

## Равноканальное угловое прессование и экструзия низкоуглеродистой стали

А.М. Иванов

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия  
a.m.ivanov@iptpn.yasn.ru*

**Аннотация.** Представлена комбинированная обработка низкоуглеродистой стали Ст3сп посредством равноканального углового прессования и экструзии. Показано повышение прочности стали в результате комбинированной обработки. При этом низкая температура (213 К) испытания образцов из упрочненной стали на одноосное растяжение практически не влияет на изменение её прочности, тогда как для стали в исходном состоянии понижение температуры оказывает влияние на рост значений этих характеристик. Выполнено описание механизмов разрушения на основе анализа фрактограмм изломов образцов. Качественное отличие в механизме разрушения стали до и после комбинированной обработки не установлено. Разрушение образцов из стали Ст3сп в исходном и упрочненном посредством РКУП и экструзии состояниях вязкое с образованием ямок путем слияния микропор.

**Ключевые слова:** сталь, равноканальное угловое прессование, экструзия, прочность, пластичность, температура, образец, разрушение, фрактограмма, излом.

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 СО РАН.

## Equal channel angular pressing and extrusion of low-carbon steel

A.M. Ivanov

*V.P. Larionov's Institute of the physical and engineering problems of the North, Siberian Department of Russian academy of sciences, (677980, Yakutsk, Russia, Oktyabrskaja str., 1),  
e-mail: a.m.ivanov@iptpn.yasn.ru*

**Abstract.** Combined treatment of low-carbon steel St3sp by means of equal-channel angular pressing and extrusion is presented. The increase in the strength of steel as a result of combined treatment is shown. At the same time, the low temperature (213 K) of testing hardened steel specimens for uniaxial stretching practically does not affect the change in its strength, whereas for steel in the initial state, a decrease in temperature affects the growth of the values of these characteristics. A description of the mechanisms of failure based on the analysis of fractograms of fissures of specimens is performed. A qualitative difference in the mechanism of the destruction of steel before and after the combined treatment has not been established. Destruction of samples from steel St3sp in the initial and reinforced by ECAP and extrusion conditions is viscous with the formation of pits by merging micropores.

**Key words:** steel, equal-channel angular pressing, extrusion, strength, plasticity, temperature, specimen, fracture, fractogram, fissure

**Acknowledgments:** the study was performed on the program of basic scientific research of the State academies of Sciences (the III.28.1.1 project.) with use of the multiple commuting access equipment "Station of Natural Tests" of IFTPS of the SB RAS.

### Введение

В настоящее время развитие промышленности как в гражданской сфере, так и в военной отрасли предъявляет комплекс требований к используемым материалам и технологиям их обработки. В будущем в связи с перспективой создания более совершенных изделий и технических средств к материалам будут предъявлены еще более жесткие требования по функциональным и эксплуатационным характеристикам. В этой связи разработка комбинированных методов обработки с целью максимального повышения физико-механических характеристик металлов и их сплавов является актуальной научно-технической задачей.

Под комбинированными методами обработки материалов будем принимать использование способов как одной физической природы, например, механических, реализуемых в одном технологическом процессе (возможно даже в одном устройстве), так и различной природы, или в определенной последовательности в разные промежутки времени.

Для улучшения эксплуатационных свойств материалов широко используются термопластические методы. Неоценимый вклад в развитие методов термомеханической обработки материалов внесли научные школы отечественных ученых: В.Д. Садовского, М.Л. Бернштейна, А.П. Гуляева, В.С. Ивановой и других [1–4 и др.]. При использовании традиционных методов термопластической обработки в работе [5] показано, что наиболее благоприятное влияние на механические свойства стали Ст3 оказывает механико-термическая обработка (МТО) по режиму: пластическая деформация растяжением на 6 % при температуре 773 К с последующей выдержкой при этой температуре в течение 20 ч. Наибольший эффект в повышении физико-механических свойств металлических материалов достигается при использовании методов интенсивной пластической деформации (ИПД), как в индивидуальном порядке, так и в комбинации с термической обработкой (ТО), а также сочетанием различных схем ИПД. Методы ИПД обеспечивают уникальные свойства металлическим материалам [6–20 и т.д.]. Деформации высокой степени приводят к изменению структуры, прочности, пластичности, микротвердости и других характеристик.

Развитие комбинированных методов обработки вызвано тем, что каждый из методов имеет определенные ограничения по достижению накопленной деформации и изменению структурно-фазового состояния в материале. В свою очередь, комбинирование методов ИПД и ТО, а также различных схем сдвиговой деформации

открывает определенные возможности для решения задачи оптимального сочетания высоких характеристик прочности и пластичности металлических материалов [11, 13, 21 и др.]. В комбинировании методов механической обработки и ТО следует учитывать тот факт, что закалка повышает твердость и прочность, снижает вязкость и пластичность, но вместе с тем исключает мягкие ферритные включения, образуется мартенситная структура и уменьшается размер зерна; отжиг снижает твердость, тем самым улучшает деформируемость стали, снимает внутренние напряжения и т.д., а деформационная обработка уменьшает размер зерна, повышают твердость и прочность. В [11] в случае холодного равноканального углового прессования (РКУП) с последующим отжигом в низкоуглеродистой стали 10Г2ФТ сформирована субмикроструктурная структура из двух исходных состояний (горячекатаного и закаленного). Повышение прочности и хладостойкости конструкционных сталей комбинированием метода РКУП и отжига показано в [22]. Комбинированные методы ИПД со сдвигом, в которых реализуются различные схемы деформации, обеспечивают более широкие возможности в структурообразовании в материале. Повышение пределов текучести и прочности со снижением пластичности достигнуто в результате экструзии и винтового прессования объемной заготовки из 09Г2С [23].

В связи с тем, что стоит вопрос использования упрочненных металлических материалов в условиях низких температур Крайнего Севера и Арктики представляет интерес исследование влияния низкой температуры на механические свойства сталей, подвергнутых обработке комбинированными деформационными методами.

Целью работы являлось исследование и сравнение механических свойств низкоуглеродистой стали Ст3сп, подвергнутой РКУП и экструзии, при положительной и отрицательной температуре.

### Материал и методика исследования

Исследовалась низкоуглеродистая конструкционная сталь Ст3сп (в %: 0,18 С, 0,23 Si, 0,60 Mn, 0,01 Cr, ≤0,003 Ni, 0,01 P, 0,01 S, 0,05 Cu, 0,05 Al, остальное Fe.). Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WASAG)».

Последовательность выполнения комбинированной деформационной обработки следующая. Вначале осуществляли РКУП объемных заготовок Ø19,8×60 мм в n=1 проход при температуре 673 К. Затем из выпрессованной заготовки

изготавливали другую заготовку  $\varnothing 11,8 \times 40$  мм и подвергали экструдированию в один проход при такой же температуре. РКУП и экструзию выполняли на гидравлическом прессе ПСУ 125 типа ЗИМ усилием 1250 кН с помощью специальных оснасток. До деформационной обработки заготовка предварительно нагревалась и выдерживалась в муфельной печи до температуры 673 К, затем помещалась в технологическую оснастку, нагретую до 673 К с помощью накидной печи. Для уменьшения трения поверхности заготовки о стенки канала матрицы использовали технологическую смазку РОСОЙЛ-АНГЕЛИНА с добавками чешуйчатого графита. Использованные оснастки обеспечивали степень деформации: 0,64 при РКУП и 0,4 при экструзии. Из упрочненных заготовок изготавливали образцы для механических испытаний одноосным растяжением. Образцы с рабочим участком размером  $\varnothing 3 \times 15$  мм испытывали на одноосное растяжение на машине UTS-20k фирмы «UTS TestSysteme GmbH» (Lammerweg 29.D-89079 Ulm) при постоянной скорости нагружения  $\approx 3,33 \cdot 10^{-5}$  м·с<sup>-1</sup> в условиях комнатной температуры и при температуре 213 К. Охлаждение образцов в процессе испытания осуществлялось с помощью температурной камеры и холодильной установки «Noske-Kaeser» типа ТЕЕ 52/70Х.

### Результаты исследований и их обсуждение

Полученные результаты по характеристикам прочности представлены в таблице. В результате упрочнения материала посредством РКУП и экструзии в один проход при температуре 673 К предел текучести  $\sigma_T$  повысился в 2,5 раз, а предел прочности  $\sigma_B$  – в 1,8 раз. При повышении напряжений текучести и прочности при температуре 213 К в 1,14 и 1,13 раза, соответственно, для упрочненной стали влияние низкой температуры незначительно, в пределах ошибки эксперимента. Полученные результаты по прочности превышают данные работы [24], в которой для Ст3сп достигнуто двукратное повышение  $\sigma_T$  и в 1,5 раз  $\sigma_B$  в результате упрочнения посредством экструзии с винтовым прессованием (ЭВП) в один проход при температуре 673 К. ЭВП реализовалось в одном устройстве. Относительное остаточное сужение образцов в исходном состоянии в момент разрушения при температуре испытания 213 К в 1,9 раз меньше, чем при 293 К.

Фрактографические исследования поверхностей разрушения образцов из стали Ст3сп в состоянии поставки и после обработки посредством РКУП и экструзии, разрушенных при температуре 293 К и 213 К, показали следующее.

**Прочностные характеристики стали Ст3сп**

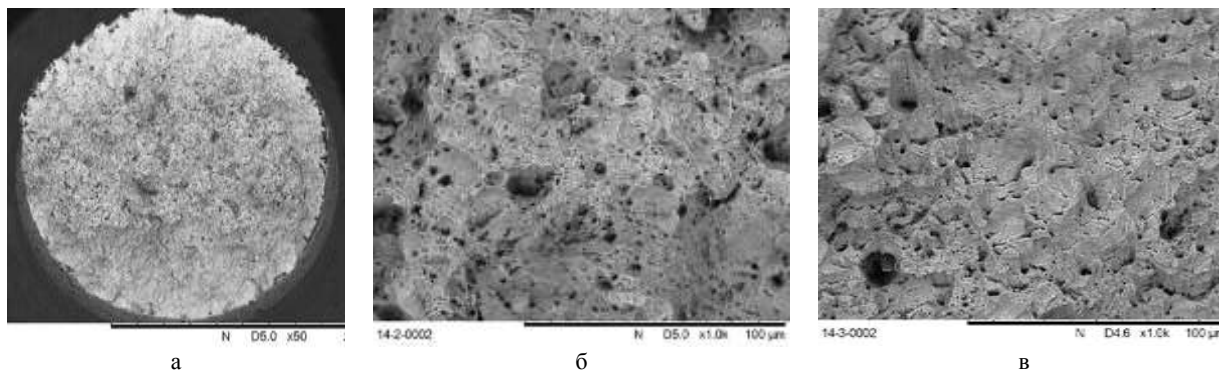
№	Состояние стали	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Температура испытания: 293 К			
1	Состояние поставки	324	483,5
2	РКУП, 673 К, n=1 + экструзия, 673 К, n=1	818	864,5
Температура испытания: 213 К			
3	Состояние поставки	369,5	547
4	РКУП, 673 К, n=1 + экструзия, 673 К, n=1	854	910,5

Вязкое разрушение образцов из Ст3сп в исходном состоянии было описано в [25], в которой показано, что изломы волокнистой и периферийной частей поверхности разрушения образцов сформированы по механизму вязкого разрушения. При этом механизм разрушения определяется образованием ямок путем слияния микропор.

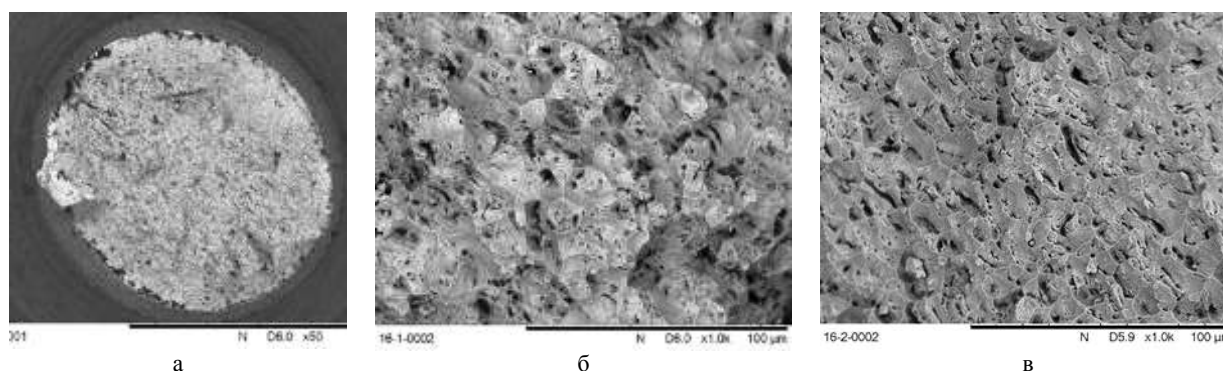
Анализ фрактограмм изломов в случае РКУП в n=1 проход при 673 К + экструзии в n=1 проход при 673 К и температуры испытания  $T_{\text{растяж}}=293$  К, а также для такого же режима обработки и  $T_{\text{растяж}}=213$  К позволяет установить механизм разрушения образцов. Во всех случаях поверхность разрушения образцов состоит из двух основных зон: центральной волокнистой зоны, в которой зародилось разрушение и произошел медленный рост трещины, и зоны среза.

*Разрушение образцов из Ст3сп, подвергнутых РКУП и экструзии, при температуре 293 К.* Макрорельеф поверхности разрушения цилиндрических образцов из стали Ст3сп в состоянии после РКУП и экструзии при одноосном растяжении и температуре испытаний 293 К показывает вязкое разрушение с образованием чашечного излома в шейке растянутого образца с утяжкой в зоне локализации деформации и с образованием губ среза (рис. 1а). Относительное сужение  $\psi_k$  в результате упрочнения в среднем составляет 25,13 %, что в 1,8 раз меньше, чем для материала в исходном состоянии ( $\psi_k=44,93$  % при 293 К). Макроповерхность разрушения неоднородная, матовая.

Волокнистость строения поверхности разрушения в центральной зоне (рис. 1б) характеризует вязкий характер разрушения в этой зоне и медленный рост трещины. В волокнистой зоне образование ямок произошло путем слияния микропор при разрыве перемычек между ними. Вязкое разрушение характеризуется ямками нормального отрыва, разделенных гребнями с острыми краями. В центральной зоне присутствуют ямки и микроямки. Размеры микроямок и ямок охватывают широкий



**Рис. 1.** Макро- и микрорельефы излома образца из стали Ст3сп, подвергнутой РКУП и экструзии, а затем испытанной при комнатной температуре: а – общий вид; б – волокнистая зона; в – зона среза.



**Рис. 2.** Макро- и микрорельефы излома образца из стали Ст3сп, подвергнутой РКУП и экструзии, а затем испытанной при температуре 213 К: а – общий вид; б – волокнистая зона; в – зона среза.

диапазон, что обусловлено значительными колебаниями размеров зерен и дисперсных включений в исследуемой стали. Размеры микроямок порядка  $0,2 \div 0,5$  мкм, а максимальные размеры ямок в изломе  $\sim 8 \div 10$  мкм. Наблюдается образование микротрещин путем слияния пор.

Излом периферийной части шейки образцов также сформирован по механизму вязкого разрушения и характеризуется вытянутыми ямками сдвига, которые сформировались при разрушении перемычек сдвигом (рис. 1в). Присутствуют ямки размером до 14 мкм и большое количество микроямок.

*Разрушение образцов из Ст3сп, подвергнутых РКУП и экструзии, при температуре 213 К.* Изломы разрушенных при температуре 213 К образцов из стали Ст3сп, подвергнутых РКУП и экструзии, представляют собой качественно такую же картину, что и изломы образцов, подвергнутых РКУП и экструзии и разрушенных при 292 К (рис. 2). Изломы разрушенных при 213 К образцов характеризуются большим количеством микротрещин по сравнению с изломами образцов, разрушенных при 293 К. Разрыв образцов при 213 К произошел при большей утяжке, чем при 293 К (разница примерно в 1,13 раз). Более высокая пластичность упрочненных

сталей при низких температурах отмечалась и в других работах, в частности в [26–28].

Показатели прочности и пластичности, данные фрактографических исследований, а также результаты предыдущих работ указывают на то, что упрочнение стали Ст3сп при комбинированной обработке произошло за счет уменьшения размера зерен и повышения плотности дислокаций. Качественного отличия в механизме разрушения стали до и после обработки не наблюдается.

#### Выводы

Таким образом, использованный комбинированный метод РКУП и экструзии достаточно эффективен для упрочнения сталей.

В результате РКУП и экструзии объемных заготовок из низкоуглеродистой стали Ст3сп достигнуто повышение предела текучести в 2,5 раз, предела прочности в 1,8 раз и почти двукратное понижение пластичности. При низкой температуре (213 К) достигнуто повышение предела текучести в 1,14 раз и предела прочности в 1,13 раза для Ст3сп в исходном состоянии при снижении её пластичности в 1,9 раз. Понижение температуры испытания до 213 К для упрочненной стали не приводит к изменению прочностных характеристик.

Показано, что разрушение образцов из стали

СтЗсп в исходном и упрочненном посредством РКУП и экструзии состояниях вязкое с образованием ямок путем слияния микропор. Изломы образцов имеют характерный вид с центральной волокнистой зоной зарождения разрушения и медленного роста трещины, а также периферийной зоной среза. Качественного отличия в механизме разрушения стали до и после комбинированной обработки не наблюдается. Различие в размерах и концентрации ямок в зонах изломов для разных состояний стали может быть обусловлено природой материала, его способностью сопротивляться пластическим деформациям и зарождению микротрещин, что в свою очередь зависит от размеров зерен, размеров и плотности включений в материале и других факторов.

### Литература

1. Иванова В.С., Гордиенко Л.К. Новые пути повышения прочности металлов. – М.: Наука, 1964. – 118 с.
2. Гуляев А.П. Структурные изменения при термомеханической обработке стали и их влияние на механические свойства / *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1965. № 11. С. 9–17.
3. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. 1. – М.: Металлургия, 1968. – 596 с.
4. Григорьев А.К., Коджаспиров Г.Е. Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве. – М.: Машиностроение, Л.О., 1985. – 143 с.
5. Григорьев Р.С., Сосин Т.С., Степанов В.П., Яковлев П.Г. Термопластическое упрочнение как перспективное направление в создании высокопрочных материалов / *Научно-технический прогресс и физико-технические проблемы Севера*. Якутск, 1972. С. 68–87.
6. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностранной литературы. – 1955. 444 с.
7. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И., Павлик Д.А., Мальшиев В.Ф. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Навука і тэхніка. – 1994. 231 с.
8. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured materials: Fundamentals and Applications. – John Wiley & Sons. – 2014.
9. Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M. Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties / *Journal of Materials Science*. 1993. Vol. 28. Issue 11. P. 2898 – 2902.
10. Zhu Y.T., Jiang H., Huang J., Lowe T.C. A new route to bulk nanostructured metals / *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. P. 1559–1562.
11. Sastri Sh.M.L., Dobatkin S.V., Sidorova S.V. Formation of submicrocrystalline structure in 10GFT steel with cold equal-channel angular pressing and subsequent heating / *Russian Metallurgy*. 2004. No. 2. P. 129–134.
12. Лотков А.И., Гришюков В.Н., Дударев Е.Ф., Гирсова Н.В., Табаченко А.Н. Формирование ультрамелкозернистого состояния, мартенситные превращения и неупругие свойства никелида титана после «abc»-прессования / *Вопросы материаловедения*. 2008. № 1(53). С. 161–165.
13. Stolyarov V.V. Features of deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy / *Reviews on Advanced Materials Science*. 2010. Vol. 25. P. 194–202.
14. Li L., Virta J. Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure / *Materials Science and Technology*. 2011. Vol. 27. No. 5. P. 845–862.
15. Maier G.G., Astafurova E.G., Maier H.J., etc. Annealing behavior of ultrafine grained structure in low-carbon steel produced by equal channel angular pressing / *Materials Science and Engineering A – Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2013. Vol. 581. No. 1. P. 104–107.
16. Donic T., Martikán M., Hadzima B. New unique ECAP system with ultrasound and back-pressure / 2014 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 63. 012047 (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012047>).
17. Park K-T., Park L., Kim H.J., Kim S.B., Lee C.S. Analysis on dynamic tensile extrusion behavior of UFG OFHC Cu / 2014 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 63. 012144 (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012144>).
18. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. Issue 7. P. 881–982.
19. Helmig R.J., Janacek M., Hadzima B., Gendelman O.V., Shapiro M., Molodova X., Springer A., Estrin Y. A Portrait of copper processed by equal channel angular pressing / *Materials Transactions*. 2008. Vol. 49. No. 1. P. 31–37.
20. Zehetbauer M.J., Stüwe H.P., Vorhauer A., Schafner E., Kohout J. The Role of Hydrostatic Pressure in Severe Plastic Deformation. In: *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: Proc. Of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation. Fundamentals – Processing – Application*. (Vienna, Austria, 9–13 December 2002). Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 2004. P. 435–446.
21. Ivanov A.M., Ugurchiev U.H., Stolyarov V.V., Petrova N.D., Platonov A.A. Intense plastic



deformation of structural steel / Steel in Translation. 2012. Vol. 42. No. 6. P. 495–498.

22. *Иванов А.М., Сыромятникова А.С., Петрова Н.Д.* Упрочнение интенсивной пластической деформацией и разрушение конструкционной стали / Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 3. С. 39–42.

23. *Иванов А.М., Петрова Н.Д., Ленов В.В.* Влияние экструзии и винтового прессования на структуру и механические свойства низколегированной стали / Наука и образование. 2015. № 4 (80). С. 87–90.

24. *Иванов А.М., Коваленко Н.Д., Рааб Г.И.* Влияние комбинированного воздействия экструзией и винтовым прессованием на механические свойства низкоуглеродистой стали при низкой температуре / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Том 84. № 1(1). С. 66–70.

25. *Коваленко Н.Д., Иванов А.М.* Механические свойства и механизм разрушения экструдированной низкоуглеродистой стали при низкой температуре / Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 424–428.

26. *Серебряный В.Н., Добаткин С.В.* Возможности повышения пластичности и деформируемости магниевых сплавов с использованием методов интенсивной пластической деформации. Часть 1. Влияние структуры (Обзор) / Материаловедение. 2013. № 12. С. 13–26.

27. *Серебряный В.Н., Добаткин С.В.* Возможности повышения пластичности и деформируемости магниевых сплавов с использованием методов интенсивной пластической деформации. Часть 2. Влияние текстуры (Обзор) / Материаловедение. 2015. № 11. С. 9–22.

28. *Иванов А.М.* Прочность и механизм разрушения низколегированной стали, подвергнутой комбинированной деформационной обработке / Материаловедение. 2018. № 2. С. 13–17.

### References

1. *Ivanova V.S., Gordienko L.K.* New ways to increase the strength of metals. – M.: Nauka, 1964. – 118 p. [in Russian]

2. *Gulyaev A.P.* Structural changes in thermomechanical processing of steel and their influence on mechanical properties / Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 1965. № 11. P. 9 – 17. [in Russian]

3. *Bernshtein M.L.* Thermomechanical treatment of metals and alloys. Vol. 1. – M.: Metallurgiya, 1968. – 596 p. [in Russian]

4. *Grigoryev A.K., Kozhaspirov G.E.* Thermomechanical hardening of steel in blank production. – M.: Mashinostroyeniye, LO, 1985. – 143 p. [in Russian].

5. *Grigoryev R.S., Sosin T.S., Stepanov V.P., Yakovlev P.G.* Thermoplastic hardening as a promising direction in the development of high-strength materials / Nauchno-tekhnicheskiy progress i fiziko-tekhnicheskiye problemy Severa. Yakutsk, 1972. P. 68 – 87. [in Russian]

6. *Bridgman P.V.* Study of large plastic deformations and rupture. – M.: Izdatel'stvo inostrannoy literatury. – 1955. 444 p. [in Russian]

7. *Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I., Pavlik D.A., Malyshev V.F.* Processes of plastic structuring of metals. – Minsk: Navuka i tékhnika. – 1994. 231 p. [in Russian]

8. *Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G.* Bulk Nanostructured materials: Fundamentals and Applications. – John Wiley & Sons. – 2014.

9. *Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeev R.M.* Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties / Journal of Materials Science. 1993. Vol. 28. Issue 11. P. 2898 – 2902.

10. *Zhu Y.T., Jiang H., Huang J., Lowe T.C.* A new route to bulk nanostructured metals / Metallurgical and Materials Transactions A. 2001. Vol. 32. P. 1559 – 1562.

11. *Sastri Sh.M.L., Dobatkin S.V., Sidorova S.V.* Formation of submicrocrystalline structure in 10GFT steel with cold equal-channel angular pressing and subsequent heating / Russian Metallurgy. 2004. No. 2. P. 129 – 134.

12. *Lotkov A.I., Grishkov V.N., Dudarev E.F., Girsova N.V., Tabachenko A.N.* Formation of ultrafine-grained state, martensitic transformations and inelastic properties of titanium nickelide after "abc" -pressing / Voprosy materialovedeniya. 2008. № 1 (53). 161 – 165. [in Russian]

13. *Stolyarov V.V.* Features of deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy / Reviews on Advanced Materials Science. 2010. Vol. 25. P. 194 – 202.

14. *Li L., Virta J.* Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure / Materials Science and Technology. 2011. Vol. 27. No. 5. P. 845 – 862.

15. *Maier G.G., Astafurova E.G., Maier H.J., etc.* Annealing behavior of ultrafine grained structure in low-carbon steel produced by equal channel angular pressing / Materials Science and Engineering A – Structural Materials Properties Microstructure and Processing. 2013. Vol. 581. No. 1. P. 104 – 107.

16. *Donic T., Martikán M., Hadzima B.* New unique ECAP system with ultrasound and back-pressure / 2014 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 63. 012047 (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012047>).

17. Park K-T., Park L., Kim H.J., Kim S.B., Lee C.S. Analysis on dynamic tensile extrusion behavior of UFG OFHC Cu / 2014 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 63. 012144 (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012144>).
18. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Progress in Materials Science. 2006. Vol. 51. Issue 7. P. 881 – 982.
19. Helmig R.J., Janacek M., Hadzima B., Gendelman O.V., Shapiro M., Molodova X., Springer A., Estrin Y. A Portrait of copper processed by equal channel angular pressing / Materials Transactions. 2008. Vol. 49. No. 1. P. 31 – 37.
20. Zehetbauer M.J., Stüwe H.P., Vorhauer A., Schafner E., Kohout J. The Role of Hydrostatic Pressure in Severe Plastic Deformation. In: *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: Proc. Of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation. Fundamentals – Processing – Application.* (Vienna, Austria, 9–13 December 2002). Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 2004. P. 435 – 446.
21. Ivanov A.M., Ugurchiev U.H., Stolyarov V.V., Petrova N.D., Platonov A.A. Intense plastic deformation of structural steel / Steel in Translation. 2012. Vol. 42. No. 6. P. 495 – 498.
22. Ivanov A.M., Syromyatnikova A.S., Petrova N.D. Hardening by intensive plastic deformation and destruction of structural steel / Strengthening technologies and coatings. 2012. № 3. P. 39 – 42. [in Russian]
23. Ivanov A.M., Petrova N.D., Lepov V.V. The influence of extrusion and screw pressing on the structure and mechanical properties of low-alloy steel / Nauka i obrazovaniye. 2015. № 4 (80). P. 87 – 90. [in Russian]
24. Ivanov A.M., Kovalenko N.D., Raab G.I. Influence of the combined effect of extrusion and screw pressing on the mechanical properties of low-carbon steel at low temperature / Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2018. Vol. 84. No. 1 (I). С. 66 – 70. [in Russian]
25. Kovalenko N.D., Ivanov A.M. Mechanical properties and mechanism of destruction of extruded low-carbon steel at low temperature / Aktual'nyye problemy v mashinostroyenii. 2016. № 3. P. 424 – 428. [in Russian]
26. Serebryany V.N., Dobatkin S.V. Possibilities to increase the plasticity and deformability of magnesium alloys using the methods of intense plastic deformation. Part 1. Influence of structure (Review) / Materialovedeniye. 2013. No. 12. P. 13 – 26. [in Russian]
27. Serebryany V.N., Dobatkin S.V. Possibilities to increase the plasticity and deformability of magnesium alloys using the methods of intense plastic deformation. Part 2. Effect of texture (Review) / Materialovedeniye. 2015. № 11. P. 9 – 22. [in Russian]
28. Ivanov A.M. Strength and mechanism of destruction of low-alloy steel subjected to combined deformation processing / Materialovedeniye. 2018. № 2. P. 13 – 17. [in Russian]

Поступила в редакцию 15.02.2018