

УДК 539.531+53.092+544.032.2  
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1176-1179

## ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ БРОНЗЫ

© А.И. Морозова, А.Н. Беляков

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: morozova\_ai@bsu.edu.ru

Исследовано влияние интенсивной пластической деформации, включающей равноканальное угловое прессование при температуре 400 °С до степени деформации  $\varepsilon = 2$  и холодную прокатку до степени деформации  $\varepsilon = 0,3-1,2$ , на микроструктуру и физико-механические свойства низколегированной бронзы системы Cu-Cr-Zr. В процессе деформационной обработки в Cu-Cr-Zr бронзе происходит измельчение зерен, что приводит к увеличению твердости в соответствии с уравнением Холла-Петча и сопровождается снижением электропроводности.

*Ключевые слова:* низколегированная Cu-Cr-Zr бронза; интенсивная пластическая деформация; непрерывная динамическая рекристаллизация; уравнение Холла-Петча.

Бронзы, легированные хромом и цирконием, широко используются в электротехнике, в частности в качестве профилей для коллекторных пластин электродвигателей, требующих при эксплуатации сочетания повышенных прочностных характеристик и высокой электропроводности. Комплекс требуемых физико-механических свойств можно получить благодаря подбору легирующих элементов и оптимальной деформационно-термической обработке. Высокая электропроводность в таких материалах достигается стандартной термической обработкой (ТО), сочетающей получение пересыщенного твердого раствора и старение. Повышенные прочностные свойства получают за счет формирования в материале субмикро- и/или нанокристаллической структуры воздействием интенсивной пластической деформации (ИПД). Равноканальное угловое прессование (РКУП) на сегодняшний день считается одним из наиболее эффективных методов измельчения структуры в медных материалах [1]. Сочетание операций непрерывного РКУП с последующей холодной прокаткой может быть использовано для производства высокопроводящих коллекторных профилей с повышенными характеристиками прочности. Целью данной работы является исследование влияния холодной прокатки на физико-механические свойства низколегированной Cu-Cr-Zr бронзы, ранее подвергнутой РКУП.

В качестве материала исследования выбрана низколегированная бронза системы Cu-Cr-Zr (Cu-0,096% Cr-0,057% Zr, вес. %) после стандартной термической обработки, включающей отжиг при температуре 920 °С в течение 1 ч, закалку и старение при температуре 550 °С 4 ч. Средний размер зерен после термообработки составил  $160 \pm 10$  мкм, плотность дислокаций –  $2 \pm 0,5 \cdot 10^8$  м<sup>-2</sup>, твердость –  $105 \pm 5$  единиц твердости по Виккерсу (HV), электропроводность –  $82 \pm 3$  % от электропроводности чистой меди (IACS). Затем бронзу подвергли равноканальному угловому прессованию (РКУП) при температуре 400 °С по маршруту  $B_c$  (после каждого прохода РКУП образец поворачивали на 90°

относительно оси прокатки) до истинной степени деформации  $\varepsilon = 2$ . Следующим этапом деформационно-термической обработки была холодная прокатка (ХП) до истинной степени деформации  $\varepsilon = 0,3-1,2$ . Микроструктуру деформированной меди исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Nova NanoSEM 450, оснащенного детектором регистрации обратно-рассеянных электронов (метод EBSD). Средний размер зерен, долю большеугловых границ (БУГ – границы зерен с углом разориентировки больше 15°), плотность дислокаций рассчитывали с использованием программы для автоматической обработки данных EBSD-анализа TSL OIM Analysis 6. Измерение твердости осуществляли методом Виккерса в соответствии с ГОСТ-2999-75 с использованием установки для измерения микротвердости MVD 402. Для оценки электропроводности материала применяли 4-зондовый метод.

Микроструктура низколегированной Cu-Cr-Zr бронзы после РКУП и последующей ХП представлена на рис. 1. Деформация в ходе РКУП приводит к измельчению зеренной структуры термообработанной бронзы. Структура после 2 проходов РКУП характеризуется высокой долей малоугловых границ (МУГ) – границ с разориентировкой 2°–15° (белые линии на рис. 1). Исходные зерна вытягиваются вдоль направления последнего прохода РКУП, внутри грубых зерен значительно увеличивается плотность дислокаций до  $4 \pm 1 \cdot 10^{14}$  м<sup>-2</sup>. Дислокации формируют МУГ, угол разориентировки которых увеличивается в процессе деформации за счет притока новых дислокаций. Постепенно МУГ трансформируются в БУГ, формируя новые ультрамелкие зерна, размером меньше 1 мкм. Такое деформационное поведение материала можно классифицировать как непрерывную динамическую рекристаллизацию [2].

ХП приводит к вытягиванию исходных крупных зерен вдоль направления прокатки. Следует отметить, что с увеличением степени деформации при прокатке (рис. 1б–1г) происходит увеличение плотности боль-

шеугловых границ. Интенсивное пластическое течение проходит не только в отдельных благоприятно ориентированных зернах, а распространяется во всем объеме материала. При этом в крупных исходных зернах образуются поперечные границы с нерегулярной дислокационной структурой, их разориентировка меняется по длине границы. БУГ перемежаются сеткой МУГ, доля БУГ  $F_{БУГ}$  растет с увеличением степени деформации (рис. 2). Внутри двойников отжига формируются поперечные МУГ, которые быстро увеличивают угол разориентировки в процессе деформации и уже после ХП до степени  $\epsilon = 0,3$  двойники трансформируются в цепочки мелких динамически рекристаллизованных зерен.

Рис. 2 иллюстрирует изменение микроструктурных характеристик бронзы после прокатки. После РКУП размер зерен в продольном  $D_{пр}$  и поперечном  $D_{п}$  сечении значительно различается, смена схемы деформации способствует повышению равноосности кристаллитов. В процессе ХП происходит уменьшение среднего размера зерна  $D_{ср}$  в 2 раза (до  $7 \pm 0,4$  мкм). Отметим, что ХП не приводит к существенному изменению плотности дислокаций  $\rho$ : вне зависимости от степени деформации при ХП плотность дислокаций примерно равна  $4 \pm 1 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ .

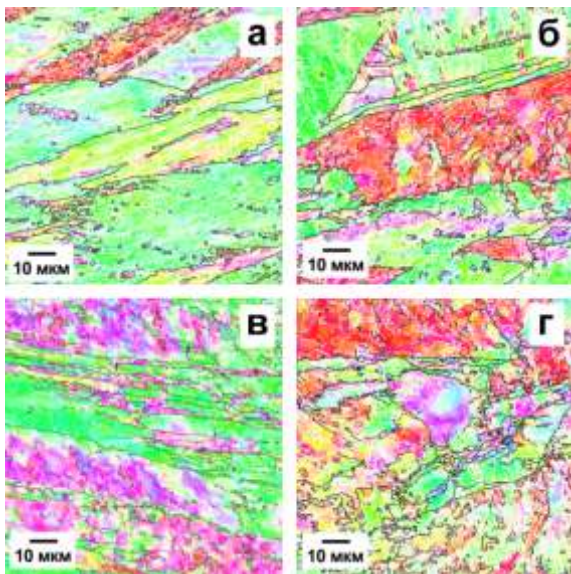


Рис. 1. Микроструктура сплава системы Cu-Cr-Zr после РКУП (а) и ХП до степени деформации 0,3 (б), 0,7 (в), 1,2 (г)

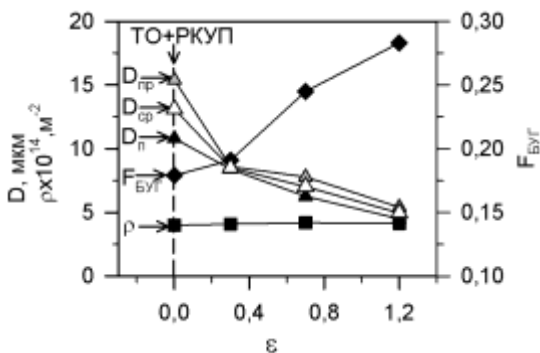


Рис. 2. Влияние степени деформации  $\epsilon$  при ХП на размер зерна  $D$ , плотность дислокаций  $\rho$  и долю большеугловых границ  $F_{БУГ}$  в низколегированной бронзе

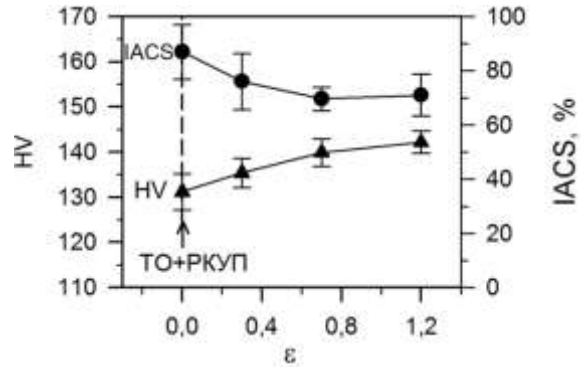


Рис. 3. Изменение твердости  $HV$  и электропроводности  $IACS$  в процессе ХП хромоциркониевой бронзы

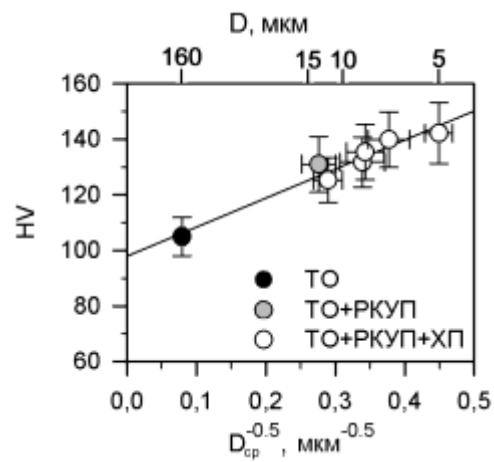


Рис. 4. Зависимость Холла-Петча для низколегированного Cu-Cr-Zr сплава

Пластическая деформация способствует повышению механических характеристик материала. РКУП приводит к росту твердости до  $131 \pm 5HV$ . Упрочнение Cu-Cr-Zr бронзы вызвано увеличением плотности дислокаций в  $10^4$  раз и уменьшением среднего размера зерна более чем в 6 раз. Последующая ХП способствует дальнейшему повышению прочностных характеристик и после истинной степени деформации  $\epsilon = 1,2$  твердость составляет  $142 \pm 3HV$  (рис. 3).

Изменение прочностных свойств с увеличением степени деформации при ХП связано со структурными преобразованиями. Рис. 2 свидетельствует о том, что плотность дислокаций не зависит от степени деформации, следовательно, повышение твердости связано с измельчением зеренной структуры Cu-Cr-Zr сплава. Известно, что механическая прочность пропорциональна квадратному корню обратного размера зерна и описывается следующим соотношением Холла-Петча [3]:

$$HV = HV_0 + \frac{k}{\sqrt{D_{ср}}},$$

где  $HV$  – твердость в единицах твердости Виккерса;  $HV_0$ ,  $k$  – константы материала и  $D_{ср}$  – средний размер зерен. Соотношение Холла-Петча для бронзы после различных видов деформационно-термической обра-

ботки представлено на рис. 3. Зависимость Холла–Петча для низколегированной Cu-Cr-Zr бронзы описывается уравнением:  $HV = 96 + \frac{118}{\sqrt{D}}$ . Коэффициент

Холла–Петча  $k = 118 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$  находится в пределах значений, характерных для большинства бронз. Повышенное значение  $HV_0 = 96 \text{ МПа}$  можно связать с высокой плотностью дислокаций, образующихся в материале в процессе интенсивной пластической деформации. Полученные данные коррелируют с работой [4], посвященной измельчению структуры в алюминиевой бронзе в процессе сварки трением с перемешиванием.

Пластическая деформация приводит к ухудшению электропроводности, величина которой зависит от количества точечных, линейных, и поверхностных дефектов, накопленных в материале (рис. 3). ХП сопровождается увеличением плотности линейных и поверхностных дефектов (дислокаций и БУГ, соответственно), на которых происходит рассеяние электронов. Таким образом, ХП сопровождается снижением электропроводности в предварительно деформированной бронзе.

**Выводы.** Интенсивная пластическая деформация при холодной прокатке, сопровождающаяся непрерывной динамической рекристаллизацией, приводит к уменьшению размера зерен до  $7\pm 0,4 \text{ мкм}$ . В соответствии с законом Холла–Петча, записанным для Cu-Cr-Zr

бронзы в виде  $HV = 96 + \frac{118}{\sqrt{D}}$ , измельчение зерен со-

провождается увеличением твердости до  $142 \text{ HV}$ . Холодная прокатка до истинной степени деформации  $\epsilon = 1,2$  приводит к снижению электропроводности, однако ее значение сохраняется на высоком уровне, приемлемом для промышленного применения, и составляет 70 % IACS.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhilyaev A.P., Shakhova I., Morozova A., Belyakov A., Kaibyshev R. Grain refinement kinetics and strengthening mechanisms in Cu-0.3Cr-0.5Zr alloy subjected to intense plastic deformation // Mater. Sci. Eng. A. 2016. V. 654. P. 131-142.
2. Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J.J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions // Prog. Mater. Sci. 2014. V. 60. P. 130-207.
3. Lu K., Sui M.L. An explanation to the abnormal Hall–Petch relation in nanocrystalline materials // Scrip. Met. Mat. 1993. V. 28. P. 1465-1470.
4. Rizi M.S., Kokabi A.H. Microstructure evolution and microhardness of friction stir welded cast aluminum bronze // J. Mat. Proc. Tech. 2014. V. 214. P. 1524-1529.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.У31.16.8446-НИИ).

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 539.531+53.092+544.032.2  
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1176-1179

### EFFECT OF COLD ROLLING ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF LOW-ALLOYED BRONZE

© A.I. Morozova, A.N. Belyakov

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation,  
e-mail: morozova\_ai@bsu.edu.ru

The effect of severe plastic deformation including the equal channel angular pressing at a temperature of  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  to a true strain of  $\epsilon = 2$  and the cold rolling to true strains of  $\epsilon = 0.3\text{--}1.2$  on the microstructure and the physical/mechanical properties of a low-alloyed Cu-Cr-Zr bronze was studied. The severe deformation was accompanied by grain refinement. The fine grain formation during severe deformation increased the hardness of the bronze in accordance with the Hall–Petch relationship, while the electroconductivity decreased.

**Key words:** low-alloyed Cu-Cr-Zr bronze; severe plastic deformation; continuous dynamic recrystallization; Hall–Petch relationship.

#### REFERENCES

1. Zhilyaev A.P., Shakhova I., Morozova A., Belyakov A., Kaibyshev R. Grain refinement kinetics and strengthening mechanisms in Cu-0.3Cr-0.5Zr alloy subjected to intense plastic deformation. *Mater. Sci. Eng. A*, 2016, vol. 654, pp. 131-142.
2. Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J.J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. *Prog. Mater. Sci.*, 2014, vol. 60, pp. 130-207.
3. Lu K., Sui M.L. An explanation to the abnormal Hall–Petch relation in nanocrystalline materials. *Scrip. Met. Mat.*, 1993, vol. 28, pp. 1465-1470.
4. Rizi M.S., Kokabi A.H. Microstructure evolution and microhardness of friction stir welded cast aluminum bronze. *J. Mat. Proc. Tech.*, 2014, vol. 214, pp. 1524-1529.

GRATITUDE: The work is fulfilled under financial support of Ministry of Education and Science of Russian Federation (agreement no. 14.Y31.16.8446-НШ).

Received 10 April 2016

Морозова Анна Игоревна, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, аспирант, кафедра материаловедения и нанотехнологий, e-mail: morozova\_ai@bsu.edu.ru

Morozova Anna Igorevna, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Post-graduate Student, Materials Science and Nanotechnology Department, e-mail: morozova\_ai@bsu.edu.ru

Беляков Андрей Николаевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения и нанотехнологий, e-mail: belyakov@bsu.edu.ru

Belyakov Andrey Nikolaevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor of Materials Science and Nanotechnology Department, e-mail: belyakov@bsu.edu.ru