

Investigation of the structure and properties of a laboratory sample of a Cu-Cr alloy contact wire

Исследование структуры и свойств лабораторного образца контактного провода из сплава системы Cu-Cr

J. R. Nurieva^{1a}, D. A. Aksenov², R. N. Asfandiyarov², G. I. Raab^{1,3}
Ю. Р. Нуриева^{1a}, Д. А. Аксенов², Р. Н. Асфандияров², Г. И. Рааб^{1,3}

¹ Ufa State Aviation Technical University, Karl Marx 12, Ufa, 450008, Russia

² Institute of Molecule and Crystal Physics UFRC RAS, prosp. Otyabrya 151, Ufa, 450075, Russia

³ Nosov Magnitogorsk State Technical University, prosp. Lenina 38, Magnitogorsk, 455000, Russia

^a yu.nuriewa@yandex.ru

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Карла Маркса, 12

² Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Россия, 450075, Уфа, пр. Октября, 151

³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38

^a yu.nuriewa@yandex.ru

ABSTRACT

The use of methods of severe plastic deformation (SPD), allows to increase the complex of mechanical and physical properties in low-alloy heat-resistant bronzes. In this paper, special attention was paid to deformation heating under high loads, which is an important factor for the processes of structure formation and phase transformations in Cu-Cr alloys. To study deformation heating and its effect on structure formation and phase transformations, the method of modeling in the Deform-3D environment is used in this work. A study of the peculiarities of changing the structure of a laboratory sample of a contact wire and an assessment of the contributions to hardening during ECAP-shaping and post-deformation aging has been carried out. Modeling of the ECAP process with wire shaping indicates that the workpiece is heated up to 510 °C. The strip structure in Cu-0.65Cr alloy with an average transverse fragment size of 400±18 nm obtained in the process of ECAP with shaping and subsequent aging provides a strength of 540±20 MPa and an electrical conductivity of 76% IACS.

KEYWORDS

Contact wire; strength and electrical conductivity; low-alloy Cu-Cr alloy; deformation heating.

АННОТАЦИЯ

Использование методов интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет повышать комплекс механических и физических свойств в низколегированных термоупрочняемых бронзах. В данной работе отдельное внимание уделялось деформационному разогреву в условиях высоких нагрузок, который является важным фактором для процессов структурообразования и фазовых превращений в сплавах системы Cu-Cr. Для изучения деформационного разогрева и его влияния на структурообразование и фазовые превращения в данной работе использован метод моделирования в среде Deform-3D. Проведено исследование особенностей изменения структуры лабораторного образца контактного провода и оценка вкладов в упрочнение при РКУП-формообразовании и пост-деформационном старении. Моделирование процесса равноканального углового прессования (РКУП) с формообразованием провода свидетельствует о разогреве заготовки вплоть до 510 °C. Полученная в процессе РКУП с формообразованием и последующего старения полосовая структура в сплаве Cu-0,65Cr со средним поперечным размером фрагментов 400±18 нм обеспечивает прочность в 540±20 МПа и электропроводность 76% IACS.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Контактный провод; прочность и электропроводность; низколегированный сплав Cu-Cr; деформационный разогрев.

Введение

В настоящее время развитие современных высокоскоростных (ВС) железных дорог сопровождается повышенными требованиями к материалам и условиям эксплуатации проводов [1], в связи с высокими скоростями, а также дополнительными нагрузками на провода. Поэтому современные контактные провода для ВС железных дорог производят из низколегированных термоупрочняемых бронз, обеспечивающих предел прочности провода более 500 МПа при сохранении электропроводимости на уровне 75–85% IACS [2]. При изготовлении таких проводов особое внимание надо уделять деформационному разогреву, который влияет на формирование структуры и свойств. Для получения современных контактных проводов, как наиболее эффективные, используются методы ИПД, позволяющие за счет активного измельчения структуры и деформационного стимулирования фазовых превращений повышать комплекс механических и физических свойств в низколегированных термоупрочняемых бронзах [3–7]. В свою очередь, создание таких процессов представляет определенные сложности и требует тщательного анализа технологичности используемых методов. В связи с этим данная работа направлена на изучение деформационного разогрева и его влияния на структурообразование и фазовые превращения, исследование особенностей изменения структуры лабораторного образца контактного провода, оценку вкладов в упрочнение при РКУП-формообразовании и пост-деформационном старении.

1. Метод, материал и методики исследования

В качестве материала исследования выбран электропроводный термоупрочняемый сплав Cu-0,65%Cr. Исходное состояние было получено путем выдержки при температуре 1050 °С 1 часа с последующей закалкой в воду с целью формирования пересыщенного твердого раствора хрома в медной матрице. В образце исходного состояния наблюда-

лась крупнозернистая структура со средним размером зерна 180 ± 5 мкм. Предел прочности на разрыв составил 230 ± 20 МПа, микротвердость – 760 ± 40 МПа. Электропроводность составила $30 \pm 2\%$ IACS.

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) использовали компьютерное моделирование в среде Deform-3D.

Деформация проводилась методом РКУП с формообразованием провода на установке РКУП-20 (УГАТУ). Температура матрицы составляла 450 °С, исходная температура образца также 450 °С. Скорость деформирования составляла 5 мм/с, $t = 450$ °С.

Для анализа структуры полученных образцов использовались современные методики растровой и просвечивающей электронной микроскопии (РЭМ Jeol JSM-6390, ПЭМ Jeol JEM-2100, Tescan MIRA 3 LMN с EBSD приставкой) [8].

Измерение микротвердости образцов проводили на микротвердомере Duramin-2 [9]. Механические испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 1497-84 на разрывной машине Instron 5982. Выборка – не менее 3 образцов для каждого исследуемого состояния [10].

Исследования удельной электропроводности определяли согласно ГОСТ 7229-76 с помощью вихретокового измерителя ВЭ-27НЦ, с переводом значений в стандарт IACS (International Annealed Copper Standard).

2. Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследования было проведено компьютерное моделирование, которое показало, что максимальный разогрев образца происходит в области формирования сечения провода. Температура достигает 530 °С (рис. 1, а). В сплавах системы Cu-Cr, как правило, при температурах данного уровня идет активное развитие процесса старения, что существенно влияет на характер изменения дислокационной структуры [11–13].

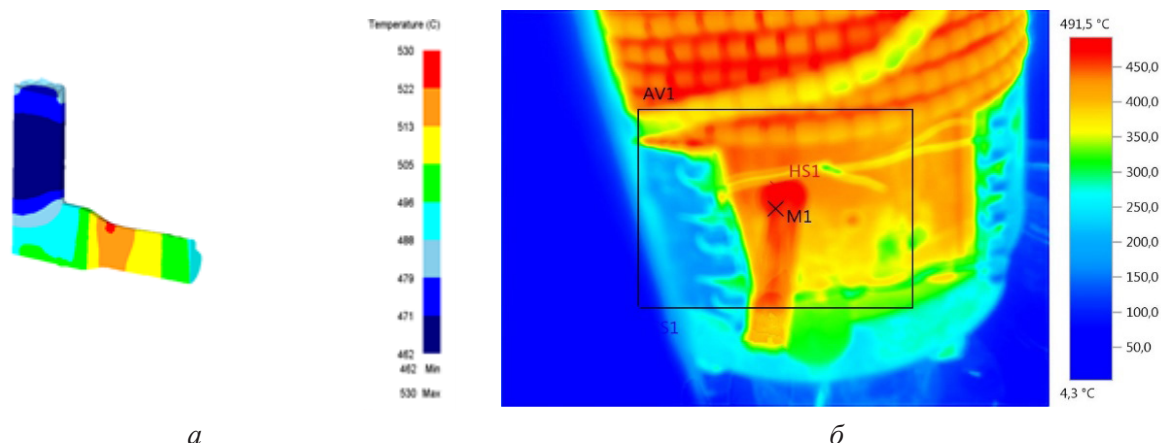


Рис. 1. Поля распределения температуры в процессе 1 цикла РКУП с формообразованием (а); результаты тепловизора Testo 872 (б)

Fig. 1. Temperature distribution fields in the process of 1 ECAP cycle with the matrix (а); Testo 872 thermal imager results (б)

После компьютерного моделирования был проведен физический эксперимент по получению лабораторного образца провода с контролем температуры образца на выходе при помощи тепловизора (Testo 872). Деформация проводилась при предварительном разогреве образца до 450 °С. Было установлено, что максимальная фиксируемая температура на выходе составляла 460 °С, что в целом коррелирует со значением компьютерного моделирования – 490 °С (рис. 1, б). В итоге был получен образец контактного провода сечением 120 мм². Для достижения повышенного комплекса свойств образец был подвержен

пост-деформационному старению при 450 °С в течении 30 минут.

На мезоуровне (РЭМ) наблюдается скопление рекристаллизованных зерен между полосами. Результаты EBSD подтверждают наличие рекристаллизованных зерен размером ~2–3 мкм (рис. 2). Характерной особенностью данного состояния является то, что рекристаллизация происходит направленно вдоль границ полос. Наличие таких зерен свидетельствует о локальном разогреве в граничных областях. Подобный вид рекристаллизации характеризуют как непрерывную [14–16].

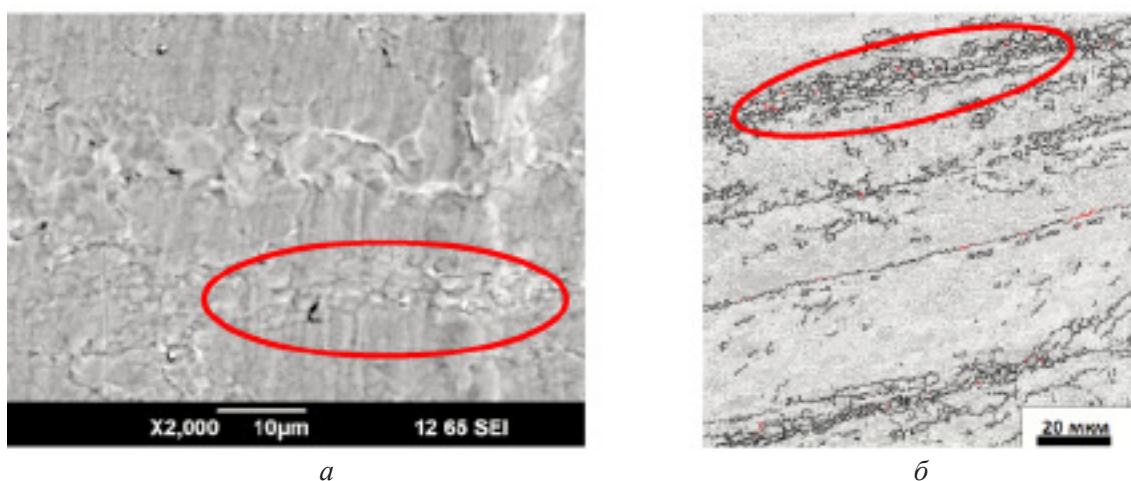


Рис. 2. Структура сплава Cu-0,65Cr: а – РЭМ; б – карта мало- (белые линии) и большеугловых (черные линии) грани; в – ориентационная карта

Fig. 2. Cu-0.65 Cr alloy structure:

а – SEM; б – map of small (white lines) and large-angle (black lines) borders; в – orientation map

На микроуровне (просвечивающая электронная микроскопия – ПЭМ) видно, что в образце сформировалась структура полового типа со средним поперечным размером структурных составляющих 410 ± 8 нм (рис. 3, а). В теле фрагментов наблюдались дисперсные частицы, закрепленные на дислокациях. Средний размер частиц составляет ~ 20 нм [17]. Предел прочности составил 470 ± 20 МПа, а электропроводность $35 \pm 2\%$. После старения происходит совершенствование границ, средний поперечный размер структурных составляющих практически не изменяется 400 ± 18 нм (рис. 3, б). В теле фраг-

ментов и по больше- и малоугловым границам наблюдаются мелкодисперсные частицы. Средний размер частиц практически не изменился и составил ~ 25 нм. Предел прочности образца провода составил 540 ± 15 МПа и электропроводность 76% IACS.

Пост-деформационная термообработка приводит к термостимулированному распаду твердого раствора, в результате которого выделяется большое количество упрочняющих частиц вторых фаз, обеспечивающих дисперсионное упрочнение. Итоговые физико-механические характеристики представлены в табл. 1.

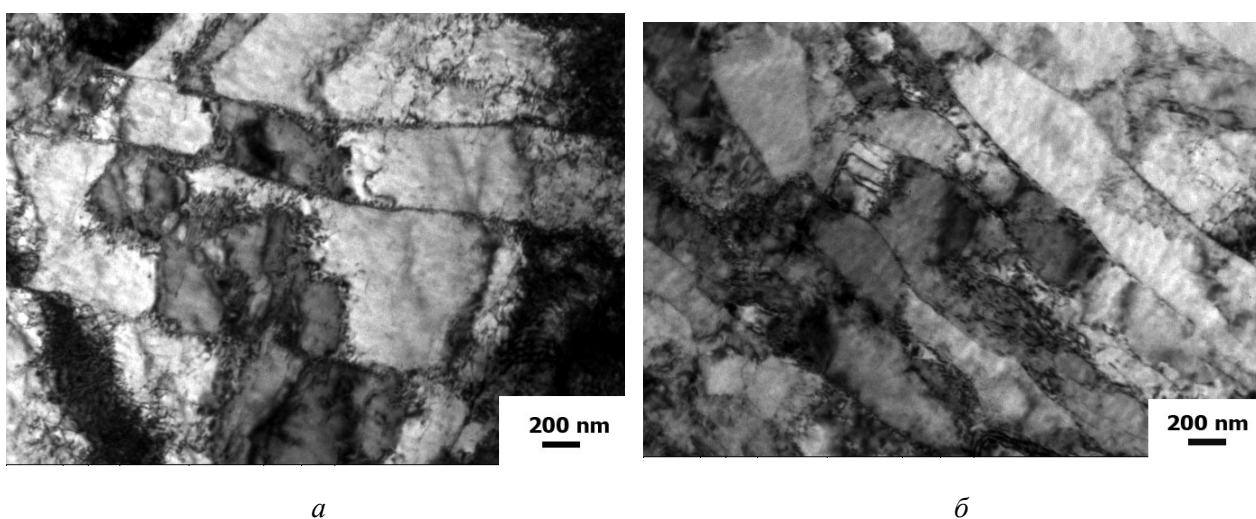


Рис. 3. Изображение микроструктуры (ПЭМ):
а – после РКУП с формованием; б – после РКУП с формованием и старения

Fig. 3. Microstructure image (TEM):
a – after the ECAP with forming; б – after the ECAP with forming and aging

Таблица 1
 Table 1

Физико-механические характеристики
Physical and mechanical properties

	HV, МПа	σ_B , МПа	Относительное удлинение, %	Электропроводность, % IACS
РКУП-формование	1120 ± 50	470 ± 20	16 ± 2	$35 \pm 2\%$
РКУП-формование + ТО	1450 ± 50	540 ± 20	20 ± 2	$76 \pm 2\%$

Выводы

1. Таким образом в ходе работы методом компьютерного моделирования установлена максимальная величина разогрева заготовки в процессе РКУП с формообразованием $-510\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. РКУП с формообразованием и пост-деформационное старение позволяет достичь значения предела прочности $540\pm 20\text{ МПа}$ и электропроводность 76% IACS за счет формирования УМЗ структуры полосового типа со средним поперечным размером фрагментов $400\pm 18\text{ нм}$ с ансамблем мелкодисперсных частиц вторых фаз размером $\sim 25\text{ нм}$.

3. Деформация методом РКУП с формообразованием при температуре заготовки и матрицы $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопровождается непрерывной рекристаллизацией, в ходе которой новые рекристаллизованные зерна размером $\sim 2-3\text{ мкм}$ располагаются по границам полос.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00432).

Авторы благодарны Центру коллективного пользования «Нанотех» при УГАТУ (Уфа, Россия) за предоставление оборудования (ТЭМ и РЭМ) для структурных исследований.

The study was carried out by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00432).

The authors are grateful to the Center of Collective Use “Nanotech” at USATU (Ufa, Russia) for providing the equipment (TEM and SEM) for structural studies.

Список литературы

1. Логинов Ю. Медь и деформируемые медные сплавы. Екатеринбург: УГТУ, 2006. 136 с.

2. ГОСТ Р 55647-2013. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия. Введ. 07.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 10 с.

3. Асфандияров Р. Н. Комбинированный процесс изготовления наноструктурных контактных проводов для высокоскоростных магистралей // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.06.08. Уфа: «ПЕЧАТНЫЙ ДОМЪ» ИП ВЕРКО, 2018. 18 с.

4. Роль фазовых превращений в эволюции дисперсных частиц в хромовых бронзах при равноканальном угловом прессовании / И. А. Фаизов [и др.] // Письма о материалах. 2016. Т. 6, № 2 (22). С. 132–137. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-2-132-137.

5. Structure and properties of ultra-fine grain Cu–Cr–Zr alloy produced by equal-channel angular pressing / A. Vinogradov et al. // Acta Materialia. 2002. V. 50, Iss. 7. P. 1639–1651. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00437-2.

6. Shan’gina D. V., Bochvar N. R., Dobatkin S. V. Structure and properties of Cu-Cr alloys subjected to shear under pressure and subsequent heating // Russian Metallurgy (Metally). 2010. V 2010, Iss. 11. P. 1046–1052. DOI: 10.1134/S0036029510110091.

7. Islamgaliev R. K., Nesterov K. N., Valiev R. Z. Structure, strength and electrical conductivity of Cu-Cr copper alloy subjected to intense plastic deformation // FMM. 2015. V. 116, No. 2. P. 209–218. DOI: 10.1134/S0031918X14090063.

8. Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.

9. Неоднородность деформации при РКУП и влияние геометрии оснастки на пластическое течение / С. Н. Фаизова [и др.] // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 1. С. 98–101.

10. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation. Moscow: Logos, 2000. 272 p.

11. Structure and properties of ultra-fine grain Cu-Cr-Zr alloy produced by equal-channel angular pressing / A. Vinogradov et al. // Acta Materialia. 2002. V. 50, Iss. 7. P. 1639–1651. DOI: 10.1016/s1359-6454(01)00437-2.

12. Microstructure and Properties of Fine Grained Cu-Cr-Zr Alloys after Thermo-Mechanical Treatments / A. Morozova et al. // *Reviews On Advanced Materials Science*. 2018. V. 54, No. 1. P. 56–92. DOI: 10.1515/rams-2018-0020.
13. Features of the physico-mechanical behavior of UFG low-alloyed bronze Cu-1Cr-0.08Zr produced by severe plastic deformation / D. A. Aksenov et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. V. 179, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/179/1/012001.
14. Humphreys F. J., Hatherly M. *Recrystallization and related annealing phenomena*. Oxford: Elsevier, 2012. P. 520.
15. Microstructure of a low alloyed Cu-Cr-Zr alloy after ECAP Conform / A. Morozova et al. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1014. Article number 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/1014/1/012029.
16. Морозова А. И., Белякова А. Н., Кайбышева Р. О. Влияние температуры деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры в термоупрочняемом Cu-Cr-Zr сплаве // *Физика металлов и металловедение*. 2021. Т. 122, № 1. С. 67–73. DOI: 10.31857/S0015323021010083.
17. Influence of the Chromium Content in Low-Alloyed Cu-Cr Alloys on the Structural Changes, Phase Transformations and Properties in Equal-Channel Angular Pressing / D. A. Aksenov et al. // *Metals*. 2021. V. 11, Iss. 11. Article number 1795. DOI: 10.3390/met11111795.