

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НОВОГО СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА «РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ» НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДЕФОРМИРУЕМОЙ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ

С.Н. Лежнев

*Карагандинский государственный индустриальный университет,
г. Темиртау, Казахстан*

Проблема ресурсосберегающих способов получения материалов со свойствами, сочетающими одновременно высокую прочность и пластичность, в условиях использования относительно простых и недорогих устройств, позволяющих реализовывать во всем объеме металла интенсивную пластическую деформацию и при этом затрачивать минимально возможное количество энерго- и трудозатрат, является весьма актуальной. Решить данную проблему при производстве проволоки из цветных металлов и сплавов можно путем использования для ее получения совмещенного способа деформирования «прессование-волочение», который обладает существенным преимуществом по сравнению с действующей технологией производства медной проволоки. Данный способ деформирования позволяет получать проволоку с субультрамелкозернистой структурой и высоким уровнем механических свойств, требуемых размеров и формы поперечного сечения при незначительном количестве циклов деформирования.

Ключевые слова: медь; равноканальная ступенчатая матрица; волочение; совмещенный процесс «прессование-волочение».

Современный уровень развития электронной техники привел к появлению устройств, часто имеющих подвижные части и/или работающих в сложных условиях. Поэтому за рубежом в последнее время вырос интерес к проблемам формирования физико-механических свойств функциональных проводниковых материалов в связи с необходимостью стабилизации свойств проводников тока и повышения их надежности, в том числе в тяжело нагруженных кабельных системах, обмотках двигателей и генераторов и слаботочных сетях ЭВМ. Это обуславливает необходимость применения проводниковых материалов с высокой прочностью, например, в виде проводов, шин и фольг. Наиболее часто в качестве материала для них применяется чистая медь, которая обладает сравнительно небольшой прочностью. Повысить прочность можно с помощью легирования, но, как известно, все примеси понижают электропроводность меди. Добиться повышения механических свойств меди при сохранившемся значении электропроводности возможно путем получения мелкозернистой структуры данных сплавов. Один из возможных способов получения измельченной структуры состоит в использовании больших пластических деформаций.

Традиционные технологии деформирования, такие как волочение и холодная прокатка, также сопровождаются измельчением структуры. Однако в основном субструктура имеет ячеистый характер с зернами, удлиненными в направлении волочения или прокатки, также содержащая высокую долю малоугловых границ. С другой стороны, материал, полученный ИПД, содержит зернистую структуру

с относительно мелкими зернами, с высокими углами разориентировки. Данный факт также благоприятно сказывается на динамике рекристаллизации и, следовательно, на термостабильности. К тому же, часто ИПД проходит при низких температурах (окружающей среды), что делает ее более привлекательной. Но на сегодняшний день ни один из методов ИПД не позволяет получить изделия, приемлемые по форме и габаритным размерам, для широкого практического конструирования. В первую очередь это касается возможности структурирования металла в длинномерных изделиях, таких как прутки и проволока.

В соответствии с этим учеными кафедры «ОМД» Карагандинского государственного индустриального университета был разработан новый совмещенный процесс деформирования «прессование-волочение» («РКУП-В») с использованием равноканальной ступенчатой матрицы и калибрующего инструмента (рис. 1), позволяющий избежать овализации готовой проволоки [1].

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 волочительного стана.

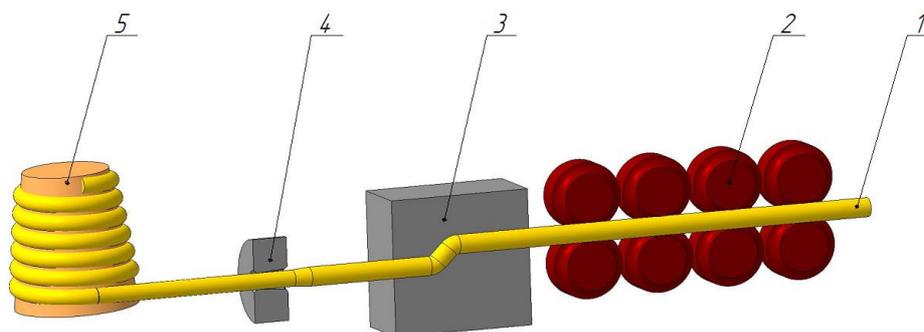


Рис. 1. Схема совмещенного процесса «прессование-волочение»: 1 – проволока; 2 – задающее устройство; 3 – равноканальная ступенчатая матрица; 4 – волока в волокодержателе; 5 – барабан наматывающий

Ранее в работах [2–5] уже были проведены исследования влияния новой схемы деформирования на качество стальной и алюминиевой проволоки. Целью данной работы, которая выполнялась в рамках государственной финансируемой темы «Разработка и исследование совмещенного процесса деформирования „прессование-волочение“ с целью получения алюминиевой и медной проволоки с высокими механическими свойствами и ультрамелкозернистой структурой» по программе «Грантовое финансирование научных исследований на 2012–2014 годы», является исследование влияния нового способа деформирования на возможность получения медной проволоки требуемого размера и требуемой формы профиля поперечного сечения с повышенным комплексом механических свойств.

Для определения влияния нового совмещенного способа деформирования «прессование-волочение» на изменение микроструктуры и механических свойств медной проволоки был проведен лабораторный эксперимент на промышленном волочильном стане В – 1/550 М. Для осуществления первого цикла деформирования перед волокой с рабочим диаметром 6,5 мм была закреплена равноканальная ступенчатая матрица с диаметром каналов, равном 7 мм, и углом стыка каналов матрицы равном 135° (рис. 2). Матрица была распо-

ложена в контейнере для смазки. В качестве смазки использовали стружку мыла.

После процесса «прессование-волочение» диаметр проволоки составил 6,5 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 вырезку темплетов для изготовления микрошлифов в поперечном и продольном направлениях.

После первого цикла деформирования для дальнейшего исследования меняли как волоку, так и равноканальную ступенчатую матрицу. Так, при осуществлении второго цикла деформирования рабочий диаметр в волоке составлял 6,0 мм, а диаметр каналов равноканальной ступенчатой матрицы 6,5 мм, при осуществлении третьего цикла – 5,5 мм и 6,0 мм соответственно.

Для выявления преимуществ предлагаемой технологии по сравнению с действующей технологией производства проволоки было проведено обычное волочение медной проволоки в волоках с рабочими диаметрами 6,5; 6,0 и 5,5 мм. Эксперимент также был продублирован три раза, и после каждого опыта производили измерение диаметра проволоки и вырезку темплетов для изготовления

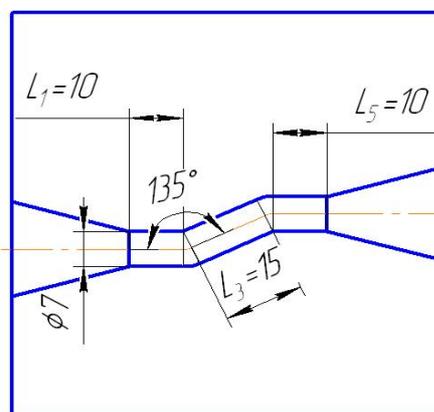
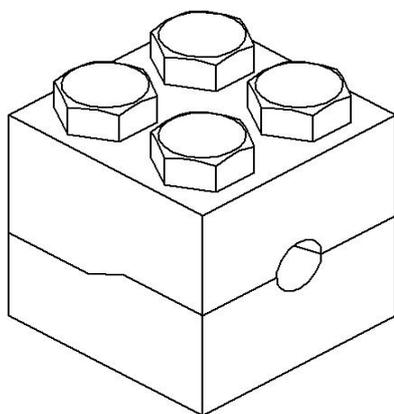


Рис. 2. Равноканальная ступенчатая матрица

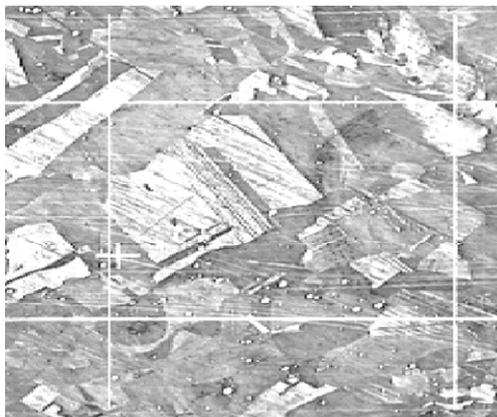
микрошлифов в поперечном и продольном направлении.

В качестве смазки при проведении обычного волочения также использовали стружку мыла.

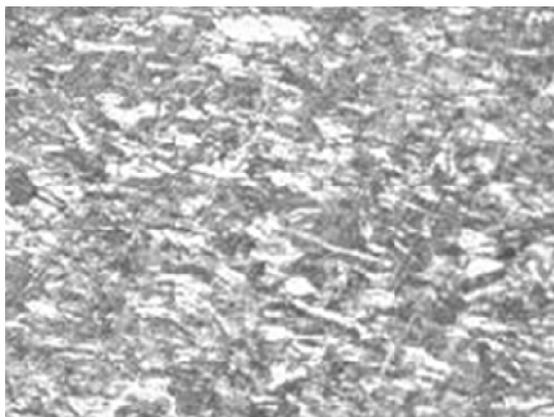
Подготовка шлифов для металлографических исследований осуществлялась по стандартной методике, для исследования использовался оптический микроскоп Leica.

Результаты исследования микроструктуры медной проволоки до и после третьего цикла деформирования представлены на рис. 3.

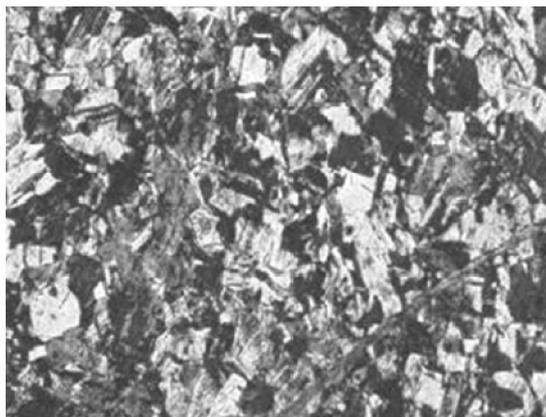
Микроструктурные исследования показали, что в исходном состоянии медь имеет крупнозернистую структуру с большим наличием двойников (рис. 3, а). Уже после первого цикла волочения структура меди сильно измельчается по сравне-



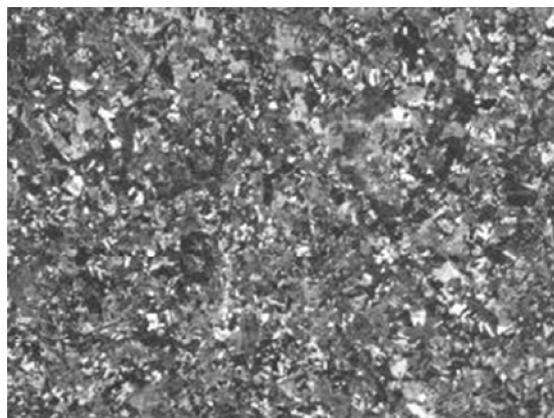
а)



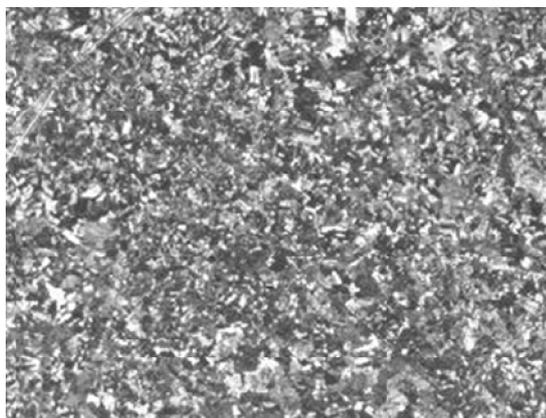
б)



в)



г)



д)

Рис. 3. Структура медной проволоки, $\times 100$: а – исходная структура, 56 мкм; б – по действующей технологии волочения продольное направление; в – по действующей технологии волочения поперечное направление, 24 мкм; г – по предлагаемой технологии «РКУП-В» продольное направление; д – по предлагаемой технологии «РКУП-В» поперечное направление, 7 мкм

нию с исходной. В поперечном сечении микроструктура довольно однородна и в ней преобладают примерно равноосные зерна. Тем не менее, в структуре угадывается некоторая строчечность в радиальном направлении, особенно в продольном сечении заготовки, что приводит к ненадлежащему уровню пластических свойств готовой проволоки, а это, в свою очередь, может негативно сказаться на параметрах эксплуатации готового изделия. Даже в результате значительных обжатий, полученных проволокой в процессе волочения, не все зерна измельчились и оказались развернутыми в направлении оси деформации из-за неравномерности распределения деформации.

Как известно, добиться ультрамелкозернистой структуры при обычном волочении только за счет увеличения суммарной степени деформации нельзя, так как данный технологический процесс характеризуется разноименной схемой главных деформаций, при этом возникающие в процессе деформирования растягивающие напряжения способствуют охрупчиванию металла при волочении, а максимально допустимое значение $\sigma_1 \leq \sigma_T$ ограничивает степень деформации за проход. При применении же равноканальной ступенчатой матрицы создаются всесторонние сжимающие напряжения в ней на всех этапах деформирования, что снижает растягивающие напряжения и позволяет увеличивать степень деформации за один проход, а вместе с тем и прочностные характеристики.

Предлагаемая нами совмещенная технология «прессование-волочение» позволяет устранить недостатки процесса обычного волочения и получить проволоку с ультрамелкозернистой структурой за небольшое количество циклов деформирования, за счет использования в технологическом цикле производства проволоки равноканальной ступенчатой матрицы. При реализации данной схемы деформирования равноканальная ступенчатая матрица играет роль основного инструмента для деформирования, то есть придания проволоке необходимой микроструктуры и механических свойств. Волока на выходе из равноканальной ступенчатой матрицы в большей степени выполняет вспомогательную роль – роль калибрующего инструмента, то есть она позволяет избежать овалации готовой проволоки, а также данная волока позволяет придать готовой проволоке дополнительно упрочнения поверхностного слоя. Так за счет чего при реализации совмещенной схемы деформирования «прессование-волочение» достигается выше приведенный эффект? Во-первых, деформирование металла в равноканальной ступенчатой матрице происходит при напряженной схеме деформирования – всестороннее неравномерное сжатие, которое достигается за счет согласования процесса задачи проволоки в каналы матрицы и ее проталкивание через нее задающим устройством 2 (см. рис. 1), с процессом протягивания

проволоки через каналы матрицы и волокни, реализуемым наматывающим барабаном 5 (см. рис. 1). Во-вторых, при прохождении проволоки через равноканальную ступенчатую матрицу на ее стыках каналов в металле реализуются сдвиговые деформации, способствующие как образованию большеугловых границ, так и тому, что в этом случае подводимая к образцу энергия не накапливается в материале преимущественно в виде упругих искажений, а продолжает диссипировать. В результате всего этого в металле в свою очередь создаются условия для получения металла с ультрамелкозернистой структурой за небольшое количество циклов. Так, из рис. 3, б видно, что уже за три прохода произошло существенное измельчение структуры меди по сравнению с традиционным волочением и не только на поверхности, но и в центре проволоки.

По предлагаемой технологии после первого цикла деформирования происходит уменьшение межграницных расстояний в продольном и поперечном сечениях. Уменьшение межграницных расстояний обусловлено геометрическим эффектом деформации, то есть сжатием исходных зерен. Формирование новых границ при волочении практически не происходит, все фрагментирование структуры осуществляется в равноканальной ступенчатой матрице при сдвиговых деформациях за счет двойникования. В соответствии с правилом Холла – Петча волочение на первых проходах приводит только к повышению прочностных характеристик меди за счет снижения расстояния между границами в продольном и поперечном сечениях.

Также было установлено, что второй цикл прессования-волочения приводит к образованию структуры смешанного типа. При исследовании полученной структуры были обнаружены зерна двух типов: мелкие рекристаллизованные и деформированные. Такая структура обусловлена протеканием двух процессов: рекристаллизации при волочении и фрагментации в равноканальной ступенчатой матрице. Наличие в структуре двух видов зерен обеспечивает высокую прочность и пластичность. После третьего цикла в структуре наблюдается значительное повышение доли большеугловых границ (~ 59 %) за счет более активного протекания динамических возвратов и рекристаллизации. Это связано с тем, что с уменьшением зерна снижается температура начала рекристаллизации меди. Границы зерен становятся более четко выраженными.

Также с увеличением числа проходов наблюдается тенденция к снижению числа двойников, связанная с уменьшением размера зерна меди, что соответствует уравнению Холла – Петча для случая деформации двойникованием, по которому следует ожидать затрудненности проявления двойникования при уменьшении размера зерна.

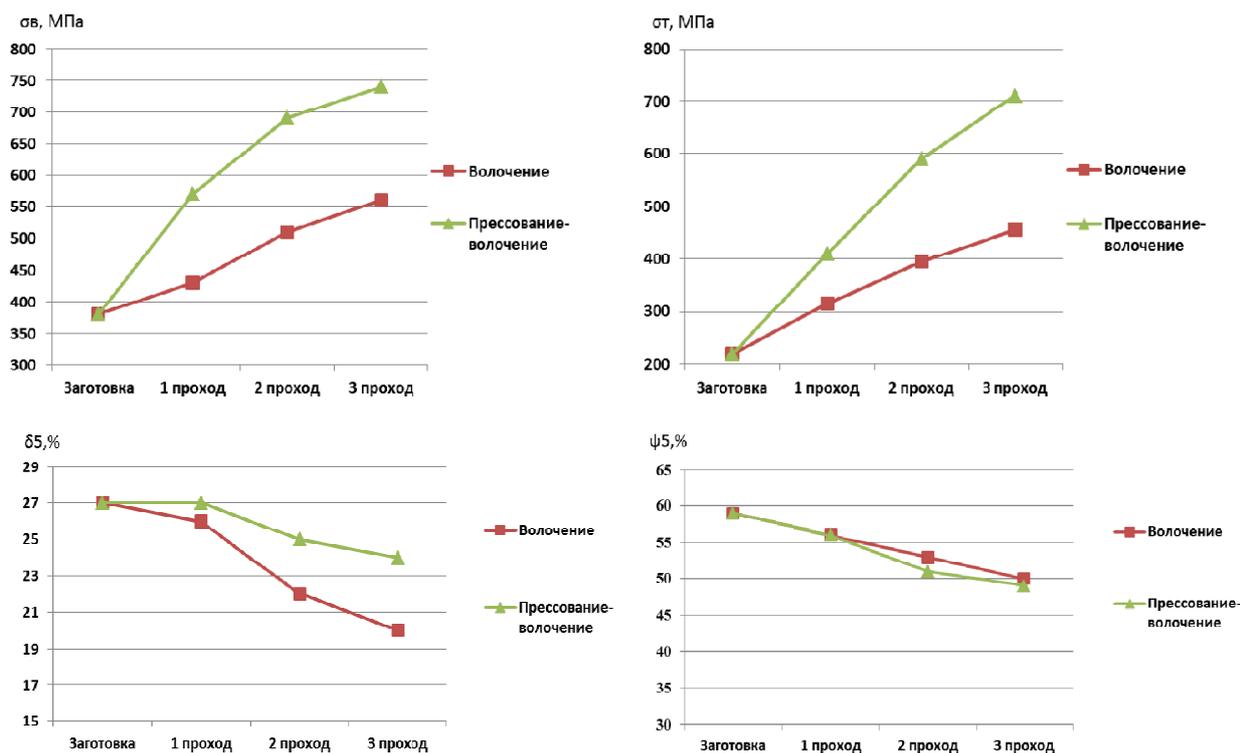


Рис. 4. Графики зависимости механических свойств медной проволоки от количества проходов

Помимо исследования изменения размера зерна при деформировании по действующей и предлагаемой технологии нами были исследованы механические свойства медной проволоки после каждого цикла деформирования по действующей и предлагаемой технологии деформирования, графики которых представлены на рис. 4.

Анализ графиков показал, что по обеим методикам наблюдается увеличение прочностных характеристик с увеличением количества проходов, пластические характеристики же падают, но по предложенной методике относительное удлинение после третьего прохода выше на 36 %, чем при традиционном волочении. Измерение предела прочности показало, что сочетание метода «прессование-волочение» обеспечивает значительный прирост уровня прочности по сравнению с исходным состоянием и на 20 % превышает показатели прочности традиционного волочения после третьего прохода.

Из графика, приведенного на рис. 4, видно, что предел прочности медной проволоки, подвергшейся совмещенному процессу «прессование-волочение», после третьего прохода увеличился на 180 МПа по сравнению с проволокой, прошедшей классическое волочение. А предел текучести проволоки после третьего прохода с использованием совмещенного процесса увеличился на 255 МПа по сравнению с проволокой, прошедшей классический способ волочения.

Как известно из соотношения Холла – Петча, размер зерна поликристаллических металлов ока-

зывает большое влияние на величину предела текучести и механические свойства материала. Решающую роль в высокой прочности ультрамелкозернистого сплава играет дополнительное упрочнение благодаря высокой плотности дислокаций вдоль границ зерна. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что значения механических характеристик проволоки, продеформированной по новой технологии «прессование-волочение», выше, чем у проволоки, полученной традиционным волочением, при этом уровень прочностных характеристик обычного волочения достижим по новой технологии «прессование-волочение» за меньшее количество проходов, что создает предпосылки к снижению интенсивности использования рабочего инструмента, а, следовательно, и меньшего его износа, и затрат энергетических и материальных ресурсов.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что значения механических характеристик медной проволоки, продеформированной по новой совмещенной технологии «прессование-волочение», выше, чем у медной проволоки, полученной традиционным волочением, при этом уровень прочностных характеристик обычного волочения достижим по новой технологии «прессование-волочение» за меньшее количество проходов, что создает предпосылки к снижению интенсивности использования рабочего инструмента, а, следовательно, и меньшему его износу, и затрат энергетических и материальных ресурсов.

Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что предлагаемый совмещенный способ деформирования «прессование-волочение» обладает существенным преимуществом по сравнению с действующей технологией производства медной проволоки. Данный способ деформирования за счет совмещения двух способов: интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения через волоку – позволяет получать медную проволоку с ультрамелкозернистой структурой требуемых размеров и формы поперечного сечения при незначительном количестве циклов деформирования. Также отметим, что данный способ деформирования при его внедрении в производство не требует значительных экономических вложений и существенного переоборудования существующих волочильных станов, так как для реализации данного совмещенного процесса требуется только добавление в конструкцию оборудования специально изготовленной равноканальной ступенчатой матрицы.

Литература

1. Волокитин, А.В. Исследование влияния совмещенного процесса деформирования «прессование-волочение» на механические свойства стальной проволоки // Тезисы докладов Межвузовской студенческой научной конференции «Инновации в технике, технологии и образовании». – Караганда, 2012. – Ч. 4. – С. 95–96.
2. Лежнев, С.Н. Исследование влияния нового совмещенного процесса деформирования «прессование-волочение» на микроструктуру и механические свойства деформируемой алюминиевой проволоки / С.Н. Лежнев, А.В. Волокитин, И.Е. Волокитина // Обработка металлов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2. – С. 203–207.
3. New combined process “pressing-drawing” and its impact on the properties of deformable aluminum wire / S.N. Lezhnev, A.B. Naizabekov, A.V. Volokitin, I.E. Volokitina // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – P. 1505–1510.
4. Найзабеков, А.Б. Исследование влияния нового совмещенного процесса деформирования «прессование-волочение» на эволюцию микроструктуры стальной проволоки / А.Б.Найзабеков, С.Н. Лежнев, А.В. Волокитин // XIII International scientific conference “New technologies and achievements in metallurgy and material engineering”, Czestochowa, Poland, 2012. – С. 433–437.
5. Lezhnev, S.N. Research of a new method of deformation – “pressing-drawing” on mechanical properties of steel wire / S.N. Lezhnev, A.B. Naizabekov, A.V. Volokitin // 22-th International Conference on metallurgy and materials METAL, Brno, Czech Republic, 2013.

Лежнев Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан; sergey_legnev@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 марта 2015 г.

DOI: 10.14529/met160108

THE ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE NEW COMBINED PROCESS “EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING – DRAWING” ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF DEFORMED COPPER WIRE

S.N. Lezhnev, sergey_legnev@mail.ru

Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

The problem of resource-saving methods of producing materials with properties combining high strength and ductility in conditions of using relatively simple and inexpensive devices that enable to implement the whole bulk of metal and intensive plastic deformation while using the minimal amount of energy and effort is very important. In manufacturing wire from non-ferrous metals and alloys, this problem can be solved by using a combined method of deformation “pressing-drawing” which has a significant advantage compared with the existing technology of producing copper wire. This method of deformation enables to produce wire with

a sub-ultrafine grained structure and a high level of mechanical properties, required dimensions and a cross-sectional shape with a small number of deformation cycles.

Keywords: copper; equal-channel step matrix; drawing; combined method of deformation “pressing-drawing”.

References

1. Volokitin A.V. [Research of Influence of the Combined Deformation Process of “Pressing-Drawing” on the Mechanical Properties of Steel Wire]. *Tezisy докладov Mezhvuzovskoy studencheskoy nauchnoy konferentsii “Innovatsii v tekhnike, tekhnologii i obrazovanii”* [Abstracts of Interuniversity Student Scientific Conference “Innovation in Engineering, Technology and Education”]. Karaganda, 2012, Part 4, pp. 95–96. (in Russ.)
2. Lezhnev S.N. [Research of Influence of the New Combined Process of Deformation “Pressing-Drawing” on the Microstructure and Mechanical Properties of Deformable Aluminum Wire]. *Obrabotka metallov davleniem. Sbornik nauchnykh trudov* [Metal Forming. Collection of Scientific Works]. Kramatorsk, Kramatorsk DGMA Inst. Publ., 2013 no. 2, pp. 203–207. (in Russ.)
3. Lezhnev S.N., Naizabekov A.B., Volokitin A.V., Volokitina I.E. New Combined Process “Pressing-Drawing” and Its Impact on the Properties of Deformable Aluminum Wire. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 1505–1510. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.181
4. Naizabekov A.B. [Research of Influence of the New Combined Process of Deformation “Pressing-Drawing” on the Evolution of the Microstructure of the Steel Wire]. *XIII International Scientific Conference “New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering”*, Czestochowa, Poland, 2012, pp. 433–437.
5. Lezhnev S.N., Naizabekov A.B., Volokitin A.V. Research of a New Method of Deformation – “Pressing-Drawing” on Mechanical Properties of Steel Wire. *22-th International Conference on Metallurgy and Materials METAL*, Brno, Czech Republic, 2013.

Received 11 March 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лежнев, С.Н. Анализ влияния нового совмещенного процесса «равноканальное угловое прессование – волочение» на микроструктуру и свойства деформируемой медной проволоки / С.Н. Лежнев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 59–65. DOI: 10.14529/met160108

FOR CITATION

Lezhnev S.N. The Analysis of the Impact of the New Combined Process “Equal Channel Angular Pressing – Drawing” on the Microstructure and Properties of Deformed Copper Wire. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 59–65. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160108