

Влияние старения на микротвердость и электропроводность сплава Cu–2 вес. % Ве

© 2022

Зайнуллина Лилия Ильгизовна^{*1}, старший преподаватель кафедры материаловедения и физики металлов

*Саркеева Елена Александровна*², старший преподаватель кафедры материаловедения и физики металлов

*Александров Игорь Васильевич*³, доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры материаловедения и физики металлов

*Валиев Руслан Зуфарович*⁴, доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры материаловедения и физики металлов

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)

*E-mail: ZaynullinaLI@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6116-1535>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0357-8161>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4789-4713>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4340-4067>

Поступила в редакцию 04.05.2022

Принята к публикации 28.07.2022

Аннотация: Изделия из бериллиевых бронз получили широкое распространение в промышленности благодаря уникальному комплексу свойств: высокой теплопроводности, прочности, твердости, износостойкости, коррозионной стойкости. Они не магнитные и не дают искры при ударе, поэтому незаменимы для изготовления искробезопасных инструментов. Сплавы данной системы применяются в электротехнической промышленности, следовательно, стоит уделять внимание повышению электропроводности материалов. Работа посвящена исследованию микроструктуры, микротвердости и электропроводности сплава Cu–2 вес. % Ве, подвергнутого интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). Проведены исследования микроструктуры и тонкой структуры сплава в различных состояниях. Показано, что ИПДК приводит к формированию ультрамелкозернистого наноструктурного (УМЗ НС) состояния со средним размером зерен/субзерен 22 ± 1 нм. Дальнейшее старение образцов после ИПДК привело к незначительному увеличению размера зерен/субзерен до 31 ± 1 нм. В обоих состояниях прослеживаются наноразмерные деформационные двойники. Проведены исследования зависимости микротвердости и электропроводности сплава после ИПДК от времени последующего старения. Установлено, что микротвердость возрастает с 122 ± 3 HV в исходном состоянии до 525 ± 8 HV после ИПДК и старения. Показано, что электропроводность значительно лучше восстанавливается после проведения старения УМЗ НС состояния по сравнению с исходным состоянием. Электропроводность УМЗ НС состояния возросла с $14,5 \pm 0,1$ % IACS до значения $27,5 \pm 0,6$ % IACS при условиях, аналогичных случаю старения исходного состояния. Таким образом, в результате данных обработок сплав Cu–2 вес. % Ве характеризуется повышенными прочностными свойствами и электропроводностью.

Ключевые слова: ИПДК; бериллиевая бронза; электропроводность; наноструктура.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 0838-2020-0006 «Фундаментальные исследования новых принципов создания перспективных электромеханических преобразователей энергии с характеристиками выше мирового уровня, с повышенной эффективностью и минимальными удельными показателями, с использованием новых высокоэффективных электротехнических материалов».

Для цитирования: Зайнуллина Л.И., Саркеева Е.А., Александров И.В., Валиев Р.З. Влияние старения на микротвердость и электропроводность сплава Cu–2 вес. % Ве // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 3. С. 69–75. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-69-75.

ВВЕДЕНИЕ

Бериллиевые бронзы являются перспективными сплавами, широко применяемыми для производства изделий ответственного назначения. Они обладают превосходными конструкционными и функциональными свойствами, в том числе высокими прочностью, упругостью, пределами текучести и усталости, а также электро- и теплопроводностью, сопротивлением коррозии и износостойкостью [1–3]. Растворимость атомов Ве в медной матрице уменьшается при понижении температуры. В связи с этим бериллиевые бронзы относятся к дисперсионно-твердеющим сплавам. Классическая обработка включает закалку на твердый раствор в диа-

пазоне температур от 700 до 800 °С с последующим низкотемпературным старением в диапазоне температур от 280 до 350 °С [4]. В процессе старения реализуется следующая последовательность фазовых превращений: однородные зоны Гинье – Престона → когерентные метастабильные γ'' -фазы → последующие γ' -фазы → равновесная γ -фаза [5–7]. В результате бериллиевые бронзы приобретают твердость до 400 HV, предел текучести ~1100 МПа при электропроводности ~15–20 % IACS [8; 9].

Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) убедительно демонстрируют возможность формирования ультрамелкозернистых (УМЗ) наноструктурных (НС) состояний, характеризующихся привлекательными

свойствами, в различных металлических материалах [10–12]. Результаты исследования влияния ИПД кручением (ИПДК) под высоким давлением на микроструктуру, механические свойства и особенности деформационного старения бериллиевой бронзы Cu–2 вес. % Be представлены в работах [13; 14]. Авторами [13] установлено, что ИПДК, реализованная при комнатной температуре с числом оборотов, равным 5, и последующее старение обеспечивают формирование нанокристаллического (НК) состояния, характеризующегося максимальным значением микротвердости, равным 465 ± 4 HV. Полученные значения существенно превышают значение микротвердости, равное 390 HV и характерное для крупнозернистых сплавов системы Cu–Be, подвергнутых старению при оптимальных условиях.

Обеспечение сочетания высокой прочности и электропроводности не только представляет фундаментальный интерес, но и имеет большое практическое значение для инновационных применений медных сплавов в электротехнике. Как показано ранее, в случае сплавов системы Cu–Be основное внимание до настоящего времени уделялось повышению прочности за счет ИПД и последующего старения. При этом внимания увеличению значений электропроводности не уделялось.

Цель исследования – повышение электропроводности сплава Cu–2 вес. % Be за счет формирования наноструктурного состояния методом ИПДК и обеспечения более полного распада твердого раствора при последующем старении по сравнению с исходным состоянием.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований прутки сплава Cu–2 вес. % Be были выдержаны в электропечи Nabetherm при температуре 780°C в течение 30 мин, затем подвергнуты закалке быстрым погружением в воду. От прутков перпендикулярно их продольной оси методом электроэрозионной резки были отрезаны диски диаметром 10 мм и толщиной 1,5 мм. Это состояние принято за исходное.

ИПДК реализовали при комнатной температуре под давлением 6 ГПа с числом оборотов $N=10$ и со скоростью вращения одного из бойков, равной 0,2 об/мин.

Старение исходного состояния и постдеформационное старение состояний после ИПДК проводили при температуре 300°C в течение различных промежутков времени.

Электропроводность измеряли вихретоковым методом с использованием измерителя электропроводности ВЭ-27НЦ. Поверхность образцов для измерений была параллельна плоскости полученных дисков. Погрешность измерений составила $\pm 2\%$.

Исследования тонкой структуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100 в темном и светлом полях при ускоряющем напряжении 200 кВ. Исследования были выполнены в плоскости, параллельной плоскости дисков, на расстоянии 2,5 мм от центра диска. Фольги для ПЭМ-исследований получали путем утонения образцов методом струйной электролитической полировки на установке TenuPol-5 с использованием электролита следующего состава: 1/3 часть HNO_3 и 2/3 части метанола при температуре -30°C .

Микротвердость по Виккерсу определяли с использованием микротвердомера Struers Duramin. К образцам, поверхность которых была отшлифована с использованием шлифовальной бумаги мелкой зернистости, прикладывали нагрузку 100 г в течение 10 с. Микротвердость измеряли в точках, отстоящих от центра дисков на расстоянии 2,5 мм. Полученные значения усредняли по результатам не менее 20 измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изображения микроструктуры сплава Cu–2 вес. % Be в исходном состоянии и после старения, полученные растровым электронным микроскопом, представлены на рис. 1. Исходное состояние сплава (рис. 1 а) характеризуется средним размером зерна, равным 51 ± 2 мкм. В микроструктуре наблюдаются равноосные зерна, содержащие двойники отжига. В теле зерен наблюдаются равномерно распределенные частицы NiBe. В результате последующего старения исходного состояния средний размер зерна практически не изменился и стал равным 53 ± 1 мкм (рис. 1 б). Характер распределения частиц NiBe также не изменился.

Изображения тонкой структуры сплава после ИПД и последующего старения приведены на рис. 2.

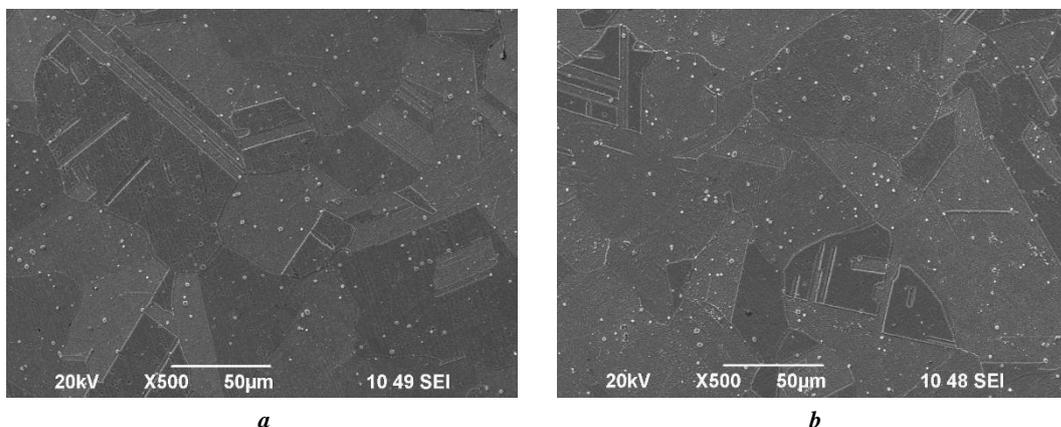


Рис. 1. Изображения микроструктуры сплава Cu–2 вес. % Be: **a** – в исходном состоянии; **b** – после старения
Fig. 1. Images of Cu–2 wt. % Be alloy microstructure: **a** – in the initial state; **b** – after ageing

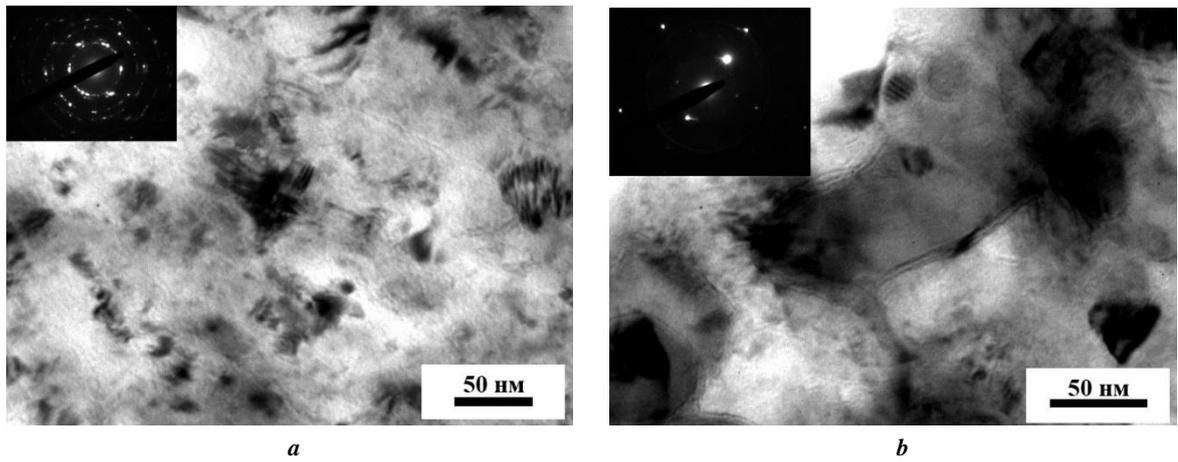


Рис. 2. Тонкая структура сплава Cu–2 вес. % Be:
a – после интенсивной пластической деформации кручением;
b – после интенсивной пластической деформации кручением и последующего старения
Fig. 2. Fine structure of the Cu–2 wt. % Be alloy:
a – after high-pressure torsion; *b* – after high-pressure torsion and ageing

В результате ИПДК в исследуемом сплаве сформировалась сильнодеформированная микроструктура с наноразмерными зёрнами и высокой плотностью дислокаций, которые расположены неравномерно (рис. 2 а). Дислокации служат местами зарождения для дальнейшего осаждения во время последующего старения. Средний размер зёрен после 10 оборотов ИПДК составляет 22 ± 1 нм. Дальнейшее старение образцов после ИПДК привело к формированию микроструктуры со средним размером зёрен 31 ± 1 нм (рис. 2 б). В обоих состояниях прослеживаются наноразмерные деформационные двойники. Двойные дифракционные точки на отснятых электронограммах для данных состояний подтверждают присутствие деформационных двойников

в микроструктуре (вставки в левом верхнем углу на рис. 2 а, 2 б).

На рис. 3 приведены зависимости изменения микротвердости и электропроводности сплава для исходного состояния и после ИПДК от времени старения. Измерения микротвердости исходного состояния показали невысокие значения, равные 122 ± 3 HV. В начале старения микротвердость для обоих состояний резко увеличивается: в исходном состоянии с 122 ± 3 HV до 370 ± 6 HV. Дальнейшее увлечение времени старения исходного состояния приводит к снижению скорости роста микротвердости. После 5 ч выдержки при 300°C микротвердость исходного состояния возросла и составила 396 ± 2 HV.

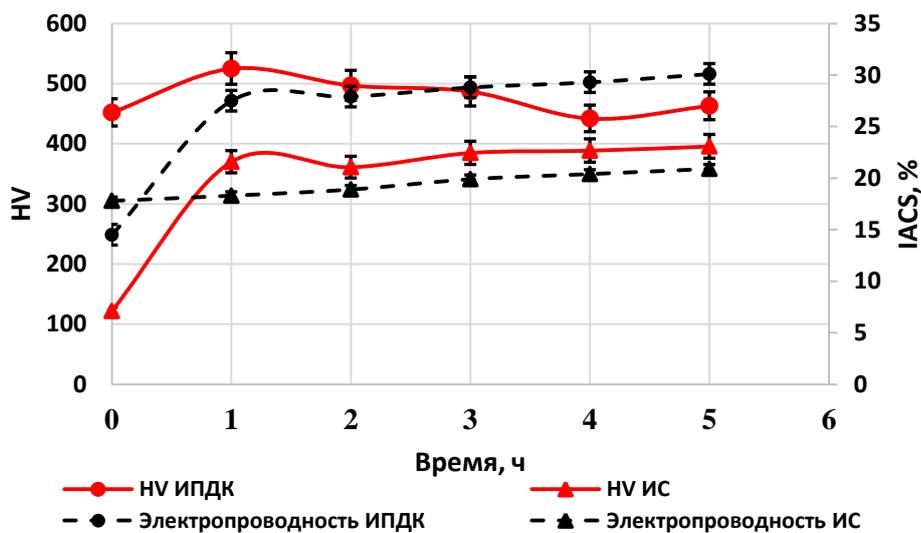


Рис. 3. Микротвердость и электропроводность сплава
Fig. 3. Microhardness and electrical conductivity of the alloy

Микротвердость после 10 оборотов ИПДК выросла с 122 ± 3 HV в исходном состоянии до 452 ± 5 HV. В результате старения в течение 1 ч состояния после ИПДК произошел рост микротвердости с 452 ± 5 HV до максимального значения 525 ± 8 HV. Дальнейшее увеличение времени старения до 5 ч привело к разупрочнению до 463 ± 5 HV.

Электропроводность исходного состояния оказалась низкой и составила $17,8 \pm 0,4$ % IACS. Дальнейшее старение в течение 1 ч исходного состояния практически не изменило величину электропроводности. Ее значение составляет $18,3 \pm 0,4$ % IACS. Увеличение времени старения до 5 ч приводит к стабильному значению электропроводности исходного состояния $20,9 \pm 0,4$ % IACS.

Электропроводность сплава после ИПДК составила $14,5 \pm 0,1$ % IACS. Новым моментом является значительно большее повышение электропроводности в результате старения УМЗ состояния по сравнению с таковым, характерным для исходного состояния. Электропроводность УМЗ состояния возросла с $14,5 \pm 0,1$ % IACS до значения $27,5 \pm 0,6$ % IACS при условиях, аналогичных случаю старения исходного состояния. Уменьшение размера зерна и повышение плотности дислокаций в процессе ИПДК способствуют увеличению скорости зародышеобразования и росту частиц. При тех же условиях в случае исходного состояния резкого увеличения электропроводности на начальном этапе старения не наблюдается. Дальнейшее увеличение времени старения приводит к снижению скорости восстановления электропроводности, и после 5 ч в случае УМЗ состояния она составляет $30,1 \pm 0,6$ % IACS.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Старение исходного состояния не привело в пределах погрешности к изменению среднего размера зерна, однако привело к росту микротвердости более чем в 3 раза. Это может быть связано с микроструктурными превращениями и появлением на ранних этапах старения выделений Cu₂Be, которые являются наименее стабильными из всех метастабильных фаз в системе Cu–Be и могут служить предшественниками появления одной из основных упрочняющих фаз [15].

В результате ИПДК микроструктура стала УМЗ. Рост микротвердости с 122 ± 3 HV в исходном состоянии до 452 ± 5 HV в результате 10 оборотов ИПДК обусловлен измельчением микроструктуры. Отметим, что полученные значения микротвердости для данного состояния превышают значения микротвердости, полученные для состояний после ИПДК с числом оборотов 10 при комнатной температуре и при 150 °С, равные 400 и 430 HV, в работе [16], а также в работе [13] после ИПДК с числом оборотов, равным 5, где микротвердость достигла значения 390 HV. Дальнейший рост микротвердости после старения может быть объяснен главным образом дисперсионным упрочнением, выделением частиц Cu₂Be из твердого раствора, в том числе на границах зерен [17; 18].

Старение исходного состояния в начальный момент времени приводит к повышению микротвердости до 370 ± 6 HV, что, по-видимому, связано с формированием

в тонкой структуре выделений Cu₂Be, препятствующих перемещению дислокаций, и к созданию полей больших напряжений [19; 20]. Дальнейшее увеличение продолжительности времени старения не приводит к заметному изменению величины электропроводности. В данном случае наблюдается баланс между перераспределением легирующих атомов в решетке матрицы, связанным с формированием выделений Cu₂Be, и восстановительными процессами, происходящими в материале.

Стоит отметить, что ИПДК привела к некоторому снижению электропроводности по сравнению с исходным состоянием. Несмотря на то, что в результате ИПДК сформировалась более развитая сетка высокоугловых границ зерен, зернограницный и дислокационный вклады понизили электропроводность. При этом следует учесть возможный вклад в эволюцию электропроводности процесса трансформации малоугловых границ в высокоугловые границы зерен, а также формирования сегрегаций примесных атомов на границах зерен в результате ИПДК.

Рост электропроводности в результате старения УМЗ состояния может быть объяснен, во-первых, тем, что при старении УМЗ состояния происходит более полный распад пересыщенного твердого раствора, высокая плотность дислокаций обеспечивает большое количество мест зарождения и, следовательно, более высокую скорость выделения второй фазы и ее роста. В [13] показано, что при старении после ИПДК происходит выделение стабильной фазы непосредственно из твердого раствора. Выделившаяся фаза не когерентна с матрицей, и, следовательно, электросопротивление сплава в результате старения увеличивается. Увеличение времени выдержки до 5 ч восстанавливает электропроводность до $30,1 \pm 0,6$ % IACS, когда концентрация растворенного вещества в меди приближается к равновесию.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Показано, что в результате проведения ИПДК в сплаве Cu–2 вес. % Be сформировано УМЗ НС состояние со средним размером зерен/субзерен 22 ± 1 нм. Благодаря этому повышается микротвердость с 122 ± 3 до 452 HV, что в 3,7 раза больше по сравнению с исходным состоянием. Последующее старение образцов после ИПДК привело к незначительному увеличению среднего размера зерен/субзерен до 31 ± 1 нм. Однако значение микротвердости возрастает до 525 МПа, что связано с дисперсионным упрочнением. Показано, что в результате ИПДК электропроводность снижается с 17,8 до 14,5 % IACS. Последующее старение УМЗ НС состояния приводит к более высокой скорости восстановления электропроводности и более высоким показателям электропроводности по сравнению с исходным состоянием.

Таким образом, продемонстрировано положительное влияние ИПДК и последующего старения на формирование в сплаве Cu–2 вес. % Be УМЗ НС состояния, характеризующегося максимально высокими значениями электропроводности $27,5 \pm 0,6$ % IACS и микротвердости 525 ± 8 HV.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Montecinos S., Tognana S., Gonzalez C., Salgueiro W. Influence of the load on the elastic modulus determined from nanoindentation measurements in a Cu-2Be alloy with different microstructures // *Engineering Research Express*. 2021. Vol. 3. Article number 035025. DOI: [10.1088/2631-8695/ac1a5b](https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac1a5b).
- Zinkle S.J. Evaluation of high strength, high conductivity CuNiBe alloys for fusion energy applications // *Journal of Nuclear Materials*. 2014. Vol. 449. № 1-3. P. 277–289. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2013.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.09.007).
- Zhou Y.J., Song K.X., Xing J.D., Zhang Y.M. Precipitation behavior and properties of aged Cu-0.23Be-0.84Co alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 658. P. 920–930. DOI: [10.1016/j.jallcom.2015.10.290](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.290).
- Мысик Р.К., Логинов Ю.Н., Сулицин А.В. Литье и обработка бронз со специальными свойствами. Екатеринбург: УГТУ, 2008. 312 с. EDN: [VRKUKV](https://www.vrkukv.ru).
- Jen K.P., Xu L., Hylinski S., Gildersleeve N. Over-aging effect on fracture toughness of beryllium copper alloy C17200 // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2008. Vol. 17. № 5. P. 714–724. DOI: [10.1007/s11665-007-9193-1](https://doi.org/10.1007/s11665-007-9193-1).
- Khachatryan A.G., Laughlin D.E. Structural transformations during decomposition in CuBe alloys // *Acta Metallurgica Et Materialia*. 1990. Vol. 38. № 10. P. 1823–1835. DOI: [10.1016/0956-7151\(90\)90294-Q](https://doi.org/10.1016/0956-7151(90)90294-Q).
- Koo Y.M., Cohen J.B. The structure of GP zones in Cu-10.9 at.% Be // *Acta metallurgica*. 1989. Vol. 37. № 5. P. 1295–1306. DOI: [10.1016/0001-6160\(89\)90159-4](https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90159-4).
- Zhang H., Jiang Y., Xie J., Li Y., Yue L. Precipitation behavior, microstructure and properties of aged Cu-1.7 wt% Be alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 773. P. 1121–1130. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.09.296](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.296).
- Zhang W., Zhao Z., Fang J., He P., Chao Z., Gong D., Chen G., Jiang L. Evolution and strengthening mechanism of metastable precipitates in Cu-2.0 wt% Be alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 857. Article number 157601. DOI: [10.1016/j.jallcom.2020.157601](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157601).
- Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Progress in Materials Science*. 2000. Vol. 45. № 2. P. 103–189. DOI: [10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9).
- Murashkin M.Y., Sabirov I., Sauvage X., Valiev R.Z. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity // *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51. № 1. P. 33–49. DOI: [10.1007/s10853-015-9354-9](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9354-9).
- Sabirov I., Enikeev N., Murashkin M., Valiev R. Bulk Nanostructured Materials with Multifunctional Properties. Heidelberg: Springer, 2015. 118 p. DOI: [10.1007/978-3-319-19599-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19599-5).
- Lomakin I., Castillo-Rodriguez M., Sauvage X. Microstructure, mechanical properties and aging behaviour of nanocrystalline copper-beryllium alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2019. Vol. 744. P. 206–214. DOI: [10.1016/j.msea.2018.12.011](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.011).
- Lomakin I., Nigmatullina A., Sauvage X. Mechanism of large strain accommodation assisted by shear localization in a precipitation-hardened Cu–Be alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2021. Vol. 823. Article number 141760. DOI: [10.1016/j.msea.2021.141760](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141760).
- Tang Y.Ch., Kang Y.L., Yue L.J., Xiao-Liang J. Precipitation behavior of Cu-1.9Be-0.3Ni-0.15Co alloy during aging // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2015. Vol. 28. № 3. P. 307–315. DOI: [10.1007/s40195-014-0198-0](https://doi.org/10.1007/s40195-014-0198-0).
- Watanabe C., Monzen R., Ii S., Tsuchiya K. Microstructure and aging behavior of Cu-Be alloy processed by high-pressure torsion // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 783-786. P. 2707–2712. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2707](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2707).
- Hillel G., Meshi L., Shimon S., Kalabukhov S., Frage N., Zaretsky E.B. Shock wave study of precipitation hardening of beryllium copper // *Materials Science and Engineering A*. 2022. Vol. 834. Article number 142599. DOI: [10.1016/j.msea.2022.142599](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142599).
- Kızılaslan A., Altınsoy İ. The mechanism of two-step increase in hardness of precipitation hardened CuCoNiBe alloys and characterization of precipitates // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 701. P. 116–121. DOI: [10.1016/j.jallcom.2017.01.101](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.101).
- Guoliang X., Qiangsong W., Xujun M., Baiqing X., Lijun P. The precipitation behavior and strengthening of a Cu–2.0 wt% Be alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2012. Vol. 558. P. 326–330. DOI: [10.1016/j.msea.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.007).
- Huang X., Xie G., Liu X., Fu H., Shao L., Hao Z. The influence of precipitation transformation on Young's modulus and strengthening mechanism of a Cu–Be binary alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2020. Vol. 772. Article number 138592. DOI: [10.1016/j.msea.2019.138592](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138592).

REFERENCES

- Montecinos S., Tognana S., Gonzalez C., Salgueiro W. Influence of the load on the elastic modulus determined from nanoindentation measurements in a Cu-2Be alloy with different microstructures. *Engineering Research Express*, 2021, vol. 3, article number 035025. DOI: [10.1088/2631-8695/ac1a5b](https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac1a5b).
- Zinkle S.J. Evaluation of high strength, high conductivity CuNiBe alloys for fusion energy applications. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, vol. 449, no. 1-3, pp. 277–289. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2013.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.09.007).
- Zhou Y.J., Song K.X., Xing J.D., Zhang Y.M. Precipitation behavior and properties of aged Cu-0.23Be-0.84Co alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 658, pp. 920–930. DOI: [10.1016/j.jallcom.2015.10.290](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.290).
- Мысик Р.К., Логинов Ю.Н., Сулицин А.В. *Литье и обработка бронз со специальными свойствами* [Casting and processing of bronzes with special properties]. Екатеринбург, УГТУ Publ., 2008. 312 p. EDN: [VRKUKV](https://www.vrkukv.ru).
- Jen K.P., Xu L., Hylinski S., Gildersleeve N. Over-aging effect on fracture toughness of beryllium copper alloy C17200. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, vol. 17, no. 5, pp. 714–724. DOI: [10.1007/s11665-007-9193-1](https://doi.org/10.1007/s11665-007-9193-1).
- Khachatryan A.G., Laughlin D.E. Structural transformations during decomposition in CuBe alloys. *Acta*

- Metallurgica Et Materialia*, 1990, vol. 38, no. 10, pp. 1823–1835. DOI: [10.1016/0956-7151\(90\)90294-Q](https://doi.org/10.1016/0956-7151(90)90294-Q).
7. Koo Y.M., Cohen J.B. The structure of GP zones in Cu-10.9 at.% Be. *Acta metallurgica*, 1989, vol. 37, no. 5, pp. 1295–1306. DOI: [10.1016/0001-6160\(89\)90159-4](https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90159-4).
 8. Zhang H., Jiang Y., Xie J., Li Y., Yue L. Precipitation behavior, microstructure and properties of aged Cu-1.7 wt% Be alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 773, pp. 1121–1130. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.09.296](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.296).
 9. Zhang W., Zhao Z., Fang J., He P., Chao Z., Gong D., Chen G., Jiang L. Evolution and strengthening mechanism of metastable precipitates in Cu-2.0 wt% Be alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 857, article number 157601. DOI: [10.1016/j.jallcom.2020.157601](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157601).
 10. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 2000, vol. 45, no. 2, pp. 103–189. DOI: [10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9).
 11. Murashkin M.Y., Sabirov I., Sauvage X., Valiev R.Z. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity. *Journal of Materials Science*, 2016, vol. 51, no. 1, pp. 33–49. DOI: [10.1007/s10853-015-9354-9](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9354-9).
 12. Sabirov I., Enikeev N., Murashkin M., Valiev R. *Bulk Nanostructured Materials with Multifunctional Properties*. Springer, 2015. 118 p. DOI: [10.1007/978-3-319-19599-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19599-5).
 13. Lomakin I., Castillo-Rodriguez M., Sauvage X. Microstructure, mechanical properties and aging behaviour of nanocrystalline copper-beryllium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 744, pp. 206–214. DOI: [10.1016/j.msea.2018.12.011](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.011).
 14. Lomakin I., Nigmatullina A., Sauvage X. Mechanism of large strain accommodation assisted by shear localization in a precipitation-hardened Cu–Be alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2021, vol. 823, article number 141760. DOI: [10.1016/j.msea.2021.141760](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141760).
 15. Tang Y.Ch., Kang Y.L., Yue L.J., Xiao-Liang J. Precipitation behavior of Cu-1.9Be-0.3Ni-0.15Co alloy during aging. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 307–315. DOI: [10.1007/s40195-014-0198-0](https://doi.org/10.1007/s40195-014-0198-0).
 16. Watanabe C., Monzen R., Ii S., Tsuchiya K. Microstructure and aging behavior of Cu-Be alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 783-786, pp. 2707–2712. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2707](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2707).
 17. Hillel G., Meshi L., Shimon S., Kalabukhov S., Frage N., Zaretsky E.B. Shock wave study of precipitation hardening of beryllium copper. *Materials Science and Engineering A*, 2022, vol. 834, article number 142599. DOI: [10.1016/j.msea.2022.142599](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142599).
 18. Kızılaslan A., Altınsoy İ. The mechanism of two-step increase in hardness of precipitation hardened CuCoNiBe alloys and characterization of precipitates. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 701, pp. 116–121. DOI: [10.1016/j.jallcom.2017.01.101](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.101).
 19. Guoliang X., Qiangsong W., Xujun M., Baiqing X., Lijun P. The precipitation behavior and strengthening of a Cu–2.0 wt% Be alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2012, vol. 558, pp. 326–330. DOI: [10.1016/j.msea.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.007).
 20. Huang X., Xie G., Liu X., Fu H., Shao L., Hao Z. The influence of precipitation transformation on Young's modulus and strengthening mechanism of a Cu–Be binary alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2020, vol. 772, article number 138592. DOI: [10.1016/j.msea.2019.138592](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138592).

The influence of aging on microhardness and electrical conductivity of Cu–2 wt. % Be alloy

© 2022

Liliya I. Zaynullina^{*1}, senior lecturer of Chair of Materials Science and Physics of Metals

Elena A. Sarkeeva², senior lecturer of Chair of Materials Science and Physics of Metals

Igor V. Alexandrov³, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,
professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals

Ruslan Z. Valiev⁴, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,
professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals

Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)

*E-mail: ZaynullinaLI@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6116-1535>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0357-8161>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4789-4713>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4340-4067>

Received 04.05.2022

Accepted 28.07.2022

Abstract: Goods made of beryllium bronzes got widespread use in the industry due to the complex of properties: high heat conductivity, strength, hardness, wear resistance, and corrosion resistance. They are not magnesium-based and do not spark on impact; therefore, they are essential for the production of non-sparking tools. The alloys of this system are used in the electrical engineering industry; consequently, it is necessary to pay attention to the improvement of the material's electrical conductivity. The paper studies the microstructure, microhardness, and electrical conductivity of the Cu–2 wt.% Be alloy exposed to high-pressure torsion (HPT). The authors investigated the microstructure and fine structure of the alloy in various states. The study showed that HPT leads to the formation of an ultrafine-grained nanostructured (UFG NS) state with an average size of grains/subgrains of 22±1 nm. Additional ageing of samples after HPD led to a slight increase in

the grains/subgrains size up to 31 ± 1 nm. In both states, the authors observed nanosized deformation twins. The authors studied the dependences of microhardness and electrical conductivity of the alloy after HPD on the time of further ageing. The study identified that the microhardness increases from 122 ± 3 HV in the initial state up to 525 ± 8 HV after HPD and ageing. The investigation shows that the electrical conductivity substantially better recovers after ageing of the UFG NS state compared to the initial state. The electrical conductivity of the UFG NS state increased from 14.5 ± 0.1 % IACS up to 27.5 ± 0.6 % IACS in conditions similar to the initial state ageing. Therefore, resulting from such processing, the Cu–2 wt.% Be alloy is characterized by its advanced strength properties and electrical conductivity.

Keywords: HPT; beryllium bronze; electrical conductivity; nanostructure.

Acknowledgements: The work was carried out under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the project No. 0838-2020-0006 “Fundamental research of new principles of creation of the advanced electromechanical energy converters with the characteristics higher than the international standards with the improved efficiency and minimum specific indicators with the use of new high-performance electrotechnical materials”.

For citation: Zaynullina L.I., Sarkeeva E.A., Alexandrov I.V., Valiev R.Z. The influence of aging on microhardness and electrical conductivity of Cu–2 wt. % Be alloy. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 3, pp. 69–75. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-69-75.