

УДК 621.7.044: 669.14: 620.18

ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ*

*Копцева Н.В., д.т.н., профессор кафедры литейного производства
и материаловедения (kopceva1948@mail.ru)*

*Ефимова Ю.Ю., к.т.н., доцент кафедры машиностроительных
и металлургических технологий (jefimova78@mail.ru)*

*Никитенко О.А., к.т.н., старший преподаватель кафедры
машиностроительных и металлургических технологий*

*Барышников М.П., к.т.н., доцент кафедры машиностроительных
и металлургических технологий*
Жеребцов М.С., аспирант

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38)

Аннотация. Увеличение скорости пластической деформации приводит к значительным изменениям в микроструктуре металлических материалов. Структуру и свойства металла определяют такие факторы, как величина давления (или импульса), скорость деформации (или продолжительность процесса) и температура. В работе исследовано влияние высокоскоростной деформации на микроструктуру материалов. С использованием исследовательского комплекса Gleeble 3500 осуществлена высокоскоростная деформация стали 20 при температурах 800, 900, 1000 и 1200 °С. Изучена микроструктура и определена микротвердость образцов. Показана принципиальная возможность обеспечить деформационное измельчение структуры низкоуглеродистой стали 20 при высокоскоростной деформации при температурах 800 – 1000 °С до размера зерна около 400 нм подобно тому, как это достигается при больших пластических деформациях без нагрева металла или с небольшим нагревом, не превышающим температуру рекристаллизации.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, высокоскоростная деформация, повышенная температура, ультрамелкозернистая структура, микротвердость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-123-127

В настоящее время известны различные способы получения объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов, большинство из которых основаны на интенсивных пластических деформациях [1 – 3]. К числу основных методов, с помощью которых были достигнуты большие деформации с истинными степенями, равными 10 и более, без разрушения образцов относятся кручение под высоким давлением [4] и равноканальное угловое прессование (РКУП) [5]. Имеются работы по получению УМЗ структур в ряде металлов и сплавов путем использования всестороннейковки [6], равноканальной угловой протяжки [7], винтовой экструзии [8] и др. Однако перечисленные методы получения УМЗ структуры не применимы для массового производства, что затрудняет их практическое использование.

* Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высоко-технологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (контракт 02.G25.31.0040), а также программы стратегического развития университета на 2012 – 2016 гг. (конкурсная поддержка Минобразования РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО).

На сегодняшний день имеются разработки, направленные на совершенствование методов больших пластических деформаций в целях их практического использования [9, 10]. В последние годы в связи с развитием ряда областей новой техники, а также в связи с разработкой и внедрением в промышленность новых перспективных технологических приемов обработки материалов большой научный и практический интерес вызывает высокоскоростное деформирование металлов [11 – 14].

Известно, что увеличение скорости пластической деформации приводит к значительным изменениям в микроструктуре металлических материалов [15, 16]. При этом структуру и свойства металла определяют такие факторы, как величина давления (или импульса), скорость деформации (или продолжительность процесса) и температура. В то же время влияние высокоскоростной деформации на микроструктуру материалов исследовано недостаточно.

Большие возможности для моделирования процесса высокоскоростной деформации при повышенных

температурах предоставляют комплексы физического моделирования Gleeble 3150, 3500, 3800 [17, 18]: они являются, по сути, высокоскоростными пластометрами с возможностью реализации практически неограниченного числа стадий обработки металлов давлением с постоянной или переменной по ходу обработки температурой или скоростью деформации. Простое в использовании собственное программное обеспечение формирует очень удобный интерфейс для создания программ термомеханических испытаний и физического моделирования, а также сбора и анализа полученных данных.

Нагрев образца осуществляется прямым пропусканием электрического тока, что позволяет нагревать образцы со скоростью до 10 000 °C/с, а также позволяет поддерживать постоянную температуру с точностью 1 °C. Благодаря высокой теплопроводности медных захватов, в которых закрепляется образец, в комплексе Gleeble 3500 возможно достигать высоких скоростей охлаждения.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы являлось исследование возможности получения УМЗ состояния в стали 20 высокоскоростным деформированием (ВСД), которое выполняли на комплексе Gleeble 3500 с использованием модуля «сжатие – растяжение».

Образцы диам. 10 и длиной 100 мм деформировали на сжатие при температурах 800, 900, 1000 и 1200 °C со скоростью деформирования 1000 мм/с и в последующем охлаждали со скоростью 34 °C/с. Степень деформации при различных температурах была одинаковой, ее задавали сжатием образца на 25 мм, которое осуществляли перемещением траверсы на соответствующее расстояние. Для выявления качественных и количественных характеристик микроструктуры использовали оптический микроскоп Meiji Techno с системой компьютерного анализа изображений Thixomet PRO [19], а также растровую электронную микроскопию (РЭМ) (сканирующий электронный микроскоп JSM 6490 LV).

В исходном состоянии объемная доля основной структурной составляющей стали 20 (феррита) составляла 76 %, перлита – 24 % (рис. 1, а), размер зерен находился в пределах 10 – 30 мкм, среднее межпластинчатое расстояние в перлите составляло 0,32 мкм (рис. 1, б).

Микроструктура после ВСД при различных температурах приведена на рис. 2. Микроструктура характеризуется наличием параллельных или взаимно перпендикулярных деформационных полос, расположенных с шагом 300 – 1000 нм, которые образуются в наиболее благоприятно ориентированных зернах и подобны полосовым структурам, возникающим при традиционных способах деформации со степенями $\varepsilon \leq 3 \div 4$. Одновременно прослеживается разбиение деформационных полос и исходных «чистых» зерен феррита (в которых отсутствовали деформационные полосы) на более мелкие по размерам области (фрагменты), которые имеют вид зерен равноосной формы с тонкими прямолинейными границами и равновесны-

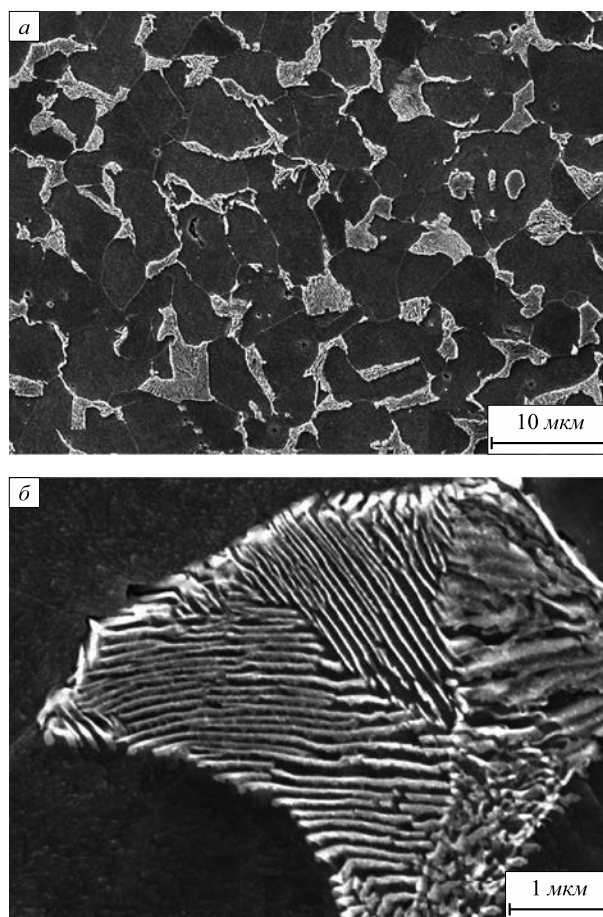


Рис. 1. Микроструктура стали 20 в исходном состоянии

Fig. 1. Microstructure of steel 20 in an initial state

ми углами в тройных стыках. Это свидетельствует о формировании большеугловых границ, измельчении ферритных зерен до 300 – 400 нм (фрагментировании) и образовании УМЗ структуры.

Наименьший размер зерен и большее относительное количество фрагментированного феррита наблюдали в образце, деформированном при температуре 800 °C (рис. 2, а). При этой температуре деформация стали 20 происходила в межкритическом интервале $A_{c1} - A_{c3}$, т.е. в двухфазной области аустенит + феррит, когда одновременно деформировались и аустенитные, и ферритные зерна. При этом происходила частичная динамическая рекристаллизация, в результате чего фрагменты феррита приобрели практически равноосную форму.

Образование рекристаллизованных зерен обусловлено повышением температуры в местах локализации деформации и является механизмом релаксации напряжений. Рекристаллизованные зерна группируются в деформационных полосах и в цепочках, располагающихся между полосами (рис. 2, б). Однако процесс рекристаллизации, очевидно, полностью завершиться не успевает, значительного роста рекристаллизованных зерен не происходит, и поэтому зерна диспергированного феррита остаются ультрамелкими – размером в среднем около 400 нм. Нерекристаллизованные участ-

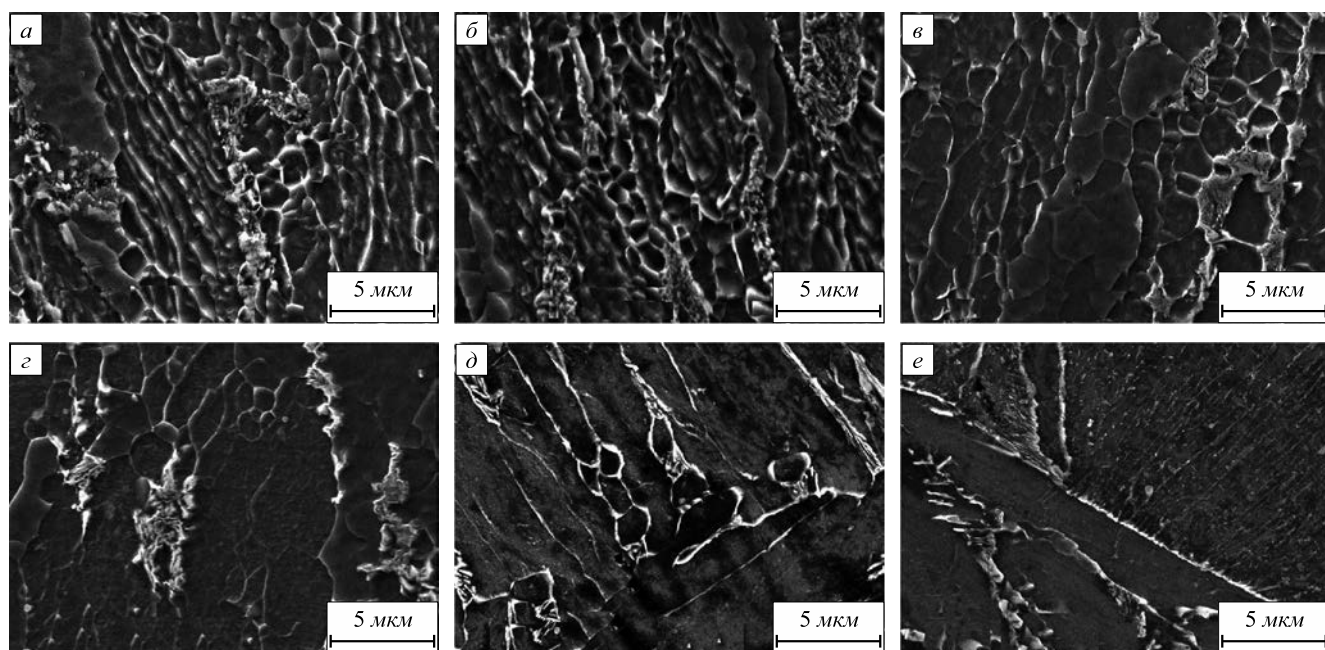


Рис. 2. Микроструктура стали 20 после высокоскоростной деформации при температуре 800 °C (а, б), 900 °C (в), 1000 °C (г) и 1200 °C (д, е)

Fig. 2. Microstructure of steel 20 after high-velocity deformation at the temperature of 800 °C (a, б), 900 °C (в), 1000 °C (г) and 1200 °C (д, е)

ки, видимо, представляют собой удлиненные зерна, состоящие из субзерен, образовавшихся, видимо, в результате динамической полигонизации.

Структура, полученная высокоскоростной деформацией при температуре 800 °C, оказалась во многом аналогична структуре, которую наблюдали в стали 20 после РКУП при температуре 400 °C (в микроструктуре также формировались деформационные полосы и ультрамелкие зерна размером 300 – 500 нм [20, 21]), а также при динамическом канально-угловом прессовании титана при повышенных температурах [11].

Деформация при температуре выше температуры A_{c3} (900, 1000 и 1200 °C) протекала в однофазной аустенитной области и также обеспечивала деформационное измельчение структуры. При этом структура после ВСД при 900 и 1000 °C оказалась во многом аналогична структуре после деформации при 800 °C и отличалась только большей величиной зерна (рис. 2, в, г). При охлаждении, которое осуществляли немедленно после деформации, выделяющийся феррит, видимо, наследовал особенности дислокационной структуры деформированного аустенита и претерпевал рекристаллизацию. Вследствие более высокой температуры деформации динамическая рекристаллизация протекала более полно, а также происходил рост рекристаллизованных зерен, что привело к увеличению размера зерна до 750 – 2500 нм. Перлитные участки в такой структуре также диспергированы.

После деформации при 1200 °C основным структурным элементом, формирующимся в результате деформации, являются деформационные полосы шириной 1 – 5 мкм (рис. 2, д). При этом в структуре

очень редко обнаруживаются ультрамелкие зерна феррита, что говорит о практически полном протекании динамической рекристаллизации. После ВСД при температуре 1200 °C, кроме того, изменяется морфология структурных составляющих: феррит имеет игольчатое строение, а вместо пластинчатой феррито-карбидной смеси часто наблюдается структура низкоуглеродистого бейнита (рис. 2, е).

Цементитная фаза при температурных режимах деформирования в области фрагментации аустенита частично претерпевает сфероидизацию.

Изменения микротвердости стали 20, полученной при высокоскоростной деформации при повышенной температуре и при РКУП, показаны на рис. 3.

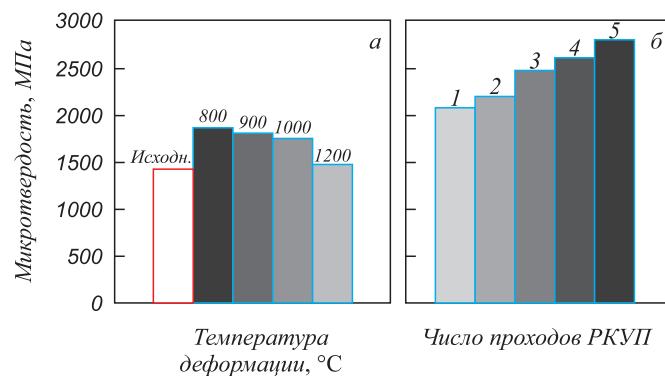


Рис. 3. Сопоставление микротвердости стали 20 после высокоскоростной деформации при различных температурах (а) и после РКУП при 400 °C (б)

Fig. 3. Comparison of microhardness of steel 20 after high-velocity deformation at different temperatures (a) and after ECAP at 400 °C (b)

Заметное уменьшение твердости наблюдается только после деформации при температуре 1200 °С, а по сравнению с РКУП твердость после ВСД понижена. Однако после ВСД при температурах 800 – 1000 °С твердость по сравнению с твердостью в исходном состоянии возросла примерно на 20 %, что обусловлено измельчением зерна и фрагментацией феррита.

Выводы. Результаты исследования, полученные с использованием комплекса Gleeble 3500, показали принципиальную возможность обеспечить деформационное измельчение структуры стали 20 при высокоскоростной деформации при температурах 800 – 1000 °С до размера зерен около 400 нм подобно тому, как это достигается при больших пластических деформациях без нагрева металла или с небольшим нагревом, не превышающим температуру рекристаллизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Song R., Speer J.G., Matlock D.K., Ponge D., Raabe D. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 441. № 1-2. P. 1 – 17.
- Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
- Zrnik J., Dobatkin S.V., Kovarik T., Dzugan J. Ultrafine grain structure development in steels with different carbon content subjected to severe plastic deformation. – *The Minerals, Metals and Materials Society – 3-rd International Conference on Processing Materials for Properties 2008, PMP III*. – Bangkok, 2009. P. 850 – 855.
- Колмогоров Г.Л. Технологические особенности получения наноструктурных материалов методом интенсивной пластической деформации кручением // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2008. № 9. С. 18 – 20.
- He T., Xiong Y., Ren F., Guo Z., Volinsky A.A. Microstructure of ultra-fine-grained high carbon steel prepared by equal channel angular pressing // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 535. P. 306 – 310.
- Ситдииков О.Ш. Эволюция микроструктуры высокопрочного алюминиевого сплава в процессе высокотемпературной всестороннейковки с большой степенью деформации // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 1. С. 15 – 26.
- Чукин М.В., Емалева Д.Г. Влияние термической обработки на эволюцию структуры и свойств стальной проволоки в процессе РКУ протяжки // *Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*. 2008. № 2. С. 70, 71.
- Бейгельзимер Я.Е., Сынков С.Г., Орлов Д.В. Винтовая экструзия // *Обработка металлов давлением*. 2006. № 4. С. 17 – 22.
- Валиев 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.
- Chukin M.V., Korchunov A.G., Polyakova M.A., Emaleeva D.G. Forming ultrafine-grain structure in steel wire by continuous deformation // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. № 6. P. 595 – 597.
- Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Хомская И.В., Шорохов Е.В., Насонов П.А. Повышение механических свойств титана методом динамического канально-углового прессования // *Вопросы материаловедения*. 2012. № 1 (69). С. 29 – 37.
- Дун Юечэн, Ситдииков В.Д., Александров И.В., Ванг Д.Т. Влияние высокоскоростной деформации на микроструктуру и кристаллографическую текстуру меди в различных структурных состояниях // *Письма о материалах*. 2013. Т. 3. № 2 (10). С. 169 – 172.
- Бондарь М.П., Псахье С.Г., Дмитриев А.И., Никонов А.Ю. Об условиях локализации деформации и фрагментации микроструктуры при высокоскоростном нагружении // *Физическая мезомеханика*. 2013. Т. 16. № 2. С. 5 – 13.
- Петрова А.Н., Бродова И.Г., Ширинкина И.Г. и др. Особенности ультрамелкозернистого и нанокристаллического состояний в сплаве АМЦ, полученных при интенсивных воздействиях // *Письма о материалах*. 2013. Т. 3. № 2 (10). С. 126 – 129.
- Meyers M.A. *Dynamic Behavior of Materials*. John Wiley & Sons. – New York, 1994. P. 393.
- Bhattacharyya A., Rittel D., Ravichandran G. Effect of strain rate on deformation texture in OFHC copper // *Scripta Mater*. 2005. Vol. 52. P. 657 – 661.
- Рудской А.И., Колбасников Н.Г., Зотов О.Г. и др. Исследование структуры и свойств TRIP-сталей на комплексе GLEEBLE-3800 // *Черные металлы*. 2010. № 2. С. 8 – 14.
- Чукин Д.М., Ишимов А.С., Жеребцов М.С. Использование комплекса Gleeble 3500 для анализа фазовых превращений в стали эвтектоидного состава, микролегированной бором. – В кн.: *Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр.* / Под ред. М.В. Чукина. – Магнитогорск: изд. Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. Вып. 38. С. 53 – 57.
- Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing // *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. Vol. 54. № 7-8. С. 387 – 392.
- Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П., Никитенко О.А. Формирование структуры и механических свойств углеродистой конструкционной стали в процессе наноструктурирования методом равноканального углового прессования // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 7. С. 11 – 17.
- Копцева Н.В. Деформационное измельчение структуры углеродистых конструкционных сталей методом равноканального углового прессования для повышения прочности продукции метизного производства // *Сталь*. 2012. № 8. С. 50 – 56.

Поступила 9 января 2014 г.

ULTRAFINE-GRAINED STRUCTURE FORMATION IN CARBON STEEL BY HIGH-SPEED COMPRESSION DEFORMATION AT INCREASED TEMPERATURES

N.V. Koptseva, Yu.Yu. Efimova, O.A. Nikitenko, M.P. Baryshnikov, M.S. Zhrebtsov

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The velocity increase of plastic deformation leads to significant changes in the microstructure of metallic materials. The structure and properties of the metal define such factors as pressure value (or impulse), deformation velocity (or the duration of the process) and temperature. The work is devoted to the research of the influ-

ence of high-velocity deformation on the microstructure of materials. Using research complex Gleeble 3500 high-speed deformation of steel grade 20 at temperatures of 800, 900, 1000 and 1200 °C was carried out. The microstructure was studied and the microhardness of samples was determined. The principal possibility to provide strain refinement of low-carbon steel structure up to a grain size of about 400 nanometers during high-speed deformation at temperatures of 800–1000 °C is shown, just as it is achieved at a severe plastic deformation without heating or with a slight heating which doesn't exceed the recrystallization temperature.

Keywords: low-carbon steel, high-speed deformation, high temperature, ultrafine-grained structure, microhardness.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-123-127

REFERENCES

1. Song R., Speer J.G., Matlock D.K., Ponge D., Raabe D. Overview of pro-cessing, microstructure and mechanical properties of ultra-fine grained bcc steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, vol. 441, no. 1–2, pp. 1–17.
2. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Ob"emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy* [Volumetric nanostructural metallic material]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2007. 398 p. (In Russ.).
3. Zrnik J., Dobatkin S.V., Kovarik T., Dzugan J. Ultrafine grain structure development in steels with different carbon content subjected to severe plastic deformation. *The Minerals, Metals and Materials Society – 3-rd International Conference on Processing Materials for Properties 2008, PMP III*. Bangkok, 2009, pp. 850–855.
4. Kolmogorov G.L. Technological peculiarities of receiving nano-structural materials by the method of intensive plastic torsional deformation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 9, pp. 18–20. (In Russ.).
5. He T., Xiong Y., Ren F., Guo Z., Volinsky A.A. Microstructure of ultra-fine-grained high carbon steel prepared by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2012, vol. 535, pp. 306–310.
6. Sitdikov O.Sh. Microstructure evolution of extrahigh tensile aluminum alloy in the process of high-temperature all-round forging with a great deformation degree. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2011, no. 1, pp. 15–26. (In Russ.).
7. Chukin M.V., Emaleeva D.G. Heat treatment influence on the evolution of structure and properties of steel wire in the process of equal channel angular broaching. *Vestnik Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova*. 2008, no. 2, pp. 70–71. (In Russ.).
8. Beigel'zimer Ya.E., Synkov S.G., Orlov D.V. Screw extrusion. *Obrabotka metallov davleniem*. 2006, no. 4, pp. 17–22. (In Russ.).
9. Valiev 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.).
10. Chukin M.V., Korchunov A.G., Polyakova M.A., Emaleeva D.G. Forming ultrafine-grain structure in steel wire by continuous deformation. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 6, pp. 595–597.
11. Zel'dovich V.I., Frolova N.Yu., Kheifets A.E., Khomskaya I.V., Shorokhov E.V., Nasonov P.A. Increase of titanium mechanical properties by the method of dynamic channel angular pressing. *Voprosy materialovedeniya*. 2012, no. 1 (69), pp. 29–37. (In Russ.).
12. Dun Yuechen, Sitdikov V.D., Aleksandrov I.V., Vang D.T. Influence of high-velocity deformation on copper microstructure and crystallographic texture in different structural states. *Pis'ma o materialakh*. 2013, vol. 3, no. 2 (10), pp. 169–172. (In Russ.).
13. Bondar' M.P., Psakh'e S.G., Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu. On the conditions of strain localization and microstructure fragmentation under high-rate loading. *Physical Mesomechanics*. 2013, vol. 16, no. 3, pp. 191–199.
14. Petrova A.N., Brodova I.G., Shirinkina I.G., Nasonov P.A., Shorokhov E.V. Peculiarities of ultrafine-grained and nanocrystal states in the AlMn alloy obtained at intensive impacts. *Pis'ma o materialakh*. 2013, vol. 3, no. 2 (10), pp. 126–129. (In Russ.).
15. Meyers M.A. *Dynamic Behavior of Materials*. John Wiley & Sons. New York, 1994, pp. 393.
16. Bhattacharyya A., Rittel D., Ravichandran G. Effect of strain rate on deformation texture in OFHC copper. *Scripta Mater*. 2005, vol. 52, pp. 657–661.
17. Rudskoi A.I., Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Ringinen D.A., Nemtinov A.A., Kuznetsov V.V. Research of the structure and properties of TRIP-steels on the complex GLEEBLE-3800. *Chemnye metall*. 2010, no. 2, pp. 8–14. (In Russ.).
18. Chukin D.M., Ishimov A.S., Zherebtsov M.S. The use of the complex Gleeble 3500 for the analysis of phase transformation in steel of the eutectoid composition, microalloyed by boron. In: *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Treatment of solid and layered materials: interuniversity scientific collected papers]. Chukin M.V. ed. Magnitogorsk: izd. Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2012. Issue 38, pp. 53–57. (In Russ.).
19. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012, vol. 54, no. 7–8, pp. 387–392.
20. Koptseva N.V., Efimova Yu. Yu., Baryshnikov M.P., Nikitenko O.A. Formation of the structure and mechanical properties of carbon structural steel in the process of nanostructuring by the method of equal channel angular pressing. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2011, no. 7, pp. 11–17. (In Russ.).
21. Koptseva N.V. Deformation grinding of the structure of carbon structural steel by the method of equal channel angular pressing to increase hardware production durability. *Stal'*. 2012, no. 8, pp. 50–56. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed in the frameworks of realization of the complex project to create high-technological production with the participation of higher educational institution (contract 02.G25.31.0040), as well as the program of the strategic development of the University on 2012 – 2016 (competitive support of the Ministry of Education of RF of the strategic development programs of the of State Educational Institutions of Higher Professional Education).

Information about the authors:

N.V. Koptseva, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Foundry and Materials Science" (koptseva1948@mail.ru)

Yu.Yu. Efimova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Engineering and Metallurgical Technology" (jefimova78@mail.ru)

O.A. Nikitenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair "Engineering and Metallurgical Technology"

M.P. Baryshnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Engineering and Metallurgical Technology"

M.S. Zherebtsov, Postgraduate

Received January 9, 2014