

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 4, Number 314 (2017), 41 – 47

UDC 621.771

A.B. Nayzabekov¹, I.E. Volokitina²¹Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan;²Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstanirinka.vav@mail.ru**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE ECAP ON
THE EVOLUTION OF THE MICROSTRUCTURE OF COPPER**

Abstract. The influence of intense plastic deformation by the method of equal channel angular pressing on the transformation of the structure and the change in the properties of technically pure copper of grade M1 is studied. After six cycles of equal-channel angular pressing at room temperature, a considerable refinement of the grain structure and an increase in the strength characteristics of copper occurs. It is established, that subsequent heating up to 160 °C allows preserving the ultrafine-grained structure, and heating up to 220°C leads to the formation in the copper sample of a completely recrystallized structure. The grain size is 10 - 20 microns, which is in 5 times smaller than the original structure before to ECAP. The obtained metallographic studies confirmed by mechanical tests on the microhardness.

Keywords: microstructure, ECA-pressing, copper, microhardness.

УДК 621.771

А.Б. Найзабеков¹, И.Е. Волокитина²¹Рудненский индустриальный институт, Рудный, Қазақстан;²Қарағандық мемлекеттік индустриалдык университет, г.Теміртау, Қазақстан**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РКУП НА ЭВОЛЮЦИЮ
МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДИ**

Аннотация. Исследовано влияние интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования на трансформацию структуры и изменение свойств технической чистой меди марки М1. После шести циклов равноканального углового прессования при комнатной температуре происходит значительное измельчение зеренной структуры и повышение прочностных характеристик меди. Установлено, что последующий нагрев до 160°C позволяет сохранить ультрамелкозернистую структуру, а нагрев до 220°C приводит к формированию в образце меди полностью рекристаллизованной структуры. Размер зерен составляет 10 – 20 мкм, что в 5 раз мельче, чем исходная структура до РКУП. Полученные металлографические исследования подтверждаются механическими испытаниями на микротвердость.

Ключевые слова: микроструктура; РКУ-прессование, медь, микротвердость.

Введение

Для осуществления планов, стоящих перед экономикой РК, в том числе по проведению выставки ЕХРО-2017, необходимо обеспечение основных отраслей промышленности качественной металлопродукцией. Среди материалов, используемых промышленности, медь и её сплавы занимают особое место благодаря удачному сочетанию высоких технологических и эксплуатационных характеристик. Непрерывно увеличивающаяся потребность в этих материалах предъявляет всё более жёсткие требования к продукции, определяет необходимость выпуска новых сплавов со специальными свойствами и узкими пределами допусков по содержанию компонентов и примесей, а также производство прецизионного проката.

В последние десятилетия интенсивно развивается новое направление в материаловедении и обработке материалов, заключающееся в формировании в металлах и сплавах ультрадисперсных структурных состояний с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД) [1-4]. Это позволяет резко повысить удельную прочность в области эксплуатационных температур, при этом в области температур обработки давлением существенно повышается технологическая пластичность. На базе этого направления можно создать принципиально новый комплекс физико-химических и механических свойств в обычных промышленных материалах [5-7].

Равноканальное угловое прессование (РКУП) в настоящее время является наиболее широко используемым методом ИПД [8-12]. Хотя на сегодняшний день существует много исследовательских работ, направленных на изучение процессов ИПД, но до сих пор осталось большое количество вопросов посвященных получению комплекса необходимых механических свойств металлических материалов после РКУП. Данная проблема основана на том, что при мегапластической деформации материал сильно упрочняется, но исчерпывает запас пластичности и в результате чего охрупчивается, что затрудняет возможность его практического применения в промышленности. Использование термической обработки позволит повысить пластичность и ударную вязкость такого материала [13-15]. Подбор оптимального режима термомеханического упрочнения методом РКУП в ступенчатой матрице необходимо производить индивидуально для каждого металлического материала, так как в разных материалах протекание процессов измельчения структуры и рекристаллизации различно [16-18].

Несмотря на все свои преимущества, процесс РКУП до сих пор не реализован в промышленных масштабах, и его исследование носит сугубо лабораторный характер. Также данный метод достаточно сложен технологически и до настоящего времени имеет очень ограниченное применение в прикладных технологических задачах. Поэтому поиски путей получения высокопрочных металлических материалов с применением дополнительных относительно простых технологий совместно с РКУП, например, таких как предварительная и окончательная термические обработки является актуальной задачей. Таким образом, актуальность статьи связана с более глубоким пониманием теоретических представлений и практических аспектов РКУП со структурообразованием с возможностью значительного расширения области применения меди за счет создания передовых технологических процессов получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов и изделий с качественно новым уровнем физико-механических свойств.

Материал и методика исследования

Медь характеризуется отсутствием полиморфных превращений, что делает ее идеальным модельным материалом для установления особенностей холодной деформации при разработке новых схем деформирования. Поэтому для эталонного модельного материала используем технически чистую медь марки М1. Так в меди нет ни полиморфного, ни мартенситного превращений предварительную термическую обработку можно исключить.

Образцы квадратного сечения $15 \times 15 \times 70$ мм подвергали РКУП в обычной ступенчатой матрице углом стыка каналов 125° [19] по маршруту Вс с кантовкой заготовки на 90° вокруг продольной оси [20] при комнатной температуре. Трение между инструментом и заготовкой снижалось применением пальмового масла в качестве лубриканта.

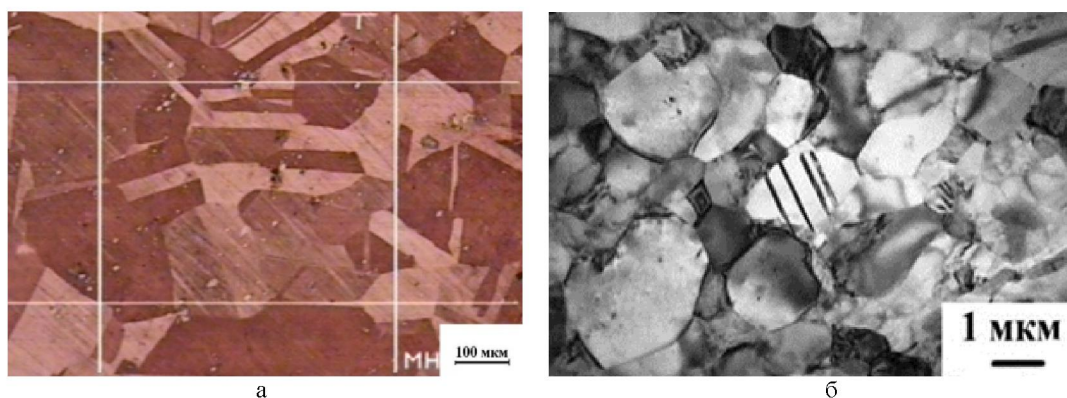
После РКУП проводили окончательную термическую обработку, так как неустойчивая структура пластически деформированного металла стремится освободиться от искажений кристаллической решетки и запаса остаточной энергии и перейти в устойчивое состояние. Также при больших степенях деформации в металле наблюдается раздробление и удлинение отдельных зерен и создается определенная их ориентация. При отжиге же деформированного металла происходит рекристаллизация, в результате чего создается качественно новая структура, т.е. образуются совершенно новые, чаще всего равноосные зерна.

Подготовка шлифов для металлографических исследований осуществлялась по стандартной методике. Обработанные образцы были изучены, используя электронный микроскоп JEM2100. Все образцы были исследованы в средней плоскости образца, чтобы избежать влияния периферийных областей. Получаемые образцы рассматривались в двух сечениях: поперечном и продольном.

Результаты исследований

На рис. 1а показана оптическая фотография микроструктуры исходной меди (катанный пруток), как видно из фотографии структура деформированной меди имеет большое количество двойников. В исходном состоянии средний размер зерна меди составлял 120 мкм; микротвердость - 580 МПа.

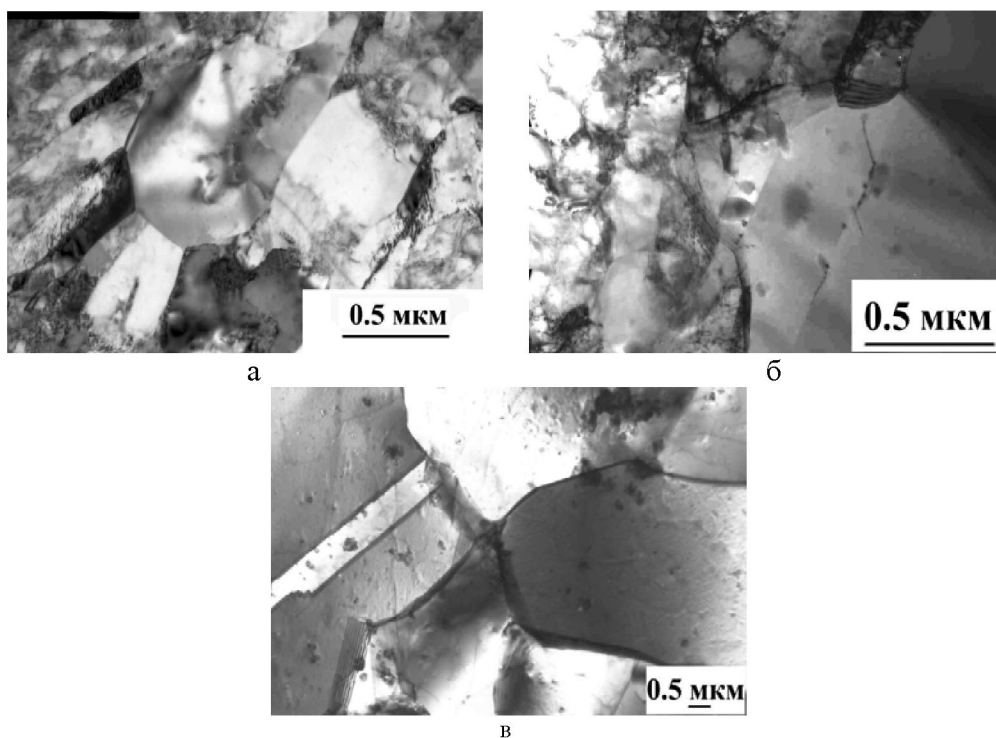
Для оценки эффективности РКУП, необходимо сравнить микроструктуру медных сплавов до и после деформирования. Изменения, происходящие в структуре меди, при РКУП были исследованы с помощью просвечивающей микроскопии (рисунок 2б).



а – исходная структура, полученная на оптическом электронном микроскопе;
б – РКУП (6 циклов), полученная на просвечивающем электронном микроскопе

Рисунок 1 - Микроструктура меди

Рассмотрим изменения, происходящие в структуре деформированной меди при нагреве на просвечивающем электронном микроскопе (рисунок 2).



а – 160°C; б – 220°C; в – 270°C

Рисунок 2 - Микроструктура меди после 6 проходов РКУП при комнатной температуре и отжига, полученная на просвечивающем электронном микроскопе

Для подтверждения металлографических исследований были проведены механические испытания на изменение микротвердости по Виккерсу на оптическом микроскопе Leica, оборудованном микротвердомером. Результаты определения микротвердости медного сплава М1 представлены в виде графика зависимости микротвердости от температуры нагрева, представленного на рисунке 3.

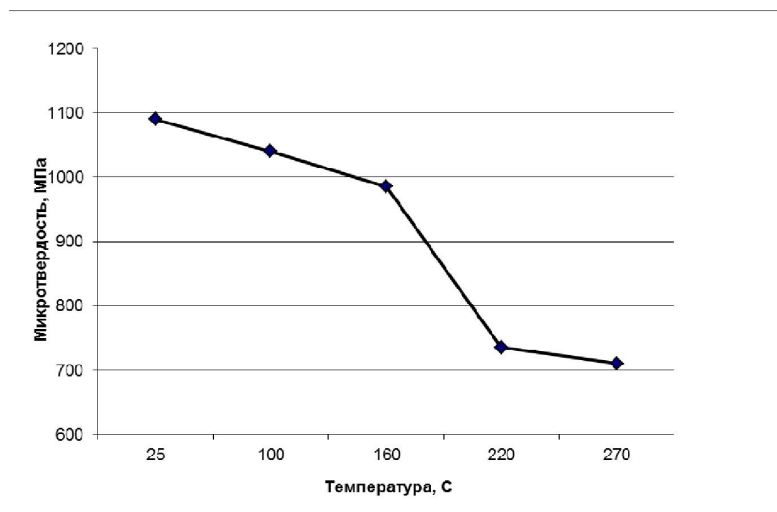


Рисунок 3 - Изменение микротвердости прессованных заготовок меди после нагрева

Обсуждение полученных результатов

Металлографический анализ меди после РКУП в ступенчатой матрице показал, что интенсивное измельчение зерна наблюдается после осуществления каждого цикла деформирования при обеих температурах прессования. На начальной стадии прессования исходные зерна ориентируются под углом к оси образца, но при этом субструктура исходных зерен не вытраивается. После третьего цикла структура представляет собой частично ячеистую, частично полигонизованную структуру. Также было обнаружено, что зеренная структура в поперечном направлении прорабатывается чуть более интенсивно, однако после осуществления 4-5 циклов прессования проработка структуры практически однородна как в поперечном, так и в продольном направлении. После 6 цикла деформирования была получена структура со средним зерном равноканальной ступенчатой матрицей, составляющей 1 мкм.

Анализ микроструктуры сплава М1 после нагрева показал, что при нагреве до 100°C не обнаружено заметного изменения структуры образца. При увеличении температуры нагрева до 160°C в структуре встречаются отдельные зерна с полосчатым контрастом на границах. Уменьшение доли зерен с внутренним сложным дислокационным контрастом указывает на некоторое снижение уровня внутренних напряжений (рисунок 2а). При дальнейшем нагреве в структуре наблюдаются единичные “зародыши” рекристаллизации размером 0,15 – 0,20 мкм, возникших на границах исходных деформированных зерен. То есть при температуре 160°C наблюдается начальная стадия рекристаллизации.

При повышении температуры отжига до 220°C в структуре образца произошли существенные изменения. При исследовании наблюдается смешанная структура, состоящая из областей, содержащих деформированные зерна и новые рекристаллизованные зерна размером 1 – 5 мкм (рисунок 2б). На границах новых рекристаллизованных зерен присутствует типичный полосчатый контраст, характерный для зерен, полученных в результате отжига.

Повышение температуры нагрева до 270°C приводит к формированию в образце меди полностью рекристаллизованной структуры (рисунок 2в). Размер зерен составляет 10 – 20 мкм. Зерна практически свободны от дислокаций. Внутри отдельных зерен видны двойники отжига.

Границы зерен имеют характерный полосчатый контраст. Дальнейший нагрев не приводит к существенному росту зерен.

Сопоставим описанные выше структурные изменения с результатами измерения микротвердости при нагреве образцов до температур 100–270°C в течение 60 мин.

Видно, что отжиг при 100°C незначительно снижает значение микротвердости образцов в среднем на 50 Мпа (с 1090 до 1040 МПа), что может быть связано с процессами возврата. После отжига при 220°C микротвердость образца снижается существенно (на 30% - 735 МПа), по сравнению с микротвердостью образцов меди с ультрамелкозернистой структурой, полученной при РКУП. Такое резкое снижение величины микротвердости свидетельствует о развитии процесса рекристаллизации, что подтверждается приведенными выше структурными наблюдениями (рисунок 2). Повышение температуры отжига до 270°C приводит к дальнейшему снижению микротвердости и к приближению ее значения к постоянной величине, характерной для полностью отожженной крупнозернистой меди (710 МПа).

За температуру начала рекристаллизации была принята температура 220°C, после которой наблюдается резкое снижение микротвердости на 305 МПа (30%), что совпадает с появлением новых рекристаллизованных зерен.

Из графика видно, что максимальная термическая устойчивость соответствует минимальной степени деформации, что соответствует диаграмме рекристаллизации меди. Это означает, что несовершенная структура, соответствующая минимальной степени деформации, совершенствуется и становится зеренной в ходе нагрева, в то время как в остальных случаях имеет место рост зерен в преимущественно зеренной структуре, сформированной в ходе деформации.

Выводы

Подтверждена известная из литературы тенденция уменьшения размера зерна при РКУП. Обнаружено, что в исходно деформированной ультрадисперсной меди дополнительное измельчение элементов структуры при деформации сдвигом под давлением происходит на стадии деформационного упрочнения. РКУП приводит к формированию ультрамелкозернистой структуры с размером структурных элементов ~1 мкм.

Также наблюдается увеличение микротвердости после РКУП. Высокие значения микротвердости и ультрамелкозернистая структура сохраняются при отжигах вплоть до 220°C. Выше этой температуры механические свойства падают, что свидетельствует о начале действия рекристаллизационных процессов. Эти данные подтверждаются результатами электронно-микроскопических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Degtyarev M.V., Chashchukhina T.I., Voronova L.M., Patselov A.M., Pilyugin V.P. (2007) Influence of the relaxation processes on the structure reformation in pure metals and alloys under high-pressure torsion, *Acta Mater.*, 55:6039–6050. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.04.017
- [2] Lezhnev S., Nayzabekov A., Volokitin A., Volokitina I. (2014) New combined process "pressing-drawing" and impact on properties of deformable aluminum wire, *Procedia Engineering*, 81: 1505 – 1510.
- [3] P. Frint, M.F.-X. Wagner, S. Weber, S. Seipp, S. Frint, T. Lampke. (2017) An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 239:222–229, doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.08.032.
- [4] Mashekova A. S. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 5:107-121. (In Russian)
- [5] Kurapov G., Orlova E., Volokitina I., Turdaliev A. (2016) Plasticity as a physical-chemical process of deformation of crystalline solids, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51:451-457
- [6] Volodin A.M., Zaikovskii V.I., Kenzhin R.M., Bedilo A.F., Mishakov I.V., Vedyagin A.A. (2017) Synthesis of Nanocrystalline Calcium Aluminate C12A7 under Carbon Nanoreactor Conditions, *Materials Letters*, 189:210-212. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.11.112
- [7] Lv Jinlongb, Luo Hongyuna, Liang Tongxiangb. (2016) Investigation of microstructure and corrosion behavior of burnished aluminum alloy by TEM, EWF, XPS and EIS techniques, *Materials Research Bulletin*, 83, doi:10.1016/j.materresbull.2016.05.013.
- [8] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Kurapov G.G., Volokitina I.E., Orlova E.P. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 2:95-102. (In Russian)
- [9] Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U., Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC, *Journal of Materials Science* 48, 2013, 4501-4509. doi:10.1007/s10853-013-7279-8.

- [10] Qu S., An X.H., Yang H.J., Huang C.X., Yang G., Zang Q.S., Wang Z.G., Wu S.D., Zhang Z.F. (2009) Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys Subjected to Equal Channel Angular Pressing, *Acta Materialia*, 5:1586-1601.
- [11] Gazder A.A., Dalla Torre F., Gu C.F., Davies C.H., Pereloma E.V. (2006) Microstructure and Texture Evolution of bcc and fcc Metals Subjected to Equal Channel Angular Extrusion, *Materials Science and Engineering*, 415:126-139.
- [12] Qu S., An X.H., Yang H.J., Huang C.X., Yang G., Zang Q.S., Wang Z.G., Wu S.D., Zhang Z.F. (2009) Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys Subjected to Equal Channel Angular Pressing, *Acta Materialia*, 5: 1586-1601.
- [13] Yanqiu Zhanga, Shuyong Jianga, Sibing Wangb, Dong Sunb, Li Hub. (2017) Influence of partial static recrystallization on microstructures and mechanical properties of NiTiFe shape memory alloy subjected to severe plastic deformation. *Materials Research Bulletin*, 88, doi:10.1016/j.mater-resbull.2016.12.042.
- [14] Lezhnev S., Volokitina I., Koinov T. (2014), Research of influence equal channel angular pressing on the microstructure of copper, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49:621-630
- [15] V.D. Sitdikov, I.V. Alexandrov, M.M. Ganiev, E.I. Fakhretdinova, G.I. Raab. (2015) Effect of temperature on the evolution of structure, crystallographic texture and the anisotropy of strength properties in the Ti grade 4 alloy during continuous ECAP, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 41:44-47.
- [16] Kyung-Tae Park, Chong Soo Lee, Dong Hyuk Shin. (2005) Strain hardenability of ultrafine grained low carbon steels processed by ECAP, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 10:133-137
- [17] Valiev R.Z., Alexandrov I.V. Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation. Logos, Moscow. ISBN: 5-9221-0582-5, (2000).
- [18] Abdulazeez T. Lawal, (2016) Synthesis and utilization of carbon nanotubes for fabrication of electrochemical biosensors, *Materials Research*, 73, 308–350, doi:10.1016/j.materresbull.2015.08.037.
- [19] Patent RF № 2181314. Ustroystvo dlya obrabotki metallov davleniyem. Raab G.I., Kulyasov G.V., Polozovskiy V.A., Valiyev R.Z., 2002. (In Russian)
- [20] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Volokitina I.E. (2015) Change in copper microstructure and mechanical properties with deformation in an equal channel stepped die, *Metal Science and Heat Treatment*, 57:5-6. DOI:10.1007/s11041-015-9870-x

REFERENCES

- [1] Degtyarev M.V., Chashchukhina T.I., Voronova L.M., Patselov A.M., Pilyugin V.P. (2007) Influence of the relaxation processes on the structure formation in pure metals and alloys under high-pressure torsion, *Acta Mater*, 55:6039–6050. DOI: 10.1016/j.actamat. 2007.04.017
- [2] Lezhnev S., Nayzabekov A., Volokitina A., Volokitina I. (2014) New combined process "pressing-drawing" and impact on properties of deformable aluminum wire, *Procedia Engineering*, 81: 1505 – 1510.
- [3] P. Frint, M.F.-X. Wagner, S. Weberl, S. Seipp, S. Frint, T. Lampke. (2017) An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 239:222–229, doi:10.1016/j.jmatprotec. 2016.08.032.
- [4] Mashekova A. S. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 5:107-121. (In Russian)
- [5] Kurapov G., Orlova E., Volokitina I., Turdaliev A. (2016) Plasticity as a physical-chemical process of deformation of crystalline solids, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51:451-457
- [6] Volodin A.M., Zaikovskii V.I., Kenzhin R.M., Bedilo A.F., Mishakov I.V., Vedyagin A.A. (2017) Synthesis of Nanocrystalline Calcium Aluminate C12A7 under Carbon Nanoreactor Conditions, *Materials Letters*, 189:210-212. DOI: 10.1016/j.matlet. 2016.11.112
- [7] Lv Jinlongb, Luo Hongyuna, Liang Tongxiangb. (2016) Investigation of microstructure and corrosion behavior of burnished aluminum alloy by TEM, EWF, XPS and EIS techniques, *Materials Research Bulletin*, 83, doi:10.1016/j.materresbull. 2016.05.013.
- [8] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Kurapov G.G., Volokitina I.E., Orlova E.P. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 2:95-102. (In Russian)
- [9] Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U, Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC, *Journal of Materials Science* 48, 2013, 4501-4509. doi:10.1007/s10853-013-7279-8.
- [10] Qu S., An X.H., Yang H.J., Huang C.X., Yang G., Zang Q.S., Wang Z.G., Wu S.D., Zhang Z.F. (2009) Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys Subjected to Equal Channel Angular Pressing, *Acta Materialia*, 5:1586-1601.
- [11] Gazder A.A., Dalla Torre F., Gu C.F., Davies C.H., Pereloma E.V. (2006) Microstructure and Texture Evolution of bcc and fcc Metals Subjected to Equal Channel Angular Extrusion, *Materials Science and Engineering*, 415:126-139.
- [12] Qu S., An X.H., Yang H.J., Huang C.X., Yang G., Zang Q.S., Wang Z.G., Wu S.D., Zhang Z.F. (2009) Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys Subjected to Equal Channel Angular Pressing, *Acta Materialia*, 5: 1586-1601.
- [13] Yanqiu Zhanga, Shuyong Jianga, Sibing Wangb, Dong Sunb, Li Hub. (2017) Influence of partial static recrystallization on microstructures and mechanical properties of NiTiFe shape memory alloy subjected to severe plastic deformation. *Materials Research Bulletin*, 88, doi:10.1016/j.mater-resbull. 2016.12.042.
- [14] Lezhnev S., Volokitina I., Koinov T. (2014), Research of influence equal channel angular pressing on the microstructure of copper, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49:621-630

[15] V.D. Sitdikov, I.V. Alexandrov, M.M. Ganiev, E.I. Fakhretdinova, G.I. Raab. (2015) Effect of temperature on the evolution of structure, crystallographic texture and the anisotropy of strength properties in the Ti grade 4 alloy during continuous ECAP, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 41:44-47.

[16] Kyung-Tae Park, Chong Soo Lee, Dong Hyuk Shin. (2005) Strain hardenability of ultrafine grained low carbon steels processed by ECAP, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 10:133-137

[17] Valiev R.Z., Alexandrov I.V. Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation. Logos, Moscow. ISBN: 5-9221-0582-5, (2000).

[18] Abdulazeez T. Lawal, (2016) Synthesis and utilization of carbon nanotubes for fabrication of electrochemical biosensors, *Materials Research*, 73, 308–350, doi:10.1016/j.materresbull.2015.08.037.

[19] Patent RF № 2181314. Ustroystvo dlya obrabotki metallov davleniyem. Raab G.I., Kulyasov G.V., Polozovskiy V.A., Valiyev R.Z., 2002. (In Russian)

[20] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Volokitina I.E. (2015) Change in copper microstructure and mechanical properties with deformation in an equal channel stepped die, *Metal Science and Heat Treatment*, 57:5-6. DOI: 10.1007/s11041-015-9870-x

ӘОЖ: 621.771

А.Б. Найзабеков¹, И.Е. Волокитина²

¹Рудный индустриальный университет, Рудный к., Қазақстан;

²Қарағанды мемлекеттік индустриялық университеті, Теміртау к., Қазақстан

E-mail: irinka.vav@mail.ru

МЫС МИКРОҚҰРЫЛЫМНЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫНА ТҚББ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аннотация. М1 маркалы техникалық таза мыстың қасиеттерінің өзгерісі және құрылымның трансформациясына тенканалды бұрышты баспалау әдісімен қарқынды илемді деформациялау әсері зерттелді. Тенбұрышты баспалауды алты циклдерінен кейін бөлмелі температурада мыстың түйіршікті құрылысы маңызды ұсатуы өтеді және беріктік сипаттамалары жоғарылайды. Келесі қыздыру 160°C дейін ұсақ түйіршікті құрылымды сақтауға мүмкіндік береді, ал 220°C-қа дейін қыздыру мыстың үлгісінде толығымен кристалданған құрылымды құрастыруға алып келуі орнатылған. Түйіршіктердің өлшемі 10 – 20 мкм-ді құрайды, ТҚББқа дейін бастапқы құрылымға қарағанда 5 есе уағырақ. Алынған металлографиялық зерттеулер микроқаттылыққа механикалық сынаулармен расталады.

Түйін сөздер: микроқұрылым, ТҚБ-баспалау, мыс, микроқаттылық.

Сведения об авторах:

Найзабеков А.Б. - Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан, д.т.н, профессор, +7701311686, info@rii.kz

Волокитина И.Е. - Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Теміртау, Казахстан, докторант PhD, магистр, +77477115005, irinka.vav@mail.ru