

Влияние метода "РКУП-волочение" на механические свойства сталемедной проволоки

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

²**ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич**, PhD, старший преподаватель, dyusha.vav@mail.ru,

¹**ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич**, к.т.н., профессор, sergey_legnev@mail.ru,

¹**ФЕДОРОВА Татьяна Дмитриевна**, магистр, tanyusik88@bk.ru,

¹**САЛКО Оксана Юрьевна**, магистр, salko.1990@mail.ru,

¹Рудненский индустриальный институт, Казахстан, 111500, Рудный, ул. 50 лет Октября, 38,

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

*автор-корреспондент.

Аннотация. В настоящее время существует небольшое количество работ, посвященных изменению микроструктуры сталемедной проволоки во время ее деформирования, поскольку сталь и медь имеют разные механические свойства, эти металлы на границе раздела могут деформироваться по-разному. Поэтому настоящее исследование было посвящено изучению влияния процесса РКУП-волочение на механические свойства биметаллической сталемедной проволоки. В ходе комплекса экспериментальных исследований доказана принципиальная возможность и эффективность использования предлагаемого непрерывного способа для повышения прочностных свойств сталемедной проволоки. Так, полученные значения микротвердости медной оболочки превышают твердость отожженной меди на 315 МПа, вследствие наклепа при деформировании методом РКУП-волочение, и составляют 663 МПа. Микротвердость стального сердечника в исходном состоянии составляет 600 МПа, а после трех проходов деформации – 985 МПа.

Ключевые слова: механические свойства, биметаллическая проволока, РКУП-волочение, микротвердость, волочение, сталемедная проволока, сталь, медь, деформация, РКУП.

Введение

Быстрое и динамичное развитие таких отраслей, как электроника, телекоммуникации и энергетика, порождает спрос на большое количество биметаллической продукции. Биметаллические провода со стальным сердечником и медной оболочкой (особенно для электронных элементов и электропроводки) широко распространены среди биметаллических изделий.

Одним из самых перспективных направлений повышения эксплуатационных свойств биметаллической проволоки является получение ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в металлах и сплавах деформационными способами. В этой связи активно используются способы интенсивной пластической деформации (ИПД), которые первостепенно в условиях многоциклового обработки реализуют схему простого сдвига. Разработка ультрамелкозернистых и наноструктурированных материалов с помощью процессов ИПД представляет большой интерес для получения материалов с улучшенными механическими свойствами. Самыми популярными и востребованными из методов зарекомендовали себя кручение под высоким давлением (КВД) и равноканальное угловое прессование (РКУП) [1-3]. В методе РКУП образец продавливается через два пересекаю-

щихся канала, имеющих одинаковые размеры поперечного сечения, и деформация осуществляется за счет интенсивного простого сдвига на пересечении каналов. Обработка РКУП приводит к ультрамелкозернистой и наноструктуре, которая может быть однородной или гетерогенной в зависимости от количества проходов через матрицу. Применение этого процесса для однородных металлов уже было исследовано и соотнесено с другими конкретными системами обработки [4-6]. Экструзия и прокатка являются основными процессами для производства биметаллических стержней, труб и проволоки. Также существуют работы по обработке биметаллических стержней методом РКУП, но их очень мало, хотя с помощью РКУП были получены соединения высокой прочности и лучшего качества. Одним из основных преимуществ РКУП является формирование однородной ультрадисперсной микроструктуры. РКУП было впервые представлено в 1981 году Сегалом и др. [7] в бывшем Советском Союзе. Принцип этого метода очень хорошо описан в [8] Валиевым и Лэнгдоном. Принцип обработки РКУП и особенно общие последствия этого метода обработки были рассмотрены ранее несколькими исследователями, включая Валиева и др. [9] в 2006 году, Бейерлейна и Тота [10] в 2009 году, Фигейре-

до и Лэнгдона.

В настоящее время применение РКУП в промышленности является актуальной проблемой. На данный момент единственное применение этого метода было выполнено его автором В.М. Сегалом в Honeywell Electronic Materials (США). Метод использовался при обработке заготовок-мишеней для магнетронного распыления тонкой пленки.

РКУП широко не используется, так как все исследователи сосредоточены в основном на структуре материала. Они заинтересованы в формировании необычных структур и свойств материала после РКУП, в то время как однородность структуры, доля высокоугловых границ зерен зависит от механики РКУП. Последнее определяется внешней кинематикой и внешней силой, действующей на деформируемую заготовку (схема деформации, геометрия штампа, условия трения). Механика также определяет некоторые основные параметры процесса: однородность напряженно-деформированного состояния, нагрузку при прессовании, изменение формы заготовки, величину накопленной деформации и скорость деформации в каждой точке.

В своей классической форме РКУП известен как слишком громоздкий, чтобы его можно было использовать в промышленности для производства ультрамелкозернистых металлов. Одним из его основных ограничений является то, что образец должен быть извлечен из матрицы и вставлен обратно после каждого прохода [11]. Чтобы добиться значительного измельчения зерна за счет применения высокой деформации, эту операцию необходимо повторить несколько раз, что является трудоемким процессом и ограничивает потенциал РКУП для промышленного применения. В качестве возможного решения было рассмотрено оборудование с увеличенным количеством угловых каналов, что позволяет сократить количество проходов, необходимых для получения тех же свойств материала.

Одной из последних модификаций метода РКУП является РКУП-Конформ (РКУП-К). Дан-

ный метод позволяет получать длинномерные заготовки. При использовании этого метода в сочетании с традиционными методами обработки металлов давлением (прокатка, волочение и т. д.) он позволяет получать полуфабрикаты в виде прутков с геометрическими размерами, которые легко могут быть востребованы в промышленности [12].

Еще одной модификацией метода РКУП является совмещенный процесс «РКУП-волочение» [13-14]. Непрерывность этого процесса обеспечивается за счет процесса волочения, идущего сразу после РКУП. Этот метод имеет значительные преимущества по сравнению с РКУП, во-первых, длина заготовки не ограничивается технологическими параметрами процесса, а именно нестабильностью давящего пуансона, и, во-вторых, РКУП-волочение может быть использовано как промежуточная операция в других смежных областях промышленности. Однако на текущий момент разработка данного совмещенного процесса велась только для однородных материалов [15-16].

Материал и методика исследования

Реализация и доведение до промышленного использования настоящего процесса позволит получать методом непрерывного РКУП-волочения высококачественную биметаллическую проволоку.

В качестве исходной заготовки использовали биметаллическую проволоку, состоящую из стального сердечника – сталь 1566, и внешнего слоя из меди М1, диаметром 10 мм, диаметр стального сердечника составлял 8 мм.

Эксперимент был проведен в лабораторных условиях на промышленном волочильном стане В – I/550 М. Для проведения эксперимента перед фильерой закрепили равноканальную ступенчатую матрицу (РКУ-матрицу), диаметр каналов которой равен 7 мм, угол стыка каналов составляет 135°. Матрицу непосредственно расположили в контейнер волочильного стана, где находится смазка в виде стружки мыла (рисунок 1).

Деформирование осуществлялось при ком-

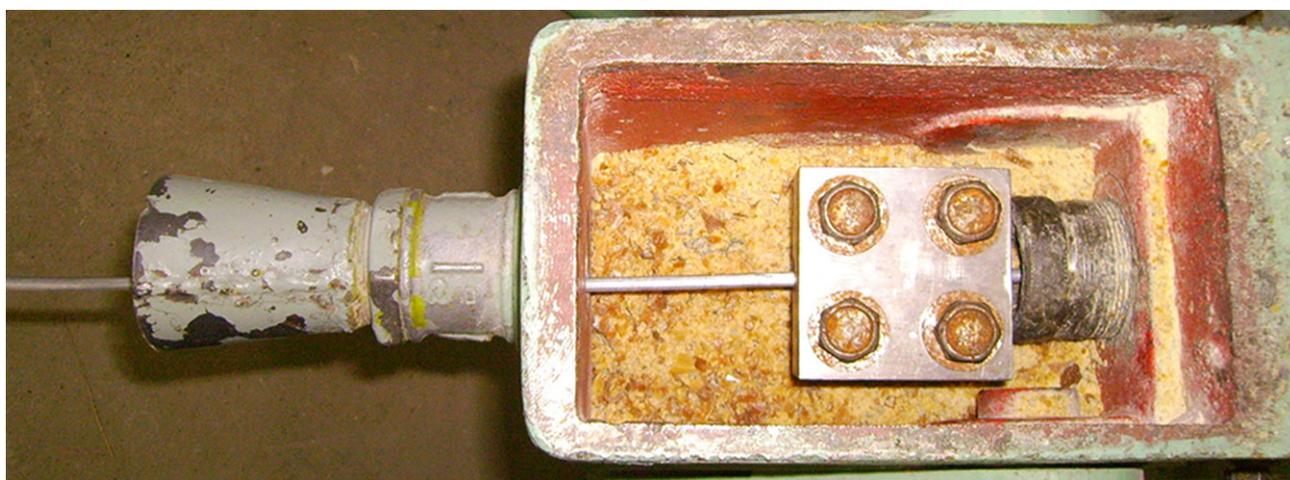


Рисунок 1 – Расположение равноканальной ступенчатой матрицы в контейнере с мыльной стружкой

натной температуре, количество циклов деформирования – 3. После каждого цикла деформирования в контейнер с мыльной стружкой устанавливали новую РКУ-матрицу и фильеру с меньшим диаметром канала.

Механические испытания на растяжение биметаллической проволоки были проведены по стандартной методике на электромеханической измерительной машине Instron 5982. Скорость растяжения проволоки составляла 0,5 мм/мин, что соответствует скорости деформации, равной $0,56 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

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

Результаты и их обсуждение

По результатам испытаний на растяжение было установлено, что уровень прочности биметаллической проволоки, подвергнутой РКУП-волочению, значительно превышает данные исходной проволоки, разница составляет почти 40%. Значения предела прочности при растяжении и предела текучести увеличиваются за три прохода с 580 до 812 МПа (абсолютное увеличение составляет 232 МПа) и с 380 до 562 МПа (абсолютное увеличение составляет 182 МПа) соответственно. Увеличение значений пластических свойств биметаллической проволоки примерно на 60% связано с преимущественной ориентацией вдоль оси выступа цементитовых пластин из перлита в сердечнике из углеродистой стали; снижение пластичности при увеличении числа проходов более 3 обусловлено упрочнением ферритного компонента перлита и дроблением цементирующих пластин.

Анализ микротвердости при измерении от центра проволоки к периферии показал, что этот параметр находится в прямой зависимости от уровня накопленной деформации (количества

проходов). Чтобы оценить не только влияние деформирования методом РКУП-волочения на микротвердость деформированной проволоки, но и дать оценку ее распределения в поперечном сечении, были построены графики, показывающие степень упрочнения сердечника на разных проходах деформирования в зависимости от микротвердости исходной проволоки (рисунок 2). Как видно из графика распределения микротвердости стального сердечника, в исходном состоянии значения микротвердости одинаковы по всему сечению. С увеличением количества проходов значения микротвердости возрастают, но их распределение не совсем равномерно, они увеличиваются от центра к периферийной области. После 3 проходов деформирования среднее значение микротвердости составляет 985 МПа, при исходной микротвердости стального сердечника – 600 МПа.

Полученные значения микротвердости медной оболочки также увеличиваются после 3 проходов с 348 МПа до 663 МПа, т.е. абсолютный прирост составляет 315 МПа. Распределение микротвердости по всему сечению однородно после всех проходов. Отклонения возникают только на границе сцепления медь-сталь, значения которого составляет составляет 755 МПа. После 3 проходов деформирования прочное сцепление оболочки с сердечником, обеспечивающее целостность меди при действии на проводник знакопеременных изгибающих и растягивающих напряжений, сохраняется.

Вывод

Сочетание равноканального углового пресования с традиционным волочением в фильере позволяет повысить прочностные свойства сталемедной проволоки на 40%. Также данный совмещенный метод позволяет повысить пластические свойства проволоки, которые регламентированы

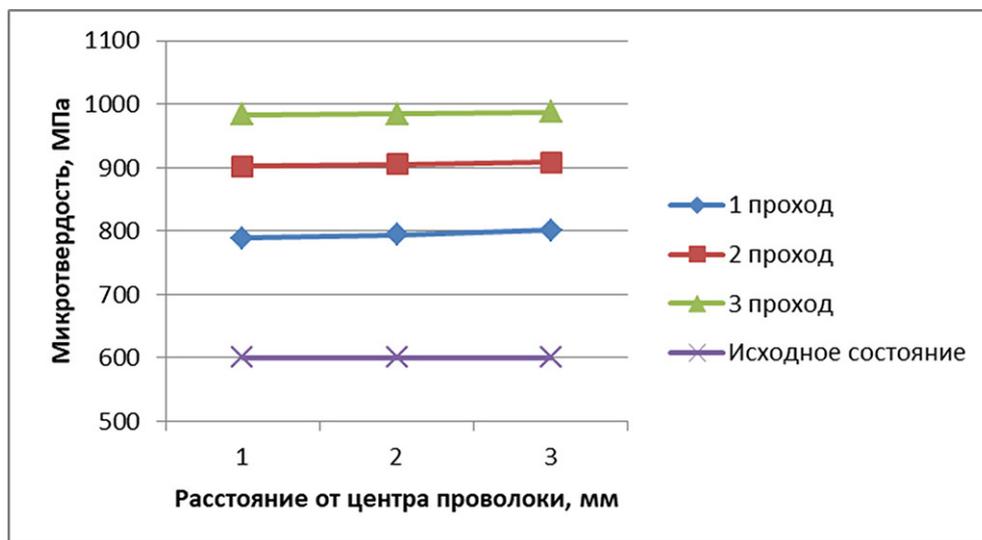


Рисунок 2 – Распределение микротвердости стального сердечника в поперечном сечении после деформирования

рядом ГОСТов. Значительное повышение пластических свойств такой композиции можно объяснить образованием уникальной структуры,

состоящей из ультрадисперсных зерен, имеющих неравновесные границы с большим углом, способные на сдвиг.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08052852).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milind T.R., Date P.P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion // International Journal of Mechanical Sciences. 2012, Vol. 56, Iss. 1, pp. 26-34.
2. Дюпин А.П., Куранова Н.Н., Пушин В.Г. и др. Влияние интенсивной пластической деформации кручением на структуру и свойства сплавов на основе никелида титана с эффектами памяти формы // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 72. – № 4. – С. 583-585.
3. Khmelevskaya I.Yu., Prokoshkin S.D., Trubitsyna I.B. Structure and properties of Ti-Ni-based alloys after equal-channel angular pressing and high-pressure torsion // Materials and Engineering A. – 2008. – V. 481-482. – pp. 119-122.
4. S. Lezhnev, A. Naizabekov, I. Volokitina, Features of change of the structure and mechanical properties of steel at ECAP depending on the initial state // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2017. – 52. – pp. 626-635.
5. Eivania A.R., Mirzakochakshirazib H.R., Jafarihana 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. Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. Application of equal-channel angular pressing to aluminum and copper single crystals // Materials Science Forum. 2007, 539-543, pp. 2853-2858.
7. V. Segal, V. Reznikov, A. Dobryshevshiy, V. Kopylov. Plastic working of metals by simple shear // Russian Metallurgy (Metally), 1981, 1, pp. 99-105.
8. R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Progress in Materials Science, 2006, 51(7), 881-981.
9. R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, Y.T. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation // JOM, 2006, 58(4), 33-39.
10. I.J. Beyerlein, L.S. Tóth, Texture evolution in equal-channel angular extrusion // Progress in Materials Science, 2009, 54(4), 427-510.
11. Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Prog Mater Sci. 2006, 51, pp.881–981.
12. Рааб Г.И., Поляков А.В., Гундеров Д.В., Валиев Р.З. Формирование наноструктуры и свойств титановых прутков, в процессе равноканального углового прессования «Conform» с последующим волочением // Металлы. – 2009. – № 5. – С. 57.
13. Волокитин А.В., Чукин М.В. Моделирование совмещенного процесса «прессование-волочение» с применением равноканальной ступенчатой матрицы // Республиканский научный журнал «Технология производства металлов и вторичных материалов». Темиртау, 2013, № 2. – С. 128-135.
14. Naizabekov A., Lezhnev S., Arbuz A., Volokitina I., Panin E., Volokitin A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling-Pressing Process // Journal of Materials Engineering and Performance. 2020, Vol. 29, Iss. 1, pp. 315-329.
15. Volokitina I.E., Volokitin A.V., Naizabekov A.B., Lezhnev S.N. Change in structure and mechanical properties of grade A0 aluminum during implementation of a combined method of ECAE-drawing deformation // Metallurgist. 2020. Vol. 63. pp. 978-983.
16. Volokitina I.E., Volokitin A.V. Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of Copper during the Pressing-Drawing Process // Physics of Metals and Metallography. 2018. Vol. 119. pp. 917-921.

«ТКБП-созу» әдісінің болат-мыс сымының механикалық қасиеттеріне әсері

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

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

¹ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич, т.ғ.к., профессор, sergey_legnev@mail.ru,

¹ФЕДОРОВА Татьяна Дмитриевна, магистр, tanyusik88@bk.ru,

¹САЛЬКО Оксана Юрьевна, магистр, salko.1990@mail.ru,

¹Рудный индустриалды институты, Қазақстан, 111500, Рудный, Қазанға 50 жыл көшесі, 38,

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

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қазіргі уақытта болат-мыс сымының микроқұрылымын оның деформациясы кезінде өзгертуге арналған аз жұмыс бар, өйткені болат пен мыс әртүрлі механикалық қасиеттерге ие болғандықтан, интерфейсында бұл металдар әртүрлі жолдармен деформациялануы мүмкін. Мақала ТКБП-созу процесінің биметалды болат-мыс сымының механикалық қасиеттеріне әсерін зерттеуге арналды. Эксперименттік зерттеулер кешені барысында болат-мыс сымдарының беріктік қасиеттерін арттыру үшін ұсынылатын үздіксіз әдісті қолданудың негізгі мүмкіндігі мен тиімділігі дәлелденді. Осылайша, мыс қабығының микро қаттылығының алынған мәндері күйдірілген Мыстың қаттылығын 315 МПа-ға арттырады, бұл ТКБП-созу әдісімен деформа-

цияланған кезде жабысуға байланысты және 663 МПа құрайды. Бастапқы күйдегі болат өзектің микроқаттылығы 600 МПа, ал үш деформациядан кейін – 985 МПа.

Кілт сөздер: механикалық қасиеттері, биметалл сымы, ТКБП-созу, микроқаттылық, созу, болат-мыс сым, болат, мыс, деформация, ТКБП.

Influence of the «ECAP-drawing» Method on the Mechanical Properties of Steel Copper Wire

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

²**VOLOKITIN Andrey**, PhD, Senior Lecturer, dyusha.vav@mail.ru,

¹**LEZHNEV Sergey**, Cand. of Tech. Sci., Professor, sergey_legnev@mail.ru,

¹**FEDOROVA Tatyana**, master, tanyusik88@bk.ru,

¹**SALKO Oksana**, master, salko.1990@mail.ru,

¹Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, 111500, Rudny, 50 years of October Street, 38,

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

*corresponding author.

Abstract. Currently, there is a small amount of work devoted to changing the microstructure of steel-copper wire during its deformation, since steel and copper have different mechanical properties, these metals can deform differently at the interface. Therefore, this study was devoted to the study of the influence of the ECAP-drawing process on the mechanical properties of bimetallic steel-copper wire. In the course of a complex of experimental studies, the principal possibility and effectiveness of using the proposed continuous method to increase the strength properties of steel-copper wire is proved. Thus, the obtained values of the microhardness of the copper shell exceed the hardness of annealed copper by 315 MPa, due to the riveting during deformation by the ECAP-drawing method and amount to 663 MPa. The microhardness of the steel core in its initial state is 600 MPa, and after three deformation passes – 985 MPa.

Keywords: mechanical properties, bimetallic wire, ECAP-drawing, microhardness, drawing, steel-copper wire, steel, copper, deformation, ECAP.

REFERENCES

1. Milind T.R., Date P.P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion // International Journal of Mechanical Sciences. 2012, Vol. 56, Iss. 1, pp. 26-34.
2. Dyupin A.P., Kuranova N.N., Pushin V.G. i dr. Vliyaniye intensivnoy plasticheskoy deformatsii krucheniem na strukturu i svoystva splavov na osnove nikelida titana s effektami pamyati formy // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2009. – T. 72. – No. 4. – pp. 583-585.
3. Khmelevskaya I.Yu., Prokoshkin S.D., Trubitsyna I.B. Structure and properties of Ti-Ni-based alloys after equal-channel angular pressing and high-pressure torsion // Materials and Engineering A. – 2008. – V. 481-482. – pp. 119-122.
4. S. Lezhnev, A. Naizabekov, I. Volokitina, Features of change of the structure and mechanical properties of steel at ECAP depending on the initial state // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2017. – 52. – pp. 626-635.
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. Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. Application of equal-channel angular pressing to aluminum and copper single crystals // Materials Science Forum. 2007, 539-543, pp. 2853-2858.
7. V. Segal, V. Reznikov, A. Dobryshevshiy, V. Kopylov. Plastic working of metals by simple shear // Russian Metallurgy (Metally), 1981, 1, pp. 99-105.
8. R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Progress in Materials Science, 2006, 51(7), 881-981.
9. R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, Y.T. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation // JOM, 2006, 58(4), 33-39.
10. I.J. Beyerlein, L.S. Tóth, Texture evolution in equal-channel angular extrusion // Progress in Materials Science, 2009, 54(4), 427-510.
11. Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Prog Mater Sci. 2006, 51, pp. 881-981.
12. Raab G.I., Polyakov A.V., Gunderov D.V., Valiev R.Z. Formirovaniye nanostruktury i svoystv titanovykh prutkov, v processe ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya «Conform» s posleduyushchim volocheniem // Metally. – 2009. – No. 5. – P. 57.
13. Volokitina A.V., CHukin M.V. Modelirovaniye sovmeshchennogo processa «pressovanie-volochenie» s primeneniem ravnokanal'noj stupenchatoj matricy // Respublikanskij nauchnyj zhurnal «Tehnologiya proizvodstva metallov i vtorichnyh materialov». Temirtau, 2013, no. 2. – pp. 128-135.
14. Naizabekov A., Lezhnev S., Arbuz A., Volokitina I., Panin E., Volokitin A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling-Pressing Process // Journal of Materials Engineering and Performance. 2020, Vol. 29, Iss. 1, pp. 315-329.
15. Volokitina I.E., Volokitin A.V., Naizabekov A.B., Lezhnev S.N. Change in structure and mechanical properties of grade A0 aluminum during implementation of a combined method of ECAE-drawing deformation // Metallurgist. 2020. Vol. 63. pp. 978-983.
16. Volokitina I.E., Volokitin A.V. Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of Copper during the Pressing-Drawing Process // Physics of Metals and Metallography. 2018. Vol. 119. pp. 917-921.