

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

ISSN 2224-5227

Volume 2, Number 312 (2017), 103 – 109

UDC 621.771

**S.N. Lezhnev<sup>1</sup>, G.G. Kurapov<sup>2</sup>, A.V. Volokitin<sup>2</sup>, I.E. Volokitina<sup>1</sup>, A.E. Uderbaeva<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan;<sup>2</sup>K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan[sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru), [kurapov1940@mail.ru](mailto:kurapov1940@mail.ru),[dyusha.vav@mail.ru](mailto:dyusha.vav@mail.ru), [irinka.vav@mail.ru](mailto:irinka.vav@mail.ru)**THE EVOLUTION OF THE MICROSTRUCTURE OF STEEL  
AT THE COMBINED PROCESS OF "PRESSING-DRAWING"**

**Abstract.** Based on a comprehensive analysis of the existing schemes of plastic structure formation, as well as the perspective directions of their development, a combined continuous process of "pressing-drawing" with the use of equal channel step die was proposed, which allows obtaining wire with an ultrafine structure, required dimensions and cross-sectional shape at insignificant amount of deformation cycles; it also removes restrictions on the length of the initial workpiece, and hence allows obtaining finished products to a few tens of meters in length.

The aim of this work is to study the impact of the new combined process of plastic deformation "pressing-drawing" on the structure. Research material is a steel wire.

Carried out researches have shown that the proposed combined method of deformation "pressing-drawing" has a substantial advantage over existing steel wire production technology. This method of deformation due to the combining two ways: severe plastic deformation in equal channel step die and drawing process through a draw die, allows obtaining steel wire with ultrafine structure, the required size and cross-sectional shape with an insignificant amount of deformation cycles. We would like to note that this method of deformation when introducing it into production does not require significant economic investments and substantial refitting of existing drawing mills.

**Keywords:** pressing-drawing, die, wire, microstructure, steel.

УДК 621.771

**С.Н. Лежнев<sup>1</sup>, Г.Г. Курапов<sup>2</sup>, А.В. Волокитин<sup>2</sup>, И.Е. Волокитина<sup>1</sup>, А.Е. Удербаева<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан;<sup>2</sup>Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К.И. Сатпаева,  
г. Алматы, Казахстан**ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ ПРИ  
СОВМЕЩЕННОМ ПРОЦЕССЕ «ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ»**

**Аннотация.** На основе комплексного анализа существующих схем пластического структурообразования, а также с учетом перспективных направлений их развития, предложен непрерывный совмещенный процесс «прессование-волочение» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы, который позволяет получать проволоку с ультрамелко-зернистой структурой, требуемых размеров и формы поперечного сечения при незначительном количестве циклов деформирования, а так же снимает ограничения по длине исходной заготовки, и, следовательно, позволяет получать готовые изделия длиной до нескольких десятков метров.

Целью данной работы является исследование влияния нового совмещенного процесса пластической деформации «прессование-волочение» на структуру. Материалом исследования является стальная проволока.

Проведенные исследования показали, что предлагаемый совмещенный способ деформирования «прессование-волочение» обладает существенным преимуществом по сравнению с действующей технологией

производства стальной проволоки. Данный способ деформирования за счет совмещения двух способов: интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения через волоку, позволяет получать стальную проволоку с ультрамелкозернистой структурой, требуемых размеров и формы поперечного сечения при незначительном количестве циклов деформирования. Так же хочется отметить, что данный способ деформирования при внедрении его в производство не требует значительных экономических вложений и существенного переоборудования существующих волочильных станков.

**Ключевые слова:** прессование-волочение, матрица, проволока, микроструктура, сталь.

### **Введение**

Одно из наиболее перспективных направлений повышения прочностных и пластических свойств металлов – это формирование ультрамелкозернистой структуры в материалах методами интенсивной пластической деформации [1-3]. Однако, несмотря на многочисленные разработки, большинство современных способов реализации интенсивной пластической деформации в объеме деформируемого металла обладает рядом существенных ограничений в аспекте непрерывности и производительности технологических схем [4-9].

Проблема ресурсосберегающих способов получения материалов со свойствами, сочетающими одновременно высокую прочность и пластичность, в условиях использования относительно простых и недорогих устройств, позволяющих затрачивать минимально возможное количество времени при обработке изделий является весьма актуальной. Уже известны некоторые результаты применения методов интенсивной пластической деформации (ИПД) в машиностроительной, медицинской промышленности, позволившие снизить затраты на энергетические ресурсы на 20-30% [10-14].

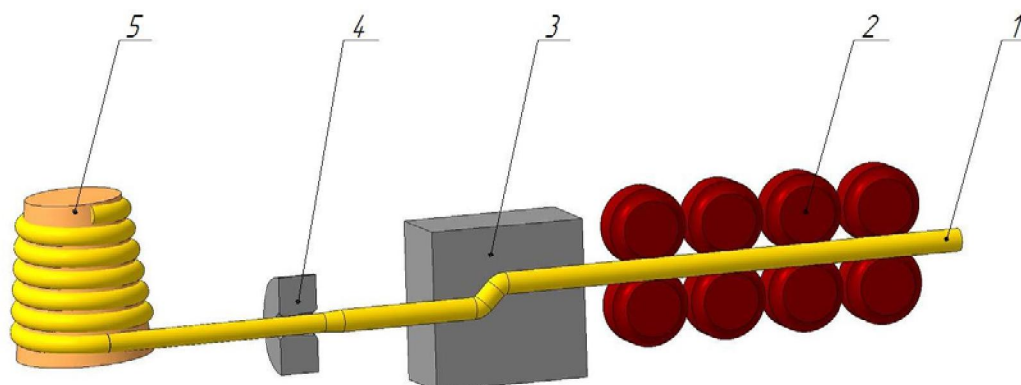
Традиционные технологии деформирования, такие как волочение и холодная прокатка также сопровождаются измельчением структуры. Однако, в основном, субструктура имеет ячеистый характер с зёрнами удлинёнными в направлении волочения или прокатки, также, содержащая высокую долю малоугловых границ [15]. С другой стороны, материал, полученный ИПД, содержит зернистую структуру, с относительно мелкими зёрнами, с высокими углами разориентировки. Данный факт также благоприятно сказывается на динамике рекристаллизации, и таким образом на термостабильности. К тому же, часто ИПД проходит при низких температурах (окружающей среды), что делает ее более привлекательной.

Наиболее успешным методом ИПД на сегодняшний день является метод равноканального углового прессования/экструзии (РКУП/РКУЭ) [16-18]. Данный процесс имеет огромный потенциал для получения УМЗ структуры с однородной равноосной структурой с границами зёрен, в которых преобладает высокоугловая разориентировка. При этом методе заготовка сохраняет изначальные размеры. Также важно отметить то, что для получения заданной структуры, необходимо выбирать определенные маршруты между проходами. Однако недостаток процесса состоит в его дискретности, т.е. невозможности обработки изделий относительно большой длины из-за потери устойчивости давящим пуансоном. Следовательно, есть возможность устранения данного недостатка и вести процесс непрерывно.

На основе комплексного анализа существующих схем пластического структурообразования, а также с учетом перспективных направлений их развития [19-20], был предложен новый совмещенный процесс «прессование-волочение» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы (рисунок 1), позволяющий получать проволоку с ультрамелкозернистой структурой и повышенным уровнем механических свойств, требуемых размеров и формы поперечного сечения при незначительном количестве циклов деформирования.

### **Методы исследования**

Суть предлагаемого способа деформирования заключается в следующем. Проволока задается в задающее устройство 2, которое обеспечивает заталкивание проволоки в равноканальную ступенчатую матрицу и проталкивание проволоки через ее каналы, а затем последовательно в калибрующую волоку. По своей сути процесс задачи металла не отличается от задачи проволоки в волоку при стандартном процессе волочения. После того, как конец заготовки выйдет из волоки он закрепляется с помощью захватывающих клещей и наматывается на барабан волочильного стана.



1 – проволока; 2 – задающее устройство; 3 - равноканальная ступенчатая матрица;  
4 – волока в волокодержателе; 5 – барабан наматывающий

Рисунок 1 - Схема совмещенного процесса прессование-волочение

Целью настоящей работы является исследование влияния совмещенного процесса «прессование-волочение» на структуру стальной проволоки.

Для достижения поставленной цели был проведен лабораторный эксперимент на промышленном волочильном стане В – I/550 М. Для этого перед волокой была закреплена равноканальная ступенчатая матрица с диаметром каналов равном 7 мм и углом стыка каналов матрицы равном  $135^{\circ}$ . Матрица была расположена в контейнере для смазки (рисунок 2).

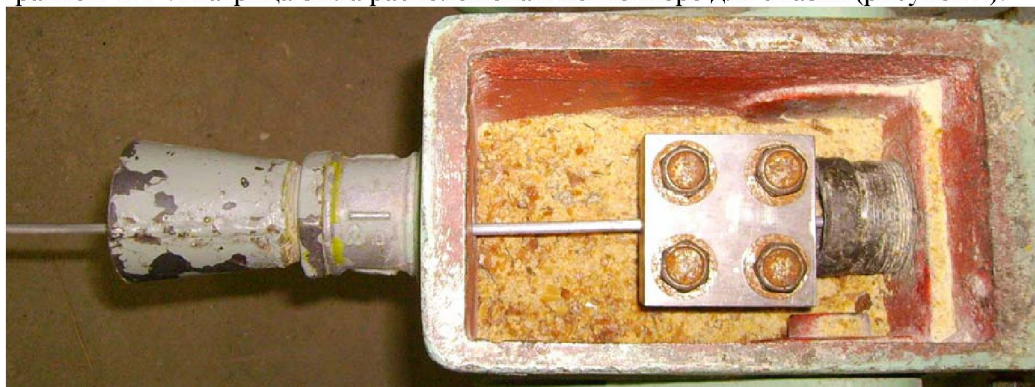


Рисунок 2 – Установка равноканальной ступенчатой матрицы

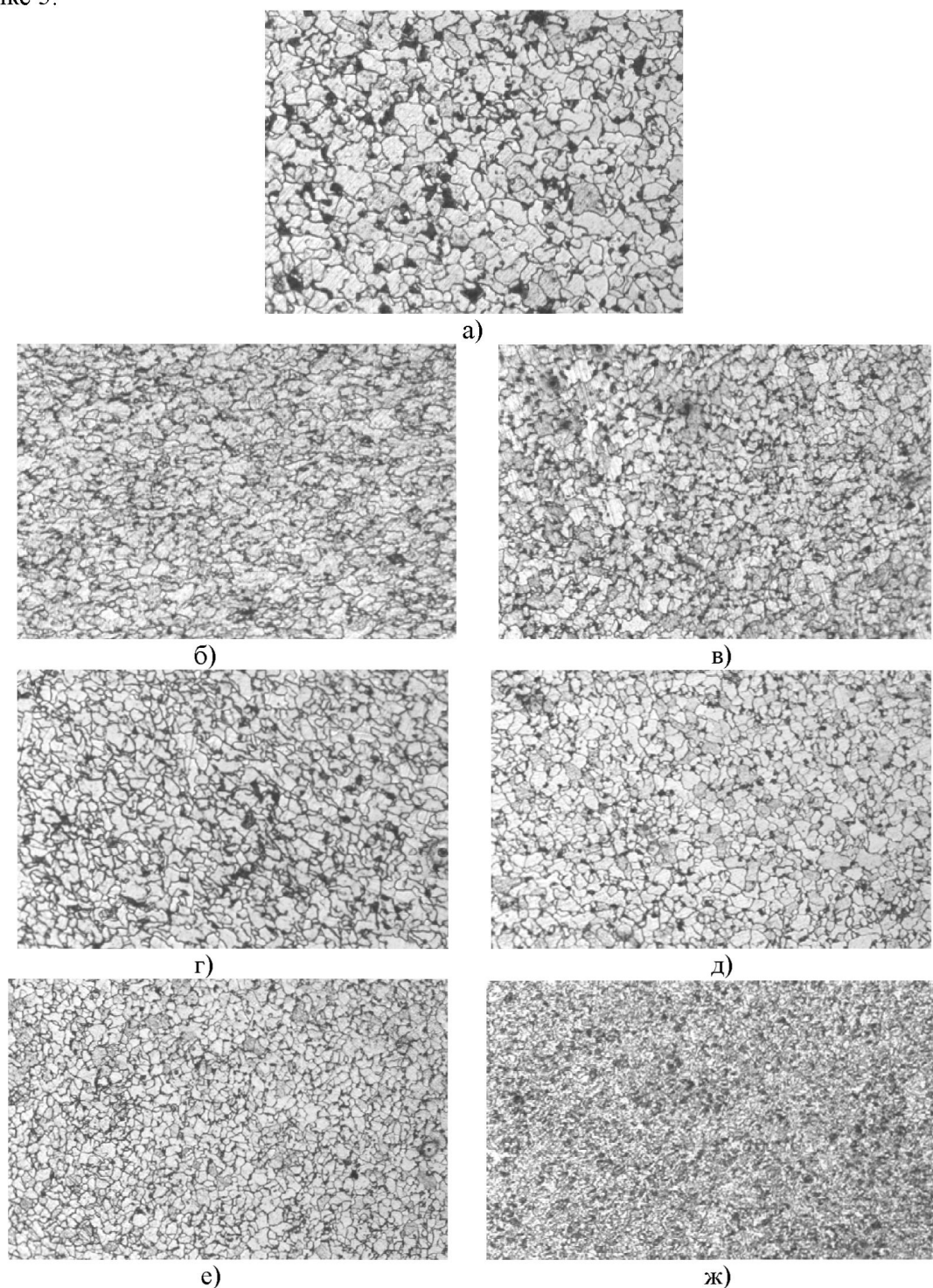
Волочение отожженной проволоки из стали марки 3 производилось следующим образом: с бунтодержателя бунт катанки был уложен на фигурок, нижний конец заготовки с помощью острильного станка был заострен. Заостренный конец заготовки протолкнули через равноканальную ступенчатую матрицу и волоку, установленную в волокодержателе и осуществили ее захват заправочными клещами, крюк которых введен в один из пазов на барабане. После набора на барабане 5-7 витков проволоки, стан был остановлен. Начальный диаметр проволоки составлял 7,0 мм. После процесса прессование-волочение диаметр проволоки составил 6,0 мм. Все обжатие было осуществлено только в волоке, после выхода заготовки из равноканальной ступенчатой матрицы диаметр проволоки оставался без изменения и составлял 7,0 мм. Эксперимент был продублирован три раза. При этом после каждого опыта производили измерение диаметра проволоки и вырезка темплетов для изготовления микрошлифов в поперечном и продольном направлении.

Для выявления преимущества предлагаемой технологии по сравнению с действующими технологиями волочения было проведено по три прохода отожженной проволоки из стали 3 по каждой технологии. Т.е. осуществляли чистое волочение катанки диаметром 7,0 мм в волоке на диаметр 6,0 мм, равноканальное угловое волочение и совмещенный процесс «прессование-волочение». При этом так же после каждого опыта производили измерение диаметра проволоки и

вырезку темплетов для изготовления микрошлифов в поперечном и продольном направлении. В качестве смазки использовали стружку мыла.

### Результаты исследования

Результаты исследования микроструктуры стали 3, до и после деформирования представлены на рисунке 3.



а – исходная структура; б, в – по действующей технологии волочения (продольное направление б), поперечное направление в); г, д – технология РКУВ (продольное направление г), поперечное направление д); е, ж – по предлагаемой технологии РКУВ-В (продольное направление е), поперечное направление ж).

Рисунок 3 - Структура проволоки из стали марки Ст.3,  $\times 100$

Проведя металлографический анализ деформированных образцов можно сделать вывод о том,

что холодная деформация при волочении по действующей технологии с умеренным и высоким суммарным обжатием (от 50 до 85% - в зависимости от размеров сечения) приводит к образованию ярко выраженной текстурованной структуры. Однако даже в результате значительных обжатий, полученных проволокой в процессе волочения, не все зерна измельчаются и оказываются развернутыми в направлении оси деформации. Как показывает металлографический анализ образцов, в результате неравномерного распределения деформации по поперечному сечению в центральной части продольного сечения проволоки сохраняется зона крупных зерен, следствием чего является ненадлежащий уровень пластических свойств готовой проволоки, в частности относительного удлинения. Так из рисунка 3 б, видно, что в данном случае деформирование приводит к незначительному измельчению зерна в поперечном направлении, в продольном направлении зерна удлиняются и несколько утончаются с образованием видимой аксиальной текстуры. Также можно отметить, что в продольном направлении деформированных образцов текстура ярко выражена и имеет полосчатый характер. Появление текстуры волочения приводит к анизотропии свойств материала в продольном и поперечном направлениях, что может негативно сказаться на параметрах эксплуатации готового изделия. Чтобы уменьшить проявления аксиальной текстуры деформации необходимо проводить рекристаллизационный отжиг полученной проволоки при грамотно выбранных параметрах термообработки.

В результате металлографического анализа образцов, полученных после РКУВ можно сделать вывод о равномерной проработке структуры, как в продольном, так и в поперечном сечении (рисунок 3 г, д)). Недостатком такого метода является оваллизация проволоки.

При использовании предлагаемой технологии деформирования, т.е. совмещенного процесса «прессование-волочение», как видно из таблицы 1 и рисунка 3 е) ж), уже за три прохода произошло существенное изменение исходной микроструктуры, при этом значительно в меньшей степени выражена текстура, а соответственно и анизотропия. Предлагаемая совмещенная технология «прессование-волочение» устраняет недостатки процесса волочения. На первой стадии волочения до обжатия 30-40% формируется ячеистая структура. В результате разворота и дробления неблагоприятно ориентированных цементитных пластин повышается плотность дислокаций на поверхностях раздела фаз, увеличиваются искажения второго рода. Локальное увеличение поля внутренних напряжений (локальный перенаклеп ферритной матрицы) вызывает образование устойчивых микротрещин. Интенсивное раскрытие стабильных микродефектов приводит к релаксации напряжений, что в процессе последующей деформации открывает ранее заблокированные источники Франка-Рида. Одновременно совершенствуется ячеистая структура, возникает волокнистое строение и формируется текстура. Добиться ультрамелкозернистой структуры только за счет однородного потока дислокаций нельзя: по мере накопления пластической деформации и роста плотности дислокаций происходит непропорционально быстрое увеличение стопоров и препятствий, тормозящих их продвижение по кристаллу. Дислокационный поток постепенно истощается, уровень внутренних напряжений повышается. Так продолжается до тех пор, пока не начинают возникать трещины, происходит хрупкое разрушение образца. Чтобы этого не произошло, и подводимая к образцу энергия не накапливалась в материале преимущественно в виде упругих искажений, а продолжала диссипировать, применим равноканальную ступенчатую матрицу, где будут проходить сдвиговые деформации и образовываться большеугловые границы, в результате этого создаются условия для продолжения пластической деформации при больших значениях деформаций.

### **Выводы:**

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что предлагаемый совмещенный способ деформирования «прессование-волочение» обладает существенным преимуществом по сравнению с ранее известными способами получения металла с ультрамелкозернистой структурой, так как данный способ деформирования за счет совмещения двух способов: интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения через волоку, позволяет получать заготовки (стальную проволоку) требуемых размеров и формы поперечного сечения, обладающие ультрамелкозернистой структурой при незначительном количестве циклов, а так же снимает ограничения по длине исходной заготовки, а следовательно

позволяет получать готовые изделия длиной до нескольких десятков метров.

Так же хочется отметить, что данный способ деформирования при внедрении его в производство не требует значительных экономических вложений и может быть внедрен на промышленных предприятиях Республики Казахстан по производству проволоки так, как он не требует переоборудования существующих волочильных станков. Так как для реализации данного совмещенного процесса требуется только добавление в конструкцию оборудования специально изготовленной равноканальной ступенчатой матрицы, предназначенной для протягивания через нее материала.

## REFERENCES

- [1] Nayzabekov 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
- [2] 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
- [3] Slesarenko V. Yu., Gunderov D. A., Ulyanov P. G., Valiev R. Z. (2014) Formation of amorphous states in  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  alloy subjected to severe plastic deformation, *Nanoglass issue, IOP Conf. Series, Materials Science and Engineering*. P63. DOI:10.1088/1757-899X/63/1/012166
- [4] Valiev R.Z., Raab G.I., Murashkin M.Yu. (2008) Using methods of severe plastic deformation to produce bulk nanostructured metals and alloys, *Forging and stamping production*, 11:5-12. (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] 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
- [7] Valiev R.Z., Alexandrov I.V. (2000) Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation. Logos, Moscow. ISBN: 5-9221-0582-5 (In Russian)
- [8] Mashekov S. A., Absadykov B. N., Akimbekova M. M., Masheкова A. S. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 361:155-165. (In Russian)
- [9] Zadorozhnyy V.Yu., Menjo M., Zadozozhnyy M., Kaloshkin S.D., Louzguine-Luzgin D.V. (2013) Hydrogen Sorption Properties of Nanostructured Bulk  $Mg_2Ni$  Intermetallic Compound, *Journal of Alloys and Compounds*, 57:5-6. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.12.020
- [10] Valiev R.Z., Raab G.I., Murashkin M.Yu. (2008) Using methods of severe plastic deformation to produce bulk nanostructured metals and alloys, *Forging and stamping production*, 11:5-12. (In Russian)
- [11] Kochanov D.I. Nanomaterials and nanotechnology for mechanical engineering: current state and prospects of application, *RHYTHM*, 8:16-21. (In Russian)
- [12] Nazarov A.A., Mulyukov R.R. (2002) *Nanoscience, Engineering and Technology Handbook*, 22:22-41.
- [13] Lezhnev S., Naizabekov A., Panin E., Volokitina I. (2014) Influence of combined process "rolling-pressing" on microstructure and mechanical properties of copper. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, Nagoya, Japan. P.155.
- [14] 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.
- [15] Valiev R.Z., Alexandrov I.V. (2000) Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation. Logos, Moscow. ISBN: 5-9221-0582-5 (In Russian)
- [16] Nayzabekov 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)
- [17] 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
- [18] Kawasakia M., Horitab Z., Langdona T. G. (2009) Microstructural Evolution in High Purity Aluminum Processed by ECAP, *Materials Science and Engineering A*, 2:143-150
- [19] Naizabekov A.B., Panin E.A., Volokitina I.E. (2014) Influence of combined process "rolling-pressing" on microstructure and mechanical properties of copper, *Procedia Engineering*, 81:1499-1505
- [20] Fakhretdinova E.I., Raab G.I., Ganiev M.M. (2015) Development of force parameters model for a new severe plastic deformation technique – Multi-ECAP-Conform, *Applied Mechanics and Materials*, 698:386-390.

ӨОЖ: 621.771

С.Н. Лежнев<sup>1</sup>, Г.Г. Курапов<sup>2</sup>, А.В. Волокитин<sup>3</sup>, И.Е. Волокитина<sup>4</sup>, Удербасва А.Е.<sup>5</sup>

<sup>1,4</sup>Қарағанды мемлекеттік индустриалық университеті, Теміртау қ., Қазақстан;  
<sup>2,3,5</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

### «БАСПАЛАУ-СОЗУ» БІРЛЕСКЕН ПРОЦЕСІНДЕ ИКРОҚҰРЫЛЫМЫ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

**Аннотация.** Қазіргі кезде бізге белгілі пластикалық құрылым түзілу схемаларын кешенді түрде талдау негізінде, сондай-ақ олардың дамуындағы келешегі зор бағыттарды ескеріп, аз деформациялау циклдерінде ультраұсақтүйіршікті құрылымға ие, көлденең қимасының қажетті өлшемдері мен пішіндерін алуға мүмкіндік беретін, сондай-ақ бастапқы дайындаманың ұзындығы бойынша қойылатын шектеулерді алып тастайтын және осы арқылы ұзындығы ондаған метрлерге дейін жететін дайын бұйымдарды алуға мүмкіндік туғызатын тең арналы сатылы матрицаны қолдана отырып үздіксіз «баспалау-созу» біріккен деформациялау тәсілі ұсынылды.

Өткізілген зерттеулер ұсынылып отырған «баспалау-созу» үрдістерін біріктіру арқылы деформациялау болат сымдарды өндірудің қолданыстағы технологиясымен салыстырғанда айтарлықтай артықшылықтарға ие екендігін көрсетті. Аталған деформациялау тәсілі тең арналы сатылы матрицада қарқынды пластикалық деформациялау мен созығыш арқылы созу процестерін біріктіру есебінен аз деформациялау циклдерінде ультраұсақтүйіршікті құрылымға ие, көлденең қимасының қажетті өлшемдері мен пішіндері сақталған болат сымдарды алуға мүмкіндік береді. Мұнымен қоса, аталған деформациялау тәсілін өндіріске енгізу айтарлықтай экономикалық салымдарды талап етпейді және процесі Қазақстан Республикасының сым өндірумен айналысатын өнеркәсіптік кәсіпорындарына енгізуге болады, себебі процесс қолданыстағы созу стандартын қайта жабдықтауды қажет етпейді, тек арнасынан материалды тартып созуға арналған арнайы тең арналы сатылы матрицаны созу станының конструкциясына қосу жеткілікті.

**Түйін сөздер:** баспалау-созу, матрица, сым, микроқұрылым, болат.

#### Сведения об авторах:

Лежнев С.Н. - Карагандинский государственный индустриальный университет, доцент кафедры ОМД, к.т.н., +77017725358 [sergey\\_legnev@mail.ru](mailto:sergey_legnev@mail.ru)

Курапов Г.Г. - Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, к.х.н., асс. профессор, +77762861940, [kurapov1940@mail.ru](mailto:kurapov1940@mail.ru)

Волокитин А.В. - Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, докторант PhD, магистр, +77012509363, [dvusha.vav@mail.ru](mailto:dvusha.vav@mail.ru)

Волокитина И.Е. - Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Теміртау, Казахстан, докторант PhD, магистр, +77477115005, [irinka.vav@mail.ru](mailto:irinka.vav@mail.ru)