

Исследование свойств антифрикционных колец при интенсивной пластической деформации

¹*ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна, PhD, доцент, irinka.vav@mail.ru,

²ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич, PhD, доцент, dyusha.vav@mail.ru,

¹Рудненский индустриальный институт, Казахстан, Рудный, ул. 50 лет Октября, 38,

²НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Проведено исследование свойств латуневых заготовок для антифрикционных колец при интенсивной пластической деформации методом кручения под высоким давлением. Изучены эволюция микроструктуры и механические свойства деформированных заготовок после 6 циклов деформирования методом кручения под высоким давлением при температуре 500°C. Все металлографические исследования выполнены с привлечением современных методов: просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и анализа картин дифракции обратно отраженных электронов (EBSD). В результате деформирования получена ультрамелкозернистая структура с наличием большого количества большеугловых границ. Прочностные свойства латуни возросли по сравнению с исходным состоянием почти в 3 раза, микротвердость также возрастает в 3 раза, т.е. повысилась с 820 МПа в исходном состоянии до 2115 МПа после деформирования.

Ключевые слова: механические свойства, антифрикционные кольца, латунь, интенсивная пластическая деформация, кручение под высоким давлением, микроструктура, свойства, деформация.

Введение

Антифрикционные материалы применяются с целью повышения долговечности подвергающихся трению механизмов и поверхностей машин и уменьшения потерь на трение. В технике часто применяются антифрикционные кольца, так как они взаимодействуют с опорным кольцом через промежуточное кольцо, изготовленное из материала с более высоким пределом прочности, чем антифрикционное кольцо. Такие кольца периодически получают литьем. В литом состоянии большинство металлов и сплавов имеют крупнозернистую структуру. Для измельчения структуры таких металлов в промышленности чаще всего используются следующие традиционные методы: термическая обработка, основанная на фазовых превращениях, холодная обработка металлов давлением с последующей термической обработкой, чаще в виде рекристаллизационного отжига, термомеханическая обработка. Такие традиционные методы позволяют измельчить микроструктуру до ультрамелкозернистой [1, 2]. За последние годы было написано много статей, в которых показано, что существуют методы интенсивной пластической деформации (ИПД), которые позволяют снять это ограничение и измельчить микроструктуру до 0,1 мкм и ниже непосредственно при деформировании [3-5].

В настоящее время существует большое количество методов ИПД, основными из которых

являются: равноканальное угловое прессование (РКУП) [6] и кручение под высоким давлением (КВД) [7], но до сих пор они используются только в лабораторных масштабах. Для того чтобы расширить границы применения ультрамелкозернистых и наноматериалов в качестве конструкционных, применимых для изготовления деталей с уникальными физическими и механическими свойствами, нужно создать способ, который разрешит изготавливать полуфабрикаты с повышенными свойствами. К таким свойствам относятся: высокие прочностные характеристики, однородная равноосная ультрамелкозернистая структура как в продольном, так и поперечном сечениях, и высокая доля большеугловых границ. В процессе деформации дислокации входят в малоугловые границы, адсорбируются ими и постепенно увеличивают разориентировку границ, повышая, таким образом, средний угол разориентировки. Постепенно малоугловые границы трансформируются в большеугловые, таким образом, доля большеугловых границ в материале увеличивается, а из-за увеличения количества дислокаций увеличивается и прочность. Вдобавок новый способ обязан принимать во внимание заводские требования, несложно приспособливаться к уже имеющемуся оборудованию и иметь недорогую и технологическую оснастку. Такой способ необходимо искать среди циклических методов обработки металлов давлением. Наиболее применяемы-

ми и исследуемыми из этих способов, являются: винтовая экструзия, РКУП, КВД, которые позволяют при деформации сохранять исходную объемную форму обрабатываемой заготовки независимо от степени деформации приложенной к ней.

Геометрическая форма образца при КВД продумана так, что весь основной объем материала проходит деформацию в условиях квазигидростатического сжатия, которое обеспечивается за счет приложенного давления наковален и давления со стороны внешних слоев образца. Благодаря такой схеме деформирования обрабатываемый образец не разрушается, даже несмотря на высокую степень приложенной деформации. На основе этого метода была предложена новая конструкция, описанная в предыдущих работах [8, 9].

Целью данной работы является исследование свойств латуневых колец, полученных при интенсивной пластической деформации методом КВД с целью повышения срока эксплуатации антифрикционных колец.

Материал и методика исследования

Кольца торцовых уплотнителей обычно изготавливаются из деформируемой латуни марки ЛЖМц59-1-1, поэтому лабораторный эксперимент проводился именно на этом материале. Латунь марки ЛЖМц59-1-1 относится к марганцевым латуням и обладает повышенной вязкостью и высокой прочностью. Высокая пластичность сплава обусловлена наличием мелкозернистой структуры, полученной в результате его легирования железом. Так как данная латунь имеет в исходном состоянии двухфазную структуру $\alpha + \beta$, которая обладает низкой пластичностью, поэтому с целью наибольшего измельчения исходного размера зерен, кольцевые заготовки были подвергнуты предварительной термической обработке. Предварительная термическая обработка заключалась в отжиге латуни при 600°C и медленном охлаждении вместе с печью. Эксперимент проводился в лаборатории на одностоечном горячештамповочном кривошипном прессе модели ПБ 6330-02. Деформирование проводили при температуре 500°C. Количество циклов деформирования – 6.

Шлифы для проведения металлографических исследований подготавливались по стандартной для этого методике. Исследование колец проводилось в средней плоскости образца, а также в двух сечениях: поперечном и продольном, чтобы избежать влияния периферийных областей. С целью более объективной интерпретации структуры зерна по сравнению с TEM анализ EBSD был выполнен с использованием Philips XL-30 REM с полевым катодом. Ускоряющее напряжение составляет 20 кВ. Для получения карт ориентировок зерен электронный зонд последовательно перемещается по регулярной сетке точек, для каждой точки формируется картина EBSD, компьютерная программа индексирует ее и сохраняет инфор-

мацию об ориентации и фазовом составе. Таким образом, получается массив локальных ориентировок для всех точек сканирования, который позволяет воссоздавать структуру исследуемого материала с последующей количественной обработкой изображения и получать распределения границ структурных элементов по размерам и величине угла разориентировки. Для обработки результатов использовалось лабораторное программное обеспечение Tex SEM. Доля большеугловых и малоугловых границ определялась по гистограммам углов разориентации, вычисленных на основе анализа всей EBSD карты целиком. Разориентация была рассчитана между соседними (смежными) точками сканирования. Сканирование проводилось на срезах размером 50×50 мкм с шагом 0,2 мкм. Различные разориентации между зернами были установлены с использованием минимального разрешения разориентации 2°. Ввиду экспериментальной погрешности метода EBSD все малоугловые границы с разориентацией менее 2° были исключены из рассмотрения. Границы зерен обозначены либо белыми линиями, соответствующими разориентациям под малым углом 2-15°, либо черными линиями, соответствующими разориентациям под большим углом >15°.

Микротвердость определяли по Виккерсу при нагрузке 1Н на световом микроскопе Leica, оборудованном микротвердомером.

Механические испытания на одноосное растяжение проводились при комнатной температуре на машине Instron 5882 со скоростью деформации 1,0 мм/мин. Деформацию образца измеряли с помощью тензометрического датчика Instron. По результатам испытаний были определены характеристики прочности и пластичности: предел текучести, предел прочности при растяжении и относительное удлинение.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура латуни в исходном состоянии (после отжига) состоит из α -фазы (рисунок 1а).

Анализ микроструктуры после деформирования показал, что после 2-го цикла деформирования методом КВД микроструктура медной матрицы измельчается, а частицы железа принимают плоскую линзовидную форму, причем в продольном сечении включения выглядят более плоскими и вытянутыми, а в поперечном линзовидными. Размер зерна измельчается с 17 мкм в исходном состоянии до 7 мкм после 2-го цикла деформирования, структура разнотекучая (рисунок 1б). Высокая температура деформирования привела к динамическому разупрочнению, в результате зерно измельчается не так интенсивно, как при деформации при комнатной температуре. После 4-го цикла деформирования микроструктура измельчается до 3 мкм (рисунок 1в), в структуре встречается «крупчатость», которая

обычно наблюдается у сильно пересыщенных твердых растворов. Форма частиц железа становится более плоской. 6 циклов деформирования привело к измельчению структуры до 1 мкм, структура является менее дисперсной и более однородной (рисунок 1г), плохо прослеживаются границы первоначальных зерен. С увеличением количества циклов деформирования до 6-ти форма частиц железа становится одинаковой, как в поперечном, так и продольном сечениях.

Обе ориентационные карты, приведенные на рисунке 2, демонстрируют достаточно однородную микроструктуру, а вот распределение границ по углам разориентировки сильно отличается.

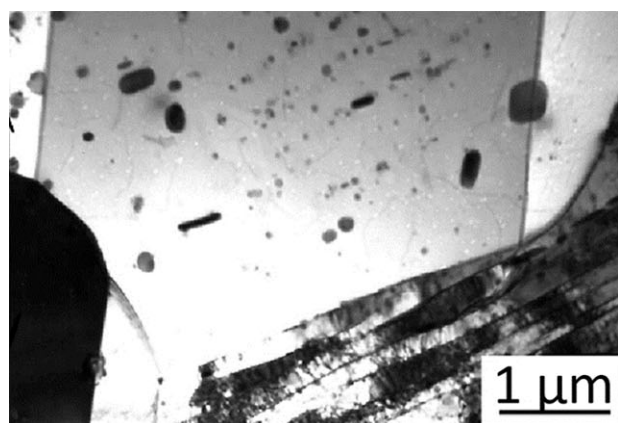
Средний размер зерна исходных образцов (после отжига) составляет ≈ 17 мкм, а после шести циклов деформирования методом КВД ≈ 1 мкм. Доля большеугловых границ составляет 13% для исходных образцов и 79% после шести циклов деформирования, что дает возможность говорить о формировании ультрамелкозернистой структуры с наличием большого количества большеугловых границ (рисунок 3). Доля специальных границ, выявленная EBSD анализом, минимальна $\sim 3\%$.

На основании исследований ПЭМ и EBSD анализа видно, что тип структуры, полученный после

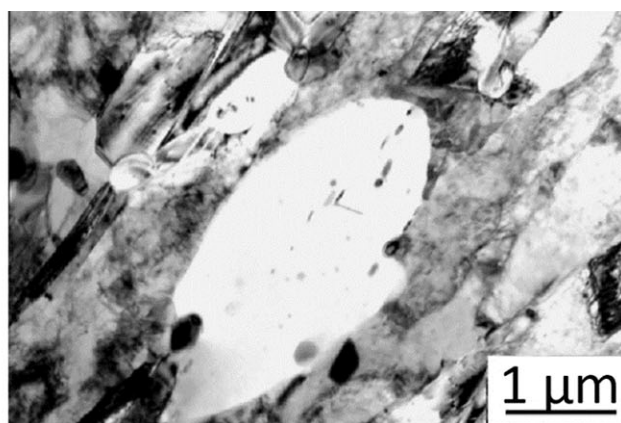
6 циклов деформирования методом КВД, получен динамической рекристаллизацией.

Результаты исследования микротвердости как в продольном, так и поперечном сечениях, показали достаточно однородную микротвердость по всему сечению. После 6-ти циклов деформирования среднее значение микротвердости по сравнению с исходным состоянием возрастает почти в 3 раза, т.е. повысилась с 820 МПа в исходном состоянии до 2115 МПа после деформирования.

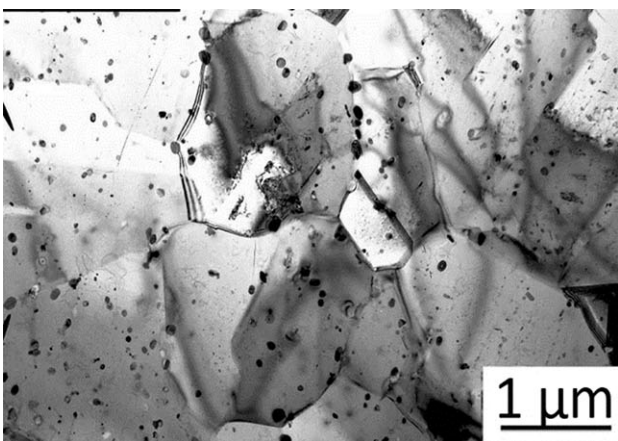
Испытания на растяжения показали, что в исходном (недеформированном) состоянии предел прочности составляет 430 МПа, а после шестого цикла – 1295 МПа. Предел текучести увеличивается с 130 МПа в исходном состоянии до 1185 МПа. Пластические характеристики с увеличением количества циклов деформирования, наоборот, снижаются, так относительное удлинение с 65% в исходном состоянии снижается до 12% после 6-го цикла деформирования. Такое низкое относительное удлинение, показывает, что дальнейшая деформация сделает его абсолютно хрупким и не применимым на производстве без последующей термической обработки, поэтому количество циклов деформирования больше не увеличиваем.



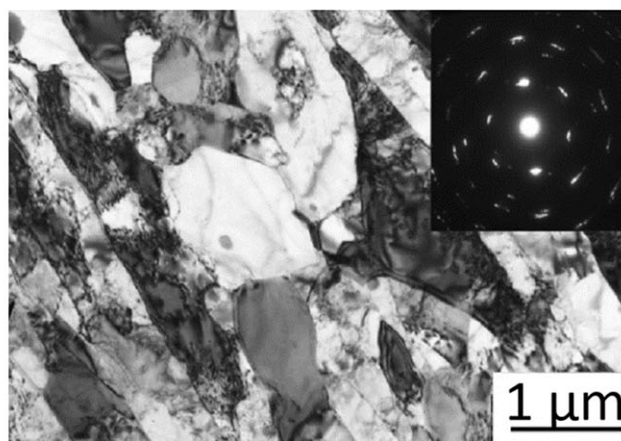
а



б

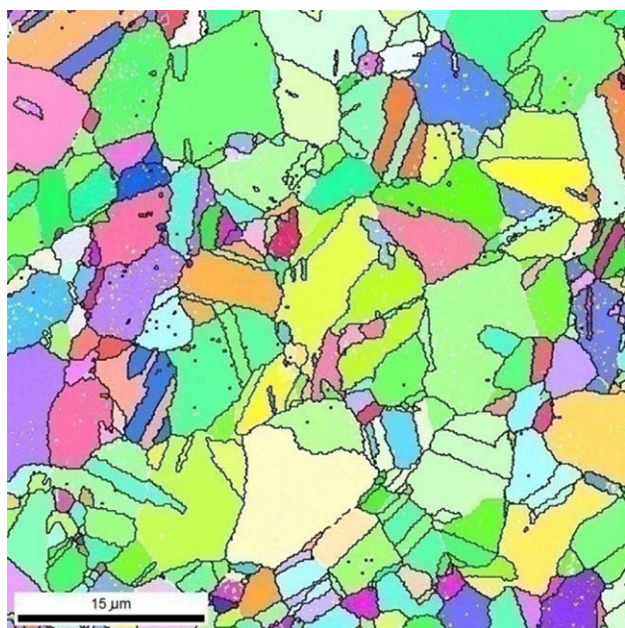


в

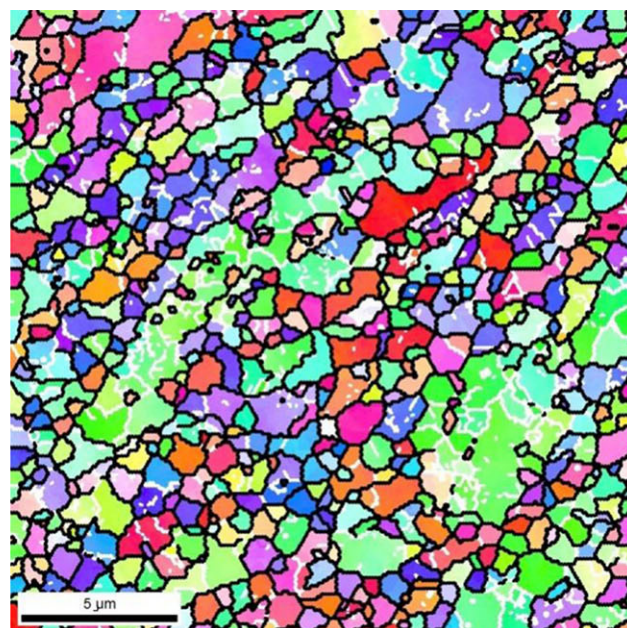


г

а – исходная структура, б – 2 цикла, в – 4 цикла, г – 6 циклов
Рисунок 1 – Микроструктура латуни марки ЛЖМц59-1-1



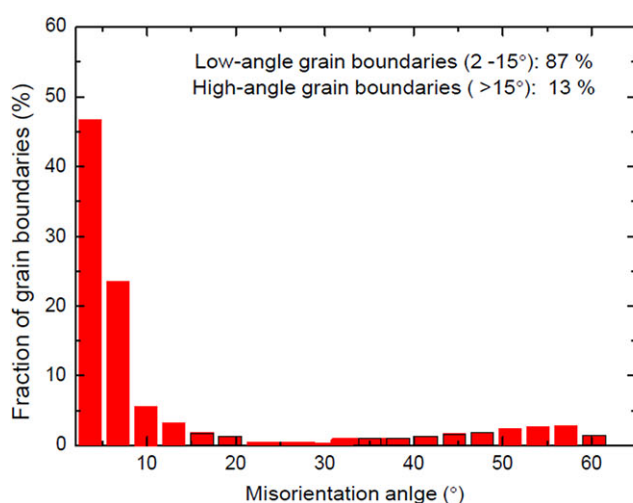
а



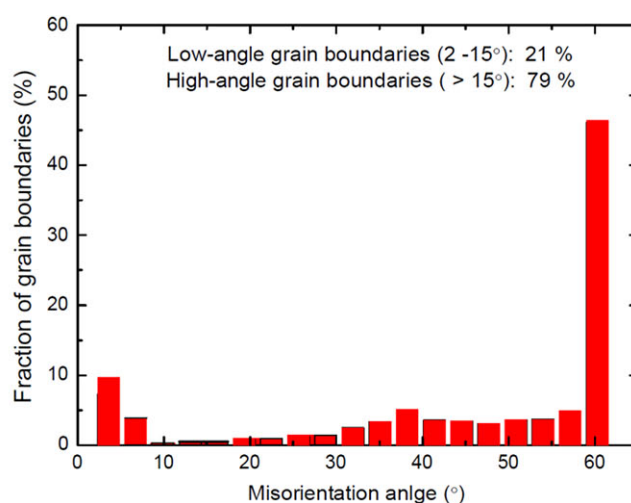
б

а – исходная структура, б – 6 циклов деформирования

Рисунок 2 – Ориентационные карты микроструктуры



а



б

а – исходная структура, б – 6 циклов деформирования

Рисунок 3 – Гистограммы углов разориентации

Вывод

По результатам электронно-микроскопического анализа установлено, что наиболее интенсивное измельчение зерен в латуни марки ЛЖМц59-1-1 наблюдается при первых двух циклах деформирования, а при последующих циклах скорость диспергирования зерен сильно снижается. Так 6 циклов деформирования позволили диспергировать структуру с 17 мкм до 1 мкм.

Доля большеугловых границ составляет 13% для исходных образцов и 79% после шести циклов деформирования, что дает возможность говорить о формировании ультрамелкозернистой структуры с наличием большого количества большеугловых границ без острой текстуры. Доля специальных границ, выявленная EBSD анализом, минимальна ~3%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyakova M., Gulina A., Constantinov D. Investigation of microstructure and mechanical properties of carbon steel wire after continuous method of deformational nanostructuring // Appl. Mechan. Mater. 2013. 436, pp. 114-120.
2. Kawasaki M., Ahn B., Lee H.J., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion to process an aluminum-magnesium nanocomposite through diffusion bonding // J. Mater. Res. 2015. Vol. 31. Pp. 88-99.
3. Maksimkin O.P., Gusev M.N., Tsai K.V., Yarovchuk A.V., Rybalchenko O.V., Enikeev N.A., Valiev R.Z., Dobatkin S.V. Effect of neutron irradiation on the microstructure and the mechanical and corrosion properties of the ultrafine-grained stainless Cr-Ni steel. Phys. Met. Met. 2015, 116, 1270-1278.
4. Verma D.P., Pandey S.A., Bansal A., Upadhyay Sh., Mukhopadhyay N.K., Sastry G.V.S., Manna, R. Bulk Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Pressing Followed by Flash Annealing. J. Mater. Eng. Perform. 2016, 25, 5157-5166.
5. Eivania A.R., Mirzakoochakshirazib H.R., Jafariana H.R. Investigation of joint interface and cracking mechanism of thick cladding of copper on aluminum by equal channel angular pressing (ECAP) // Journal of Materials Research and Technology. 2020, Vol. 9 (3), pp. 3394-3405.
6. Zhilyaev A.P., Ringot G., Huang Yi., Cabrera J.M., Langdon T.G. Mechanical behavior and microstructure properties of titanium powder consolidated by high-pressure torsion // Mater. Sci. Eng. A. 2017. Vol. 688. Pp. 498-504.
7. Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC // J. Mater. Sci. 2013. 48. Pp. 4501-4509.
8. Volokitin A., Volokitina I., Panin E., Naizabekov A., Lezhnev S. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design // Metalurgiya. 2021. 60 (3-4). Pp. 325-328.
9. Volokitin A.; Naizabekov, A.; Volokitina, I.; Lezhnev, S.; Panin, E. Thermomechanical treatment of steel using severe plastic deformation and cryogenic cooling. Mater. Lett. 2021, 304, 130598.

Қарқынды пластикалық деформация кезіндегі антифрикциялық сақиналардың қасиеттерін зерттеу

¹*ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна, PhD, доцент, irinka.vav@mail.ru,

²ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич, PhD, доцент, dyusha.vav@mail.ru,

¹Рудный индустриалды институты, Қазақстан, Рудный, Қазанға 50 жыл көшесі, 38,

²«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада жоғары қысымды бұрау әдісімен қарқынды пластикалық деформация кезінде антифрикциялық сақиналарға арналған жез дайындамалардың қасиеттерін зерттеу жүргізілді. 500°C температурада жоғары қысымды бұрау әдісімен деформацияның 6 циклынан кейін деформацияланған дайындамалардың микроқұрылымының эволюциясы және механикалық қасиеттері зерттелді. Барлық металлографиялық зерттеулер заманауи әдістерді қолдана отырып жүргізілді: мөлдір электронды микроскопия (МЭМ) және кері шағылысқан электрондардың дифракция суреттерін талдау (EBSD). Деформация нәтижесінде үлкен бұрыштық шекаралары бар ультра түйіршікті құрылым алынды. Жездің беріктік қасиеттері бастапқы күймен салыстырғанда шамамен 3 есе өсті, микроқаттылық 3 есе артады, яғни деформациядан кейін бастапқы күйдегі 820 МПа-дан 2115 МПа-ға дейін өсті. Бұл жағдайда беріктік қасиеттерінің ең үлкен өсуі деформацияның алғашқы екі циклінде болады.

Кілт сөздер: механикалық қасиеттері, антифрикциялық сақиналар, жез, қарқынды пластикалық деформация, жоғары қысымды бұрау, микроқұрылым, қасиеттері, деформация.

Study of the Properties of Antifriction Rings Under Severe Plastic Deformation

¹*VOLOKITINA Irina, PhD, Associate Professor, irinka.vav@mail.ru,

¹VOLOKITIN Andrey, PhD, Associate Professor, dyusha.vav@mail.ru,

¹Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, Rudny, 50 years of October Street, 38,

²NPISC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,

*corresponding author.

Abstract. A study was conducted of the properties of brass blanks for antifriction rings under severe plastic deformation by high pressure torsion. The evolution of microstructure and mechanical properties of deformed blanks after 6 cycles of deformation by high-pressure torsion at 500°C were studied. All metallographic studies were carried out using modern methods: transmission electron microscopy (TEM) and analysis of patterns of back-reflected electron diffraction (EBSD). As a result of deformation an ultrafine grain structure with the presence of a large number of large-angle boundaries was obtained. Strength properties of brass increased in comparison with an initial condition almost in 3 times, microhardness also increased in 3 times, i. e. increased from 820 MPa in initial condition up to 2115 MPa after deformation. Thus the greatest gain of strength properties falls at the first two cycles of deformation.

Keywords: *mechanical properties, antifriction rings, brass, severe plastic deformation, high pressure torsion, microstructure, properties, deformation.*

REFERENCES

1. Polyakova M., Gulin A., Constantinov D. Investigation of microstructure and mechanical properties of carbon steel wire after continuous method of deformational nanostructuring // *Appl. Mechan. Mater.* 2013. 436, pp. 114-120.
2. Kawasaki M., Ahn B., Lee H.J., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion to process an aluminum-magnesium nanocomposite through diffusion bonding // *J. Mater. Res.* 2015. Vol. 31. Pp. 88-99.
3. Maksimkin O.P., Gusev M.N., Tsai K.V., Yarovchuk A.V., Rybalchenko O.V., Enikeev N.A., Valiev R.Z., Dobatkin S.V. Effect of neutron irradiation on the microstructure and the mechanical and corrosion properties of the ultrafine-grained stainless Cr-Ni steel. *Phys. Met. Met.* 2015, 116, 1270-1278.
4. Verma D.P., Pandey S.A., Bansal A., Upadhyay Sh., Mukhopadhyay N.K., Sastry G.V.S., Manna, R. Bulk Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Pressing Followed by Flash Annealing. *J. Mater. Eng. Perform.* 2016, 25, 5157-5166.
5. Eivania A.R., Mirzakoochakshirazib H.R., Jafariana H.R. Investigation of joint interface and cracking mechanism of thick cladding of copper on aluminum by equal channel angular pressing (ECAP) // *Journal of Materials Research and Technology.* 2020, Vol. 9 (3), pp. 3394-3405.
6. Zhilyaev A.P., Ringot G., Huang Yi., Cabrera J.M., Langdon T.G. Mechanical behavior and microstructure properties of titanium powder consolidated by high-pressure torsion // *Mater. Sci. Eng. A.* 2017. Vol. 688. Pp. 498-504.
7. Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC // *J. Mater. Sci.* 2013. 48. Pp. 4501-4509.
8. Volokitin A., Volokitina I., Panin E., Naizabekov A., Lezhnev S. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design // *Metalurgija.* 2021. 60 (3-4). Pp. 325-328.
9. Volokitin A.; Naizabekov, A.; Volokitina, I.; Lezhnev, S.; Panin, E. Thermomechanical treatment of steel using severe plastic deformation and cryogenic cooling. *Mater. Lett.* 2021, 304, 130598.