимания общих принципов структурно-фазовых превращений, происходящих в дисперсионно-упрочняемых сплавах в условиях интенсивной пластической деформации (ИПД). Понимание того, что ИПД является отдельным фактором, влияющим на кинетику фазовых превращений и установление зависимостей структурно-фазовых изменений с изменениями эксплуатационных свойств, позволит рационализировать процесс разработки режимов обработки металлов и сплавов высокопроизводительными деформационными методами, основанными на принципах ИПД, такими, например, как асимметричная прокатка или волочение со сдвигом.

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

Установлены зависимости и предложена феноменологическая модель структурно-фазовых изменений в промышленном низколегированном медном

сплаве Cu-0,6Cr-0,1Zr в условиях интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением. Полученные результаты могут быть использованы для решения прикладных задач по разработке рациональных режимов деформационной обработки дисперсно-упрочняемых сплавов высокопроизводительными методами, основанными на принципах ИПД.

### **Обоснование выбранных специальностей и отрасли науки диссертации**

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки) и следующим пунктам направлений исследований:

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

п.9 «Моделирование свойств, физических явлений и технологических процессов в наноматериалах и композитных структурах».

**Отрасль науки** – физико-математические, поскольку приведенные результаты исследований представляют собой научные сведения о структурно-фазовых превращениях и изменении физико-механических свойств низколегированного дисперсионно-упрочняемого сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в состоянии как пересыщенного твердого раствора, так и с низкой концентрацией твердого раствора с ансамблем крупных частиц вторых фаз, подвергнутого кручению под высоким давлением. В работе установлено влияние интенсивной пластической деформации на морфологию частиц вторых фаз и установлена феноменологическая модель, которая объясняет немонотонное изменение концентрации твердого раствора, фазовых превращений частиц вторых фаз и физико-механических свойств сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr в процессе кручения под высоким давлением.

**Полнота изложения материалов диссертации** публикацией 8 научных работ, в том числе 6 из которых опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 2 в журналах из перечня наукометрической базы данных SCOPUS.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором, достаточная.

***Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:***

1. **Аксенов Д.А.**, Фаизова С.Н. Влияние исходного состояния сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr на изменение структуры и свойств при кручении под высоким давлением / **Аксенов Д.А.**, Фаизова С.Н. // Materials. Technologies. Design. – 2025. – V.7. №1(20). – С.5-13. (ВАК, рекомендовано по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки))
2. **Аксенов Д.А.** Вклад механизмов упрочнения при немонотонном изменении свойств в сплаве Cu–0,6Cr–0,1Zr при кручении под высоким давлением / **Д.А. Аксенов**, С.Н. Фаизова, И.А. Фаизов // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – Т. 3. № 1 – С.23-32. (К2, ВАК, рекомендовано по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки)).
3. Faizova, S.N. Unusual kinetics of strain-induced diffusional phase transformations in Cu-Cr-Zr alloy // Faizova, S. N., **Aksenov, D. A.**, Faizov, I. A., Nazarov, K. S. // Letters on Materials. – 2021. –V. 11. No. 2. –P. 218-222. (К1, ВАК, рекомендовано по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки)).
4. Фаизов, И.А. Растворение частиц вторых фаз в низколегированном медном сплаве системы Cu-Cr-Zr при обработке методом равноканального углового прессования / И.А. Фаизов, Р.Р. Мулюков, **Д.А. Аксенов**, С.Н. Фаизова, Н.В. Землякова, K.R. Cardoso, Y. Zeng // Письма о материалах. – 2018. –Т. 8. № 1 (29). –С. 110-114. (К1 ВАК, рекомендовано по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки)).
5. Фаизов, И.А. Роль фазовых превращений в эволюции дисперсных частиц в хромовых бронзах при равноканальном угловом прессовании / И.А. Фаизов, Г.И. Рааб, С.Н. Фаизова, Н.Г. Зарипов, **Д.А. Аксенов** // Письма о материалах. – 2016. –Т. 6. № 2 (22). –С. 132-137. (К1, ВАК, рекомендовано по

специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки)).

6. Фаизова, С.Н. Физические аспекты формирования высокопрочного состояния дисперсионно-упрочняемых сплавов при интенсивной пластической деформации кручением / С.Н. Фаизова, Г.И. Рааб, Н.Г. Зарипов, **Д.А. Аксенов**, И.А. Фаизов // Физическая мезомеханика. – 2015. –Т. 18. № 4. – С. 87-93. (ВАК, Scopus Q2).

*Статьи в изданиях, входящих в научометрическую базу данных*

*Scopus:*

7. Faizov, I. Contributions of various strengthening mechanisms to the flow onset stress in the ECAP-processed Cu-Cr-Zr alloy / I. Faizov, G. Raab, **D. Aksenov** // Key Engineering Materials. –2017. –V. 743. –P. 197-202. .

8. **Aksenov, D.A.** Features of the physico-mechanical behavior of UFG low-alloyed bronze Cu-1Cr-0.08Zr produced by severe plastic deformation / **D. A. Aksenov**, R. Asfandiyarov, G. I. Raab and G. B. Isyandavletova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2017. –V.179. – 012001. doi:10.1088/1757-899X/179/1/012001.

**Диссертация Аксенова Д.А. соответствует п. 14 Положения о присуждении ученых степеней**

В диссертации отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора и (или) источник заимствования, результаты научных работ, выполненных соискателем учёной степени в соавторстве, без ссылок на соавторов. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Диссертация Аксенова Дениса Алексеевича на тему «Немонотонное изменение структуры и физико-механических свойств при кручении под высоким давлением сплава Cu-0,6Cr-0,1Zr» 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 заседании** физического семинара Института физики молекул и кристаллов – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

**Присутствовали на заседании** 23 человека, в том числе 5 докторов наук.

**Результаты голосования:** «за» – 22 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 1 чел., протокол № 279 от «14» мая 2025 г.

Руководитель семинара

ИФМК УФИЦ РАН

Зав. лабораторией

физики атомных столкновений

д.ф.-м.н., в.н.с.

Н.Л. Асфандиаров

Подпись Н.Л. Асфандиарова заверяю:

Ведущий специалист отдела кадров УФИЦ РАН

Р.К. Тимербаева

