

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЯ В СПОСОБАХ ПРОИЗВОДСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

Усанов М.Ю., Харитонов В.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): для высокого качества проволоки нужно получить равновесное, мелкодисперсное, фрагментированное зерно. Прежде всего на формирование мелкодисперсного зерна влияет характер деформации, т.е. нужно обеспечить немонотонный характер течения. Основной управляемый фактор процессов обработки металлов давлением – это характер деформации и управление характером течения. Круглую проволоку можно получить волочением в монолитной волоке, волочением в роликовых волоках, а также радиально-сдвиговой протяжкой. **Цель работы и используемые методы:** в статье смоделирован процесс волочения в монолитной волоке, в роликовой волоке по системе круг-треугольник-круг и в роликовой волоке радиально-сдвиговой протяжки в программном комплексе Deform-3d. По результатам моделирования проведен анализ очагов деформации в различных сечениях. **Новизна:** произведен анализ напряженного состояния с помощью показателя жесткости. **Результат:** показано, что при волочении в монолитной волоке напряжения сжатия не проникают до центра заготовки, в то время как при волочении в роликовой волоке напряжения сжатия проникают по всему сечению. Напряжения в роликовой волоке радиально-сдвиговой протяжки производят циклическое воздействие на заготовку, что приводит к геликоидальному течению металла. Проанализирован характер течения металла. При волочении в монолитной волоке и роликовой волоке течение имеет монотонный характер. Это связано с малым углом поворота при течении слоев металла. **Практическая значимость:** при радиально-сдвиговой протяжке задействован механизм простого сдвига, что позволяет отнести данный процесс к немонотонным способам ОМД. За счет данного механизма и происходит формирование наноструктуры.

Ключевые слова: волочение, проволока, кручение, моделирование, радиально-сдвиговая протяжка.

Введение

Металлургические предприятия Российской Федерации испытывают сегодня острую потребность в современных технологиях, модернизации оборудования и повышении конкурентоспособности выпускаемой продукции. Особенно остро этот вопрос стоит для чистового передела металлургии – метизного, производящего широкий ассортимент металлургических изделий (метизов) различного назначения. Основным видом метизов как по объему производства, так и применению является проволока и изделия из нее [1].

Свойства проволоки и издержки на ее производство, т.е. по сути ее конкурентоспособность, во многом зависят от уровня требований готовой продукции, определяемых действующей

нормативно-технической документацией и параметрами заготовки-катанки, поступающей в технологический процесс. В итоге же они формируются основными операциями технологического процесса изготовления проволоки, к которым относятся способы ОМД и термическая обработка. Последняя обеспечивает получение необходимых структуры и свойств заготовки и готовой проволоки, а также восстановление деформируемости передельной заготовки. Кроме того, термическая обработка увеличивает время цикла и повышает затраты на изготовление проволоки. Поэтому технологические процессы изготовления проволоки должны проектироваться с минимально необходимым количеством промежуточных термообработок, а задачи свойствообразования, наряду с обязательным формообразованием, должны решать применяемые способы ОМД [2–6].

Для измельчения структуры большое значе-

ние имеет применяемая схема деформирования, зависящая от схемы нагружения, предопределяющей траекторию деформации материала. По длине траектории оценивают степень деформации, по кривизне – характер процесса. Траектория с малой кривизной свойственна монотонным процессам, в которых главная ось тензора деформации (след тензора) не поворачивается относительно координатных осей, связанных с образцом. С увеличением кривизны или изломов траектории немонотонность возрастает [7].

Постановка задачи

В данной работе провели сравнение напряженного состояния в проволоке, полученной волочением в монолитной волоке, в роликовой волоке (по системе калибров круг-треугольник-круг) и радиально-сдвиговой протяжкой (РСПр [8, 9, 10]) в программном комплексе Deform-3d.

Рассматривался вариант деформации круглой заготовки длиной 50 мм и диаметром 16,00 мм на диаметр 14,25 мм. В качестве материала была принята сталь 80P. Реологическая модель материала заготовки – пластическое тело, количество элементов сетки 69703. При волочении в монолитной волоке коэффициент трения принимался по Кулону, равным 0,08; в остальных процессах – по Зибелю, с величиной 0,08. Полуугол волоки и роликов РСПр – 8 град; диаметр роликов при протяжке – 200 мм; диаметр роликов РСПр – 55 мм.

Для оценки вида напряженного состояния использовался показатель жесткости напряженного состояния [11] по методике, приведенной в работе [12].

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_i – интенсивность нормальных напряжений.

Значения показателя жесткости напряженного состояния для различных видов напряженного состояния приведены в **таблице**.

| Напряженное состояние | Показатель жесткости напряженного состояния |
|-----------------------|---|
| Одноосное растяжение | 1 |
| Чистый сдвиг | 0 |
| Одноосное сжатие | -1 |

Результаты исследования

В результате моделирования получен характер распределения показателя жесткости напря-

женного состояния в очаге деформации. После деформации в продольном сечении заготовки была нанесена координатная сетка с размером ячеек 1×1 мм.

Характер распределения показателя жесткости при волочении в монолитной волоке показан на **рис. 1**.

Из **рис. 1** видно, что длина очага деформации составляет 4,9 мм, при этом деформация сжатия не проникают до центра заготовки, а в ее центре действуют растягивающее напряжение.

На **рис. 2** показан характер распределения показателя жесткости при волочении в роликовой волоке (по системе калибров круг-треугольник-круг).

В данном случае длина очага деформации составляет 11,89 мм. На **рис. 2, а** видно, что под роликами находится деформация сжатия, которая проникает по всему сечению до конца очага деформации (**рис. 2, в, г**). Также можно заметить, что в разъемах роликов присутствуют растягивающие напряжения, которые остаются там на протяжении всего процесса деформирования.

На **рис. 3** показан характер распределения показателя жесткости при протяжке в роликовой волоке радиально-сдвиговой деформации.

Длина очага деформации РСПр составляет 12,07 мм. В данном случае за счет кругового движения инструмента заготовка, проходя через очаг деформации, испытывает циклическую деформацию. Таким образом, под роликами присутствуют сжимающие напряжения, а между роликами – растягивающие. За счет такого характера приложения напряжений сетка, нанесенная в продольном направлении, искажается и превращается в спираль (поэтому видно лишь часть сетки). Деформация растяжения присутствует в центральной части заготовки.

Из представленных результатов моделирования видно, что при волочении в монолитной волоке траектории течения металла изменяются на малый угол (при прохождении зон 1 и 2, **рис. 4**), и при этом не происходит проработка структуры в центре заготовки. С другой стороны, при уменьшении угла монолитной волоки можно добиться полной проработки структуры, однако это приведет к еще меньшим углам траектории течения металла, что не будет способствовать измельчению структуры. Это и происходит при волочении в роликовой волоке. Однако из-за присутствия растягивающих напряжений в местах разъема роликов в заготовке формируется неравномерные остаточные напряжения.

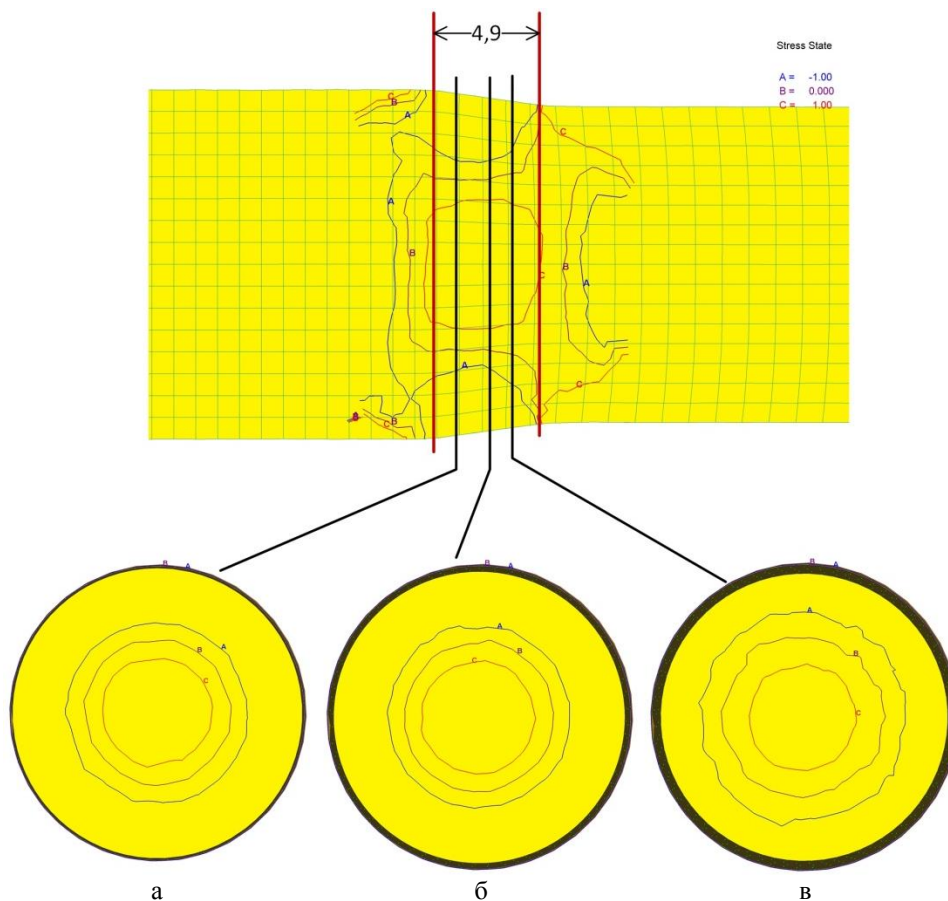


Рис. 1. Характер распределения показателя жесткости при волочении в монолитной волоке

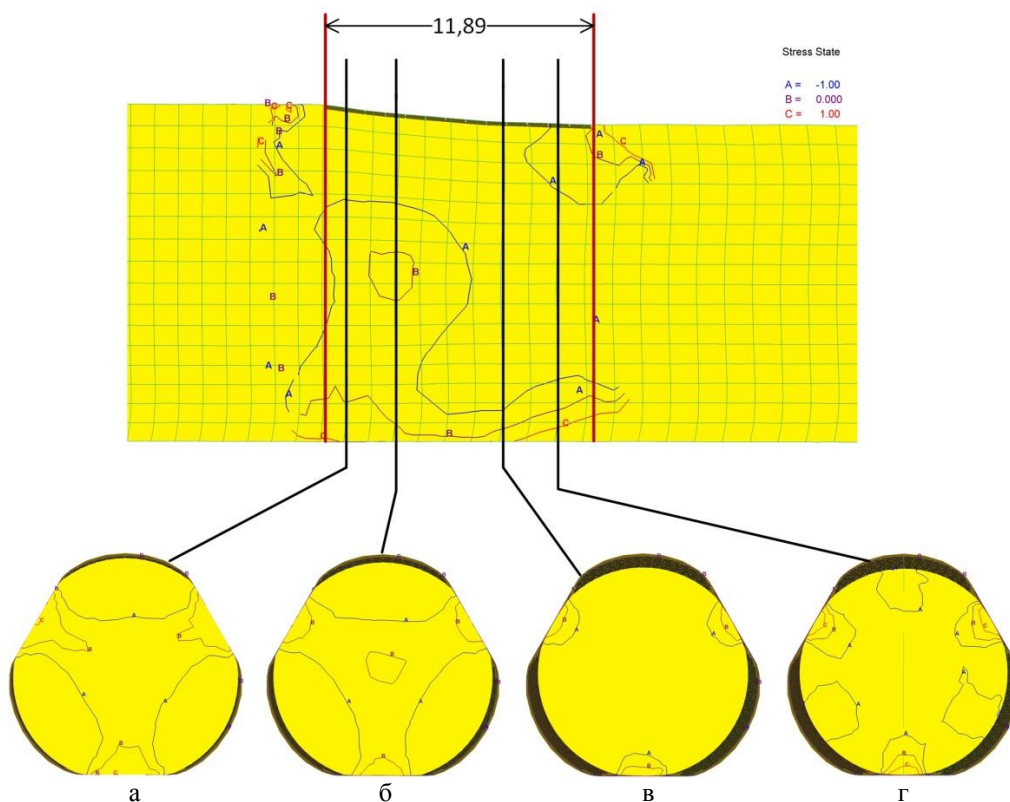


Рис. 2. Характер распределения показателя жесткости при волочении в роликовой волоке

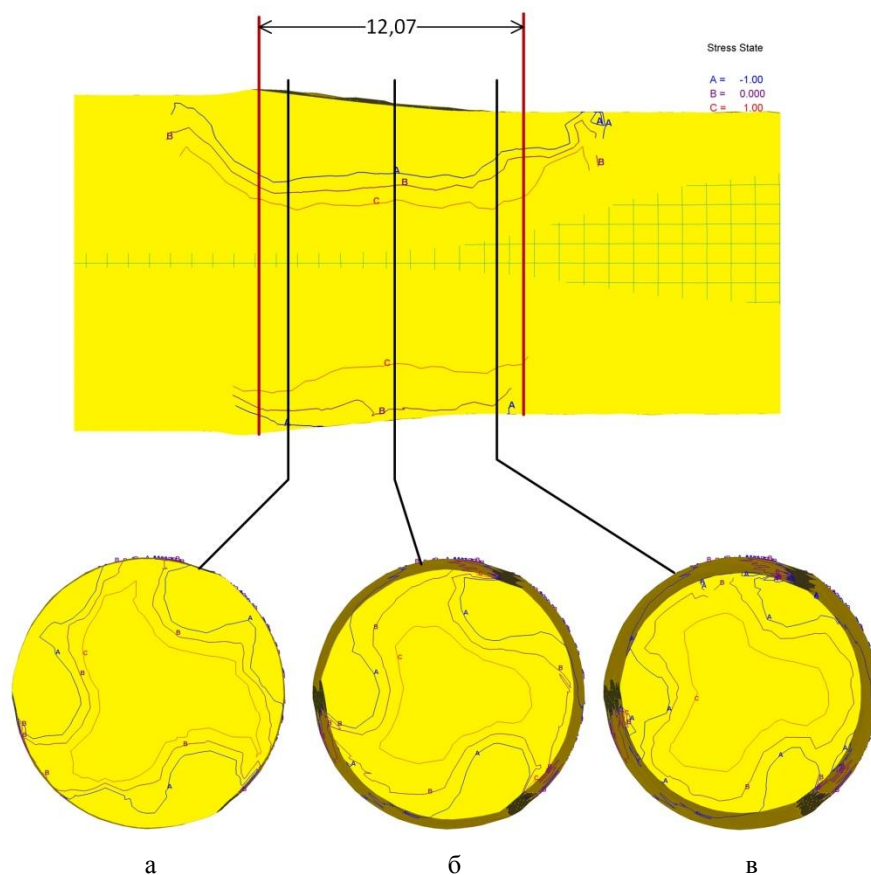


Рис. 3. Характер распределения показателя жесткости при радиально-сдвиговой протяжке

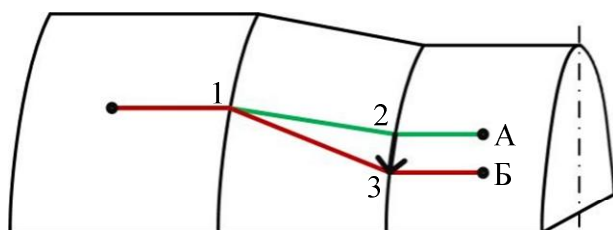


Рис. 4. Характер течения
(А – при волочении в монолитной проволоке;
Б – при радиально-сдвиговой протяжке)

При радиально-сдвиговой протяжке характер течения совсем другой. С одной стороны, происходит вытяжка в продольном направлении, что приводит к малому углу поворота траектории (точки 1 и 2 на рис. 4). Однако из-за винтового течения, вызванного напряженным состоянием, соответствующего чистому сдвигу, наблюдается дополнительный поворот от начала очага деформации к концу очага деформации, что значительно увеличивает траекторию течения металла (смещение от точки 2 в точку 3 на рис. 4). Это и приводит к интенсивному измельчению структуры.

При выборе способа, обеспечивающего измельчение структуры, следует отдавать предпочтение способам, сочетающим в одном очаге

деформации линейную деформацию вытяжки и деформацию кручения. Одним из способов, сочетающим в одном очаге деформации линейную деформацию вытяжки и деформацию кручения, является радиально-сдвиговая протяжка.

Заключение

С использованием программного комплекса Deform-3d проведен сравнительный анализ напряженного состояния в проволоке из высокоуглеродистой стали при волочении в монолитных проволоках, классических роликовых проволоках и проволоках радиально-сдвиговой протяжки. Для оценки напряженного состояния принят показатель жесткости напряженного состояния.

При волочении в монолитных проволоках наблюдается кольцевой характер распределения напряжений по сечению проволоки. При этом максимальное растягивающее напряжение концентрируется в ее центре.

При волочении в роликовых проволоках наблюдается дискретный характер распределения напряжений. Под роликами действуют преимущественно сжимающие напряжения, в местах разъема роликов – растягивающие.

При радиально-сдвиговой протяжке, за счет циклического действия роликов, под ними действуют сжимающие напряжения, в то время как в центре и пространстве между роликами – растягивающие напряжения. Такой характер напряженного состояния вызывает дополнительную сдвиговую деформацию, увеличивая тем самым степень накопленной деформации, что и обеспечивает получение наноструктуры.

Список литературы

1. Харитонов В.А. Классификация способов ОМД по технологическим признакам при производстве проволоки // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 49–59.
2. Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire // *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 7, July 2014, pp. 78–83.
3. Yoshida, K., Suga, K., Nakazima, K., Watanabe, K., Umezu, K. Processing technology of high dimensional accuracy shaped wire drawing for spring wire // *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 8, August 2014, pp. 72–75.
4. Yamada, Y. Part 1: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds // *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 12, 1 December 2014, pp. 58–64.
5. Yamada, Y. Part 2: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds // *Wire Journal International*. Vol. 48, iss. 1, 1 January 2015, pp. 54–59.
6. Galvez, F., Atienza, J.M., Elices, M. Influence of the strain rate on the me-chanical response of prestressing steel wires in cold drawing // *Wire Journal In-ternational*. Vol. 47, iss. 10, 1 October 2014, pp. 74–77.
7. Утяшев Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2008. 313 с.
8. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №3. С. 69–73.
9. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Исследование радиально-сдвиговой про-тяжки проволоки на основе моделирования // *Металлург*. 2013. № 11. С. 83–87.
10. Kharitonov V.A., Usanov M.Y. Study of Radial-Shear Wire Broaching Based on Modelling // *Metallurgist*. March 2014, vol. 57, iss. 11, pp. 1015–1021.
11. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. Л.: Металлургия, 1970. 229 с.
12. Шитиков А.А. Совершенствование технологии пневмотермической формовки в состоянии сверхпластичности деталей типа «полусфера»: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Москва, 2016. 18 с.

Материал поступил в редакцию 30.05.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-66-71

THE EFFECTIVENESS OF DEFORMATION TORSION FOR THE MANUFACTURE OF UFG STRUCTURED CARBON WIRE

Mikhail Yu. Usanov – Assisstant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: barracuda_m@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5920-3449>

Veniamin A. Kharitonov – Ph.D. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3487-7110>

Abstract

Problem Statement (Relevance): An equiaxed, finely dispersed and fragmented grain structure is a pre-requisite for high quality steel wire. As the structure is largely influenced by the strain conditions, it is important to ensure a nonmonotonic flow pattern. Deformation type and flow control are the main control factors in metal forming. Thus, round wire can be obtained by drawing in a single-cast die or a roller die or by radial displacement broaching. **Objectives and Methods Applied:** The article examines a model drawing operation performed in a single-cast die, a circle-triangle-circle roller die and in a radial displacement roller die. The models were built with the help of the Deform-3d software package. Based on the modelling results, deformation zones were analysed in a number of cross-sections. **Originality:** The stiffness index was used for the stress state analysis. **Findings:** The authors demonstrate that in the single-cast die drawing operation the compression stress does not reach the centre

of the billet, whereas in the roller die drawing operation the compression stress reaches across the entire cross-section. In the radial displacement roller die, the stress produces a cyclic effect on the billet resulting in a helical flow of metal. The flow patterns were analysed, and it was established that the single-cast die and the roller die processes are both characterized with a monotonic flow, which is due to a small rotation angle. **Practical Relevance:** Radial displacement broaching is based on a simple shear, which refers such drawing operation to nonmonotonic metal forming techniques. It is due to this mechanism that nanostructure is formed.

Keywords: Drawing, wire, torsion, modelling, radial displacement broaching.

References

1. Kharitonov V.A. The classification of metal forming processes in wire production. *Modelirovanie i razvitie processov*

- obrabotki metallov davleniem: mejdunar. sb. nauch. tr. / pod red. V.M. Salganika [Modeling and development of metal forming processes: International research papers]. Ed. by V.M. Salganik. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 49–59. (In Russ.)
- Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 7, July 2014, pp. 78–83.
 - Yoshida, K., Suga, K., Nakazima, K., Watanabe, K., Umezu, K. Processing technology of high dimensional accuracy shaped wire drawing for spring wire. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 8, August 2014, pp. 72–75.
 - Yamada, Y. Part 1: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 12, 1 December 2014, pp. 58–64.
 - Yamada, Y. Part 2: Properties of high carbon steel wires drawn at extremely slow speeds. *Wire Journal International*. Vol. 48, iss. 1, 1 January 2015, pp. 54–59.
 - Galvez, F., Atienza, J.M., Elices, M. Influence of the strain rate on the mechanical response of prestressing steel wires in cold drawing. *Wire Journal International*. Vol. 47, iss. 10, 1 October 2014, pp. 74–77.
 - Utyashev F.Z. *Sovremennye metody intensivnoj plasticheskoj deformatsii* [Advanced methods of severe plastic deformation]. Ufa, 2008, 313 p. (In Russ.)
 - Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. The current state and the further development of continuous round wire nanostructuring methods. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 3, pp. 69–73. (In Russ.)
 - Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. A study of radial-shear wire broaching based on modelling. *Metallurg* [Metallurgist], 2013, no. 11, pp. 83–87. (In Russ.)
 - Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Study of Radial-Shear Wire Broaching Based on Modelling. *Metallurgist*, March 2014, vol. 57, iss. 11, pp 1015–1021.
 - Kolmogorov V.L. *Napryajeniya, deformacii, razrushenie* [Stress, strain, fracture]. Leningrad: Metallurgiya, 1970, 229 p. (In Russ.)
 - Shitikov A.A. *Sovershenstvovanie tehnologii pnevmotermicheskoi formovki v sostoyanii sverhplastichnosti detalei tipa «polusfera»* [Improving the thermo-pneumatic forming process applicable to hemisphere shaped parts in the superplasticity state. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 2016, 18 p. (In Russ.)

Received 30/05/16

Усанов М.Ю., Харитонов В.А. Эффективность применения деформации кручения в способах производства наноструктурированной проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 66–71. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-66-71

Usanov M.Yu., Kharitonov V.A. The effectiveness of deformation torsion for the manufacture of ufg structured carbon wire. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 66–71. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-66-71