

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ*

*Чукин М.В., д.т.н., профессор, первый проректор – проректор по научной и инновационной работе,
заведующий кафедрой машиностроительных и металлургических технологий (m.chukin@mail.ru)*

*Полякова М.А., к.т.н., доцент кафедры машиностроительных и металлургических
технологий (m.polyakova-64@mail.ru)*

*Гулин А.Е., аспирант кафедры машиностроительных и металлургических
технологий (walter_chel@mail.ru)*

Магнитогорский государственный технический университет
(455000, Россия, Магнитогорск, Челябинская обл., пр. Мира, 38)

Аннотация. Поскольку механические свойства металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой являются весьма привлекательными с практической точки зрения, то одним из направлений развития техники и технологий является разработка непрерывных методов интенсивной пластической деформации. Внедрение существующих методов наноструктурирования в действующие технологические процессы металлургического и метизного производств связано с рядом ограничений, связанных прежде всего с размерами обрабатываемых заготовок. Показана необходимость разработки непрерывных методов интенсивной пластической деформации, отличающихся высокой технологичностью и производительностью. Перспективным направлением является использование комбинирования различных видов пластической деформации. В качестве объекта исследования выбрана углеродистая проволока. Комбинирование внешней нагрузки позволяет в значительной степени расширить технологические возможности волочения как основной операции производства проволоки. На основе комбинирования волочения с изгибом и кручением разработан способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением. Сущность метода заключается в одновременном наложении на непрерывно движущуюся проволоку деформации растяжения волочением, деформации изгиба при прохождении через систему роликов и деформации кручения. Для осуществления этого метода используются применяемые на различных операциях метизного передела устройства и инструмент, что значительно упрощает его внедрение и реализацию на имеющемся промышленном оборудовании. Доказано, что комбинирование волочения с изгибом и кручением приводит к измельчению микроструктуры углеродистой проволоки. Комбинированное деформационное воздействие на углеродистую проволоку позволяет в широких пределах изменять ее механические свойства, сочетая при этом высокую прочность и пластичность.

Ключевые слова: комбинирование, пластическая деформация, углеродистая проволока, волочение, изгиб, кручение, ультрамелкозернистая структура, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-552-557

Как известно, высокопрочное состояние металлов и сплавов может быть достигнуто при их обработке различными по своей физической природе воздействиями: легированием, термической и деформационной обработками. При этом существующие механизмы повышения прочностных характеристик стали – деформационный (дислокационный), дисперсионный, твердорастворный и зернограничный – могут быть реализованы различными технологическими приемами, в том числе комбинированием различных схем деформации.

* Работа выполнена в соответствии с госзаданием Минобрнауки РФ МГТУ им. Г.И. Носова по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования», а также программой стратегического развития университета на 2012 – 2016 гг. (конкурсная поддержка Минобрнауки РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО).

Наиболее яркими представителями процессов с зернограничным механизмом упрочнения являются процессы интенсивной пластической деформации. В связи с высокой эффективностью процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) объемных материалов являются предметом многочисленных исследований российских и зарубежных авторов [1 – 6 и др.]. Однако недостатки существующих методов ИПД, связанные прежде всего с малыми геометрическими размерами обрабатываемых заготовок, а также низкой технологичностью и производительностью, в значительной степени сдерживают их применение в промышленных масштабах. Комбинирование «классического» метода ИПД – равноканального углового прессования – с процессом прокатки привело к созданию таких способов, как способ непрерывного ограниченного полосового сдвига, способ отличающегося углового прессования, равноканально-угловой прокатки и др. [7]. Описанные

комбинированные процессы практически непрерывны, но они низкотехнологичны, требуют создания специального оборудования и оснастки, а также достаточно сложно встраиваются в существующие промышленные технологии производства металлических изделий из-за ограничения скоростей обработки, связанного с деформационным разогревом заготовки и оснастки и другими факторами.

Тем не менее, эти методы весьма привлекательны с точки зрения обеспечения высокого уровня механических свойств металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ), формируемой в процессах ИПД. С этой точки зрения целесообразно рассмотреть возможность комбинирования различных схем пластической деформации, которая, с одной стороны, обеспечивает получение деформаций сдвига, приводящих, как известно, к измельчению микроструктуры металлов и сплавов, с другой, – такое комбинирование должно отличаться высокой технологичностью.

Использование различных схем деформирования приводит к изменению структуры и свойств обрабатываемого металла. В комбинированных процессах широко используются такие методы пластической деформации, как растяжение, знакопеременный изгиб, кручение. Различные схемы деформации оказывают специфическое влияние на структуру и механические свойства обрабатываемых металлов.

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрана углеродистая проволока, являющаяся од-

ним из распространенных видов метизной продукции. Уделяя большее внимание процессу волочения как одному из базовых непрерывных методов обработки металлов давлением получения проволоки, можно утверждать, что на существующий момент имеет место усложнение классического способа волочения путем комбинирования с другими воздействиями на металл [8] или расширения диапазонов технологических режимов волочения [9].

Наложение на очаг деформации знакопеременных нагрузок, инициируя эффект Баушингера, может значительно снизить или (для некоторых металлов) полностью исключить число промежуточных отжигов проволоки. Новое научное направление, получившее название «процессы с комбинированным приложением внешней нагрузки» или «процессы с комбинированным нагружением», позволяет существенно расширить технологические возможности традиционных способов волочения. Для многих процессов может быть найдена такая комбинация внешних нагрузок, при которой процесс оптимизируется по какому-либо параметру [10]. Такое воздействие может инициировать измельчение зерна и, как результат, привести к формированию УМЗ структуры в обрабатываемой проволоке.

Учеными кафедры машиностроительных и металлургических производств Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова разработан метод непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки (рис. 1) [11, 12].

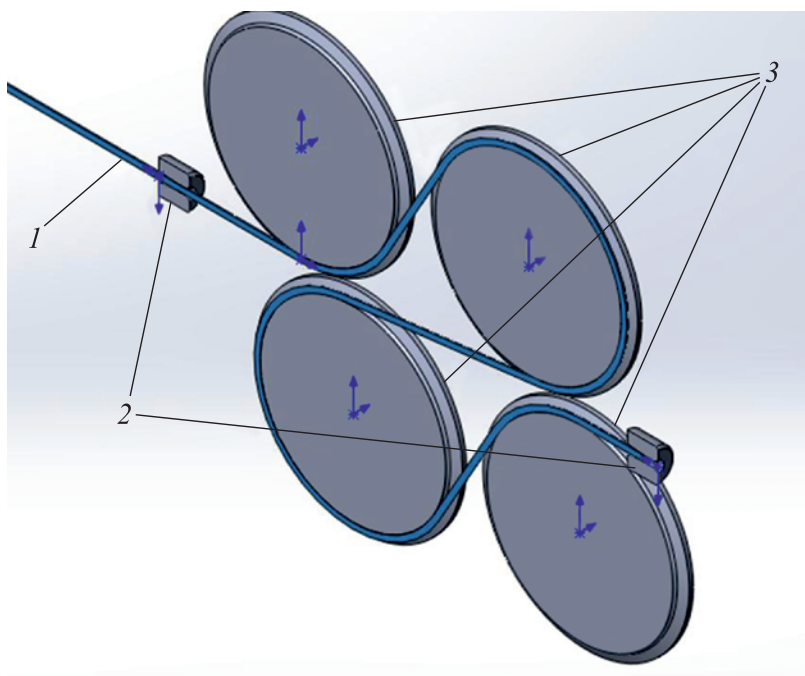


Рис. 1. Принципиальная схема изготовления проволоки комбинированной деформационной обработкой волочением со знакопеременным изгибом с кручением:

1 – проволока; 2 – волюки; 3 – система роликов

Fig. 1. Fundamental preparation scheme of wire combined with the deformation wire-drawing processing with the reversed bending with twisting:
1 – wire; 2 – drawing dies; 3 – roller system

Стальная проволока с начальным диаметром d_0 заправляется в первую по ходу ее движения неподвижно закрепленную коническую волоку и далее направляется в систему роликов, обеспечивающую знакопеременный изгиб. Далее проволока, имеющая после первой волоку диаметр $d_1 < d_0$, поступает во вторую неподвижно закрепленную, расположенную соосно с первой коническую волоку меньшего диаметра, после которой ее диаметр становится d_2 . Далее следует закрепление переднего конца проволоки в намоточном устройстве. После этого осуществляется процесс последовательной комбинированной деформации металла волочением за счет тянущего усилия, создаваемого вращением намоточного устройства. При этом одновременно с деформацией волочением в зоне между волоками производят дополнительную деформацию сдвигом за счет вращения системы роликов вокруг продольной оси металла, обеспечивающей совместный знакопеременный изгиб металла и его вращение вокруг своей продольной оси. Причем

в процессе последовательной деформации металла скорости его перемещения в осевом направлении и вращения вокруг своей продольной оси поддерживают постоянными.

Для реализации непрерывного метода разработано устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой, на которое был получен патент [12]. Основными технологическими параметрами разработанного процесса, влияющими на процесс формирования УМЗ структуры и механические свойства проволоки, являются обжатия в волоках и количество оборотов скручивания.

Влияние различных видов пластической деформации на измельчение микроструктуры и механические свойства изучали на проволоке из углеродистой стали марок Ст3 и 50 diam. 3,0 мм. В исходном состоянии исследуемые стали имеют феррито-перлитную структуру с различным содержанием перлита в соответствии с содержанием в них углерода (так, в стали Ст3 содержится около 16 % перлита, в стали 50 – около 40 %). На рис. 2

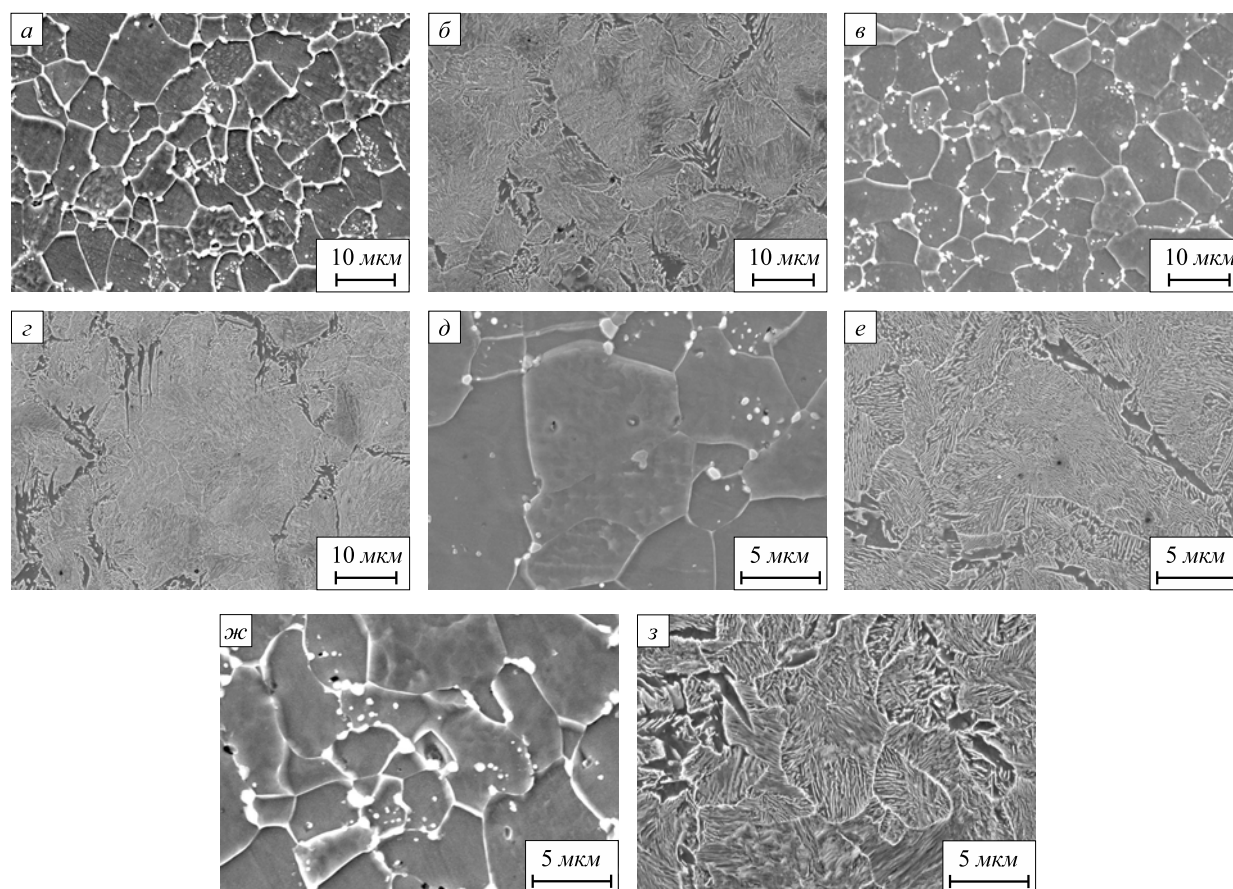


Рис. 2. Изменения микроструктуры проволоки diam. 3,0 мм из углеродистых сталей Ст3 (а, в, д, ж) и 50 (б, г, е, з)

при различных видах деформационного воздействия:

а, б – исходное состояние; в, г – волочение (растяжение и сжатие); д, е – комбинирование волочения (растяжение и сжатие) с изгибом; ж, з – комбинирование волочения (растяжение и сжатие) с изгибом и кручением

Fig. 2. Changes of wire microstructure with the diameter of 3.0 mm from carbon steel Ст3 (а, в, д, ж) and 50 (б, г, е, з)

at different kinds of deformation influence:

а, б – initial state; в, г – drawing (tensioning and condensing); д, е – combined drawing (tensioning and condensing) with the bending; ж, з – combined drawing (tensioning and condensing) with the bending and twisting

представлена микроструктура проволоки после различных видов деформационного воздействия.

При наложении на проволоку деформаций растяжения и изгиба после ее прохождения первой волоки и изгибающего устройства происходит сначала изгиб отдельных цементитных пластин, начинается процесс дробления перлитных колоний (рис. 2, д, е).

Наложение деформации кручения приводит к полному разрушению цементитных пластин, в структуре наблюдаются полосы сброса, происходит интенсивная деформация цементитных пластин и дробление зерен (рис. 2, ж, з). Проведенные металлографические исследования позволяют классифицировать получаемую структуру как ультрамелкозернистую [13].

Результаты механических испытаний проволоки с УМЗ структурой различных диаметров после комбинированного воздействия представлены на рис. 3.

Как видно из полученных результатов, комбинированное деформационное воздействие на углеродистую проволоку позволяет в широких пределах изменять ее механические свойства, сочетая при этом высокие прочность и пластичность. Это в значительной степени расширяет области ее практического применения [14, 15].

Выводы. В результате проведения комплекса исследований установлено, что одновременное воздействие на высокоуглеродистую проволоку деформаций растяжения, изгиба и кручения приводит к формированию в ней УМЗ структуры. При этом наблюдается изменение как прочностных, так и пластических свойств в зависимости от степени деформации кручением. Результаты металлографических исследований и механических испытаний проволоки после комбинированного дефор-

мационного воздействия позволяют судить о перспективности выбранного направления по совмещению различных методов деформирования для формирования УМЗ структуры в высокоуглеродистой проволоке. В разработанном методе в качестве базовой выбрана операция волочения, что позволяет обеспечить непрерывность процесса деформационного воздействия и интегрировать метод в действующие промышленные технологические процессы производства проволоки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhu Y.T., Langdon T.G. Fundamentals of Nanostructured Materials by Severe Plastic Deformation // JOM. 2004. No. 10, pp. 58 – 63.
2. Lowe Terry C., Valiev R.Z. Investigations and applications of severe plastic deformation. NATO Science Partnership Subseries 3, High technology. Vol. 80. Springer, 2000. – 394 p.
3. Nanostructured metals and alloys: Processing, microstructure, mechanical properties and applications, edited by S.H. Whang. Polytechnic Institute of NYU // USAWoodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. 2011. No. 40, 840 p.
4. Verlinden B. Severe plastic deformation of metals. In Proc. 2nd International Conference «Deformation Processing and Structure of Materials» 26 – 28. 05. 2005, Belgrade, Serbia and Montenegro, pp. 3 – 18.
5. Suwas S., Bhowmik A., Biswas S. Ultra-fine Grain Materials by Severe Plastic Deformation: Application to Steels. In Proc. International Conference on Microstructure and Texture in Steels and Other Materials 5 – 7. 02. 2008. Jamshedpur, India. London: Springer-Verlag London Ltd.: 2009, pp. 325 – 344.
6. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. – М.: Академия, 2005. – 186 с.
7. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
8. Недовизий И.Н., Петрухин С.И., Колмогоров А.Г. Совмещение процессов производства проволоки. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.

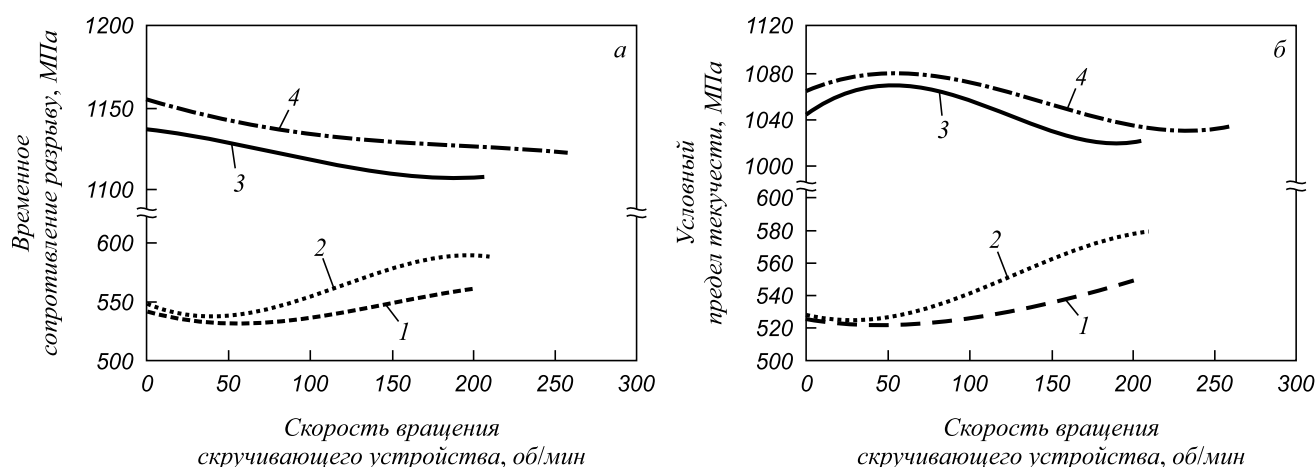


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления разрыву (а) и условного предела текучести (б) проволоки из стали Ст3 (1, 2) и 50 (3, 4) от скорости вращения скручивающего устройства при комбинировании различных видов пластической деформации:
1, 3 – волочение (растяжение и сжатие при суммарном обжатии в двух волоках 25 %) с изгибом и кручением;
2, 4 – волочение (растяжение и сжатие при суммарном обжатии в двух волоках 33 %) с изгибом и кручением

Fig. 3. Dependence of ultimate resistance to the fracture (a) and conventional yield strength (б) of wire from steel St3 (1, 2) and 50 (3, 4) on the rotational speed of the twisting facility when combining different kinds of plastic deformation:
1, 3 – drawing (tensioning and condensing at the total reduction in two drawing dies of 25 %) with the bending and twisting;
2, 4 – drawing (tensioning and condensing at the total reduction in two drawing dies of 33 %) with the bending and twisting

9. Конструирование совмещенных процессов в метизном производстве / Ю.Ф. Бахматов, Е.П. Носков, Э.М. Голубчик и др. – М.: Металлургия, 1994. – 92 с.
10. Харитонов В.А., Радионова Л.В., Зюзин В.И. Процессы волочения с комбинированным нагружением: Методическая разработка. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 1999. – 36 с.
11. Пат. 2467816 RU. МПК B21C 1/04, B21C 1/00. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / Чукин М.В., Полякова М.А., Голубчик Э.М. и др., заявл. 28.02.2011; опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33.
12. Пат. 130525 RU. МПК B21C 1/00. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / Полякова М.А., Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гулин А.Е.; заявл. 04.02.2013; опубл. 27.07.2013. Бюл. № 33.

13. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
14. Василев Р.З., Рааб Г.И., Боткин А.В., Дубинина С.В. Получение ультрамелкозернистых металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации: новые подходы в разработке технологий // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 44 – 47.
15. Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г., Гулин А.Е. Применение методов формирования ультрадисперсной структуры при производстве высокопрочной сталемедной продукции // Сталь. 2014. № 4. С. 100 – 103.

Поступила 30 июля 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 8, pp. 552–557.

FEATURES OF THE EFFECT OF COMBINING DIFFERENT KINDS OF PLASTIC DEFORMATION ON THE MICROSTRUCTURE GRINDING AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE CARBON WIRE

M.V. Chukin, M.A. Polyakova, A.E. Gulin

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Since the mechanical properties of metals and alloys with ultrafine-grained structure are very attractive from practical appliance one of the technology development approaches is the creation of continuous methods of severe plastic deformation. Implementation of current methods of nanostructuring to existing technological processes of metallurgical and steel wire production involves a number of limitations connected with the size of processed workpieces. The article shows the necessity of developing a method of continuous methods of severe plastic deformation which according to its technical and technological characteristics would be compatible with existing technological processes of metalware manufacture. Combining of different kinds of plastic deformation is a perspective tendency. Carbon wire was chosen as an investigation object. Combination of external stress leads to enhancing the technological possibilities of drawing as the basic wire production operation to large extent. On the basis of combining drawing with bending and twisting new method for obtaining the ultra-fine grained structure in semi-product which is protected by the patent of the Russian Federation. The essence of the method is the simultaneous applying deformations of tension when drawing, bending when going through the system of rolls and torsional deformation on a continuously moving wire. Various hardware devices and tools already applied for steel wire production can be used to implement this method thus simplifying its introduction to the current industrial equipment. Schematic diagram and description of the developed method are presented. Photographs of the carbon wire microstructure with different carbon content after different types of deformation effects are shown. It is proved that combining drawing with bending and twisting leads to carbon wire microstructure refinement. It is shown that deformation combined effect on carbon wire allows to modify its mechanical properties in a wide range, while matching its high strength and ductility.

Keywords: combining, plastic deformation, carbon wire, drawing, bending, twisting, ultra-fine grained structure, mechanical properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-552-557

REFERENCES

1. Zhu Y.T., Langdon T.G. Fundamentals of Nanostructured Materials by Severe Plastic Deformation. *JOM*. 2004, no. 10, pp. 58–63.
2. Lowe Terry C., Valiev R.Z. Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation. *NATO Science Partnership Subseries 3, High technology*, vol. 80. Springer, 2000, 394 p.

3. *Nanostructured Metals and Alloys: Processing, Microstructure, Mechanical Properties and Applications*. S.H. Whang ed. Polytechnic Institute of NYU. USA Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. 2011, no. 40, 840 p.
4. Verlinden B. Severe plastic deformation of metals. In: *Proc. 2nd International Conference "Deformation Processing and Structure of Materials"* 26 – 28.05.2005, Belgrade, Serbia and Montenegro, pp. 3–18.
5. Suwas S., Bhowmik A., Biswas S. Ultra-fine Grain Materials by Severe Plastic Deformation: Application to Steels. In: *Proc. International Conference on Microstructure and Texture in Steels and Other Materials 5 – 7.02.2008. Jamshedpur, India*. London: Springer-Verlag London Ltd.: 2009, pp. 325–344.
6. Andrievskii R.A., Ragulya A.V. *Nanostrukturnye materialy* [Nanostructural materials]. Moscow: Akademiya, 2005, 186 p. (In Russ.).
7. Sidel'nikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannyye i sovmeshchennyye metody obrabotki tsvetnykh metallov i spлавov* [Combined and modern processing methods of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: MAKS Press, 2005, 344 p. (In Russ.).
8. Nedovizii I.N., Petrukhin S.I., Kolmogorov A.G. *Sovmeshchenie protsessov proizvodstva provoloki* [Combination of wire production processes]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 224 p. (in Russ.).
9. Bakhmatov Yu.F., Noskov E.P., Golubchik E.M., Khaikin S.N., Polyakova M.A. *Konstruirovaniye sovmeshchennykh protsessov v metiznom proizvodstve* [Engineering of the combined processes in hardware production]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 92 p. (In Russ.).
10. Kharitonov V.A., Radionova L.V., Zyuzin V.I. *Protessy volocheniya s kombinirovannym nagruzheniem: Metodicheskaya razrabotka* [Drawing processes with the combined loading: Engineering methods]. Magnitogorsk: izd. MG TU, 1999, 36 p. (In Russ.).
11. Chukin M.V., Polyakova M.A., Golubchik E.M., Noskov S.E., Gulin A.E., Rudakov V.P. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh polufabrikatov volocheniem s krucheniem* [Production method of ultra-fine-grained half-finished products by drawing with twisting]. Patent RF no. 2467816. MPK B21C 1/04, B21C 1/00. *Bulleten' izobretenii*. 2012, no. 33. (In Russ.).
12. Polyakova M.A. Chukin M.V., Golubchik E.M., Gulin A.E. *Ustroistvo dlya izgotovleniya provoloki s ul'tramelkozernistoi strukturoi* [Device for the production of wire with ultra-fine-grained structure]. Patent RF no. 130525. MPK B21C 1/00. *Bulleten' izobretenii*. 2013, no. 33. (In Russ.).
13. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy* [Solid nanostructural metallic materials]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2007, 398 p. (In Russ.).

14. Vasilev R.Z., Raab G.I., Botkin A.V., Dubinina S.V. Obtaining of ultra-fine-grained metals and alloys using the intensive plastic deformation: new approaches to the technology development. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 8, pp. 44–47. (In Russ.).
15. Chukin M.V., Polyakova M.A., Emaleeva D.G., Gulin A.E. Application of the formation methods of superdispersed structure at the production of high-strength steel-copper products. *Stal'*. 2014, no. 4, pp. 100–103. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed in accordance with the state task of the Ministry of Education and Science RF to Novosibirsk State Technical University on the topic “Development of production technology of high-strength long-length profiles from the materials with ultra-fine-grained structure in the conditions of combining the processes of intensive plastic deformation”, as well as the program of strategic

development of University for 2012 – 2016 years (competitive support of the Ministry of Education RF of the programs of strategic development of State Educational Institutions of Higher Professional Education).

Information about the authors:

M.V. Chukin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Vice-Rector – Vice Rector for Research and Innovation, Head of the Chair “Engineering and Metallurgical Technology” (m.chukin@mail.ru)

M.A. Polyakova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Engineering and Metallurgical Technology” (m.polyakova-64@mail.ru)

A.E. Gulin, Postgraduate of the Chair “Engineering and Metallurgical Technology” (walter_chel@mail.ru)

Received July 30, 2014