

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-1-I-66-70

УДК (UDC) 620.172.25

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСТРУЗИИ И ВИНТОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ*

© Афанасий Михайлович Иванов¹, Нюргуяна Дмитриевна Коваленко¹,
Георгий Иосифович Рааб²

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru

² Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия.

Статья поступила 26 июля 2016 г.

Рассмотрены вопросы деформационной обработки заготовок из низкоуглеродистой стали комбинированным воздействием экструзией и винтовым прессованием (ЭВП). Представлены результаты низкотемпературных испытаний растяжением образцов из стали в различных состояниях. Показано, что характеристики прочности и пластичности стали, подвергнутой ЭВП, при низких температурах испытания (213 К) имеют более высокие значения, чем при комнатной температуре. Проведено фратографическое исследование механизмов разрушения данной стали в состояниях поставки и после обработки ЭВП при комнатной температуре и температуре испытания 213 К. Во всех рассмотренных случаях механизм разрушения имел вязкий характер с присутствием микроямок и ямок во всех зонах поверхности разрушения.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь; экструзия; винтовое прессование; прочность; пластичность; механизм разрушения; низкая температура; излом; фратография; ямки; трещины.

THE EFFECT OF THE COMBINED IMPACT OF EXTRUSION AND SCREW PRESSING ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE MECHANISM OF LOW CARBON STEELS AT LOW TEMPERATURES

© Afanasiy M. Ivanov¹, Nurguyana D. Kovalenko¹, Georgy I. Raab²

¹ V. P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; e-mail: nakalykay@mail.ru

² Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; e-mail: giraab@mail.ru

Submitted July 26, 2016.

The issues of deformation processing of low-carbon steel billets using combined impact of extrusion and screw pressing (ESP) are considered. The results of low-temperature tensile tests of steel samples are presented. It is shown that the characteristics of strength and plasticity (ductility) of steel subjected to ESP at lower test temperatures (213 K) are higher than that at room temperature. A fractographic study of the destruction mechanisms of the steel in as-received condition and after ESP processing at room temperature and at a test temperature of 213 K revealed a ductile (viscous) character of the destruction mechanism with micro pits and pits present in all areas of the fracture surface.

Keywords: low carbon steel; extrusion; screw pressing; strength; ductility; destruction mechanism; low temperature; kink; fractography; pits; cracks.

Как известно, низкие температуры могут оказывать существенное влияние на механические и другие свойства, а также на механизм разрушения металлов и сплавов. Кроме того, изменение

структуры материала посредством различного рода воздействий, например деформационного, влечет за собой изменение свойств, в том числе при низкой температуре.

Актуальность вопроса связана с тем, что к материалам современной техники, эксплуатируемой при низких температурах, предъявляются

* Работа выполнена в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 Сибирского отделения Российской академии наук.

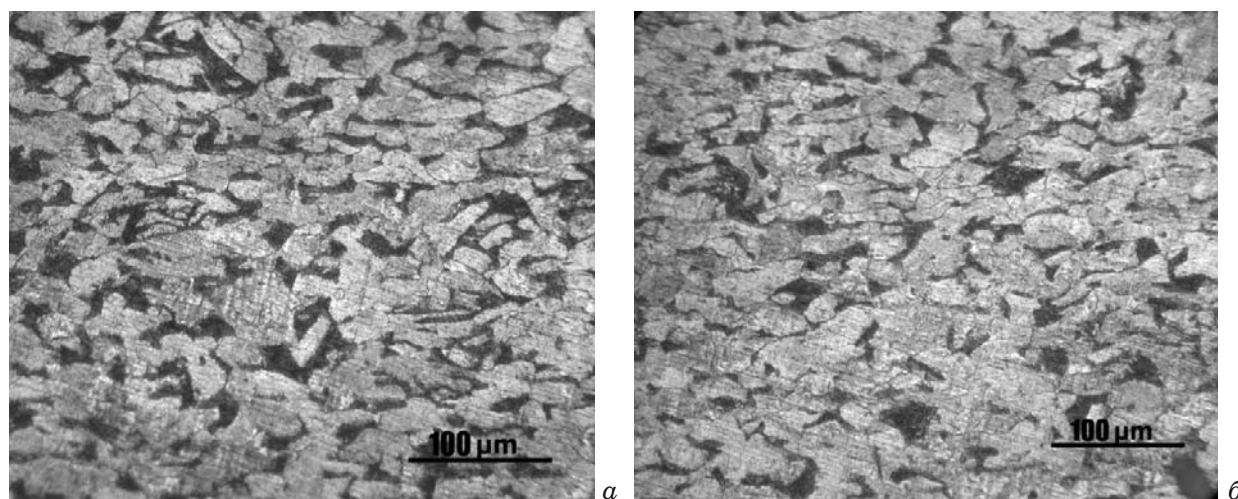


Рис. 1. Микроструктура стали Ст3сп после ЭВП (673 К, один проход): а — на продольной оси; б — на краю винтового профиля

требования: обеспечение достаточной прочности при пластичности и вязкости, исключающих хрупкое разрушение [1].

Перспективные методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [2 – 8 и др.] обеспечивают высокие прочностные характеристики металлических материалов, но при этом падают их пластичность и хладостойкость. Определенные перспективы имеет комбинирование методов ИПД, а также методов ИПД с другими методами обработки, отличающимися по физической сущности, в частности с термообработкой. Комбинирование методов ИПД и термической обработки в определенной степени решает задачу оптимального сочетания высоких характеристик прочности и пластичности сталей [5, 9 и др.]. При последовательном использовании холодного равноканального углового прессования (РКУП) и отжига получена [5] субмикроструктурная (СМК) структура в низкоуглеродистой стали 10Г2ФТ из горячекатаного и закаленного состояний. Показано [9], что сочетание методов РКУП и отжига способствует увеличению прочности и хладостойкости конструкционных сталей. Повышение пределов текучести и прочности со снижением пластичности достигнуто в результате экструзии и винтового прессования объемной заготовки из стали 09Г2С [10].

Цель данной работы — исследование влияния комбинированного воздействия экструзии и винтового прессования на механические свойства и механизм разрушения конструкционной низкоуглеродистой стали Ст3сп в условиях низких температур испытания.

Исследовали низкоуглеродистую конструкционную сталь Ст3сп следующего состава, %: 0,18 С; 0,23 Si; 0,60 Mn; 0,01 Cr; $\leq 0,003$ Ni; 0,01 P; 0,01 S; 0,05 Cu; 0,05 Al, остальное Fe. Химиче-

ский анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре Foundry-Master фирмы Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG).

Комбинированному воздействию ЭВП подвергали заготовки $\varnothing 12 \times 40$ мм из стали Ст3сп, используя гидравлический пресс ПСУ-125 с максимальным усилием 1250 кН [9]. Предварительно прогретую в муфельной печи до температуры 673 К заготовку помещали в технологическую оснастку, нагретую до 673 К с помощью накидной печи. После выполнения ЭВП в один проход получали профили из стали Ст3сп. Из средней части профилей изготавливали образцы с размерами рабочего участка $\varnothing 3 \times 15$ мм для испытаний одноосным растяжением.

Структуру стали Ст3сп анализировали с помощью оптической микроскопии «Neophot-32». Микроструктуру стали исследовали на продольном сечении заготовки, при этом выбирали участки на продольной оси и на краю винтового профиля. Образцы испытывали при комнатной температуре и температуре 213 К на испытательной машине UTS-20k при постоянной скорости нагружения, равной $\approx 3,33 \cdot 10^{-5}$ м/с. Изломы образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе HITACHI TM3030 в режиме вторичных электронов.

Сталь Ст3сп — ферритно-перлитная, средний размер зерна d в исходном состоянии — 11,52 мкм. Ее микроструктура после ЭВП в один проход при 673 К представлена на рис. 1. После ЭВП на продольной оси заготовки размер $d = 9,9$ мкм, а на краю винтового профиля — 7,3 мкм. Различие в размерах зерен объясняется тем, что при ЭВП на удаленном от оси заготовки участке степень деформации больше.

В исходном состоянии стали Ст3сп при комнатной температуре испытаний предел теку-

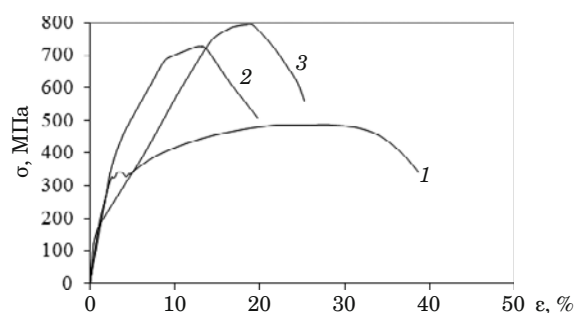


Рис. 2. Диаграммы деформирования низкоуглеродистой стали СтЗсп: 1 — состояние поставки, температура испытания $T_{\text{исп}} = 293 \text{ K}$; 2 — после ЭВП в один проход при 673 K, $T_{\text{исп}} = 293 \text{ K}$; 3 — после ЭВП в один проход при 673 K, $T_{\text{исп}} = 213 \text{ K}$

части $\sigma_t = 333 \text{ МПа}$ и предел прочности $\sigma_b = 485 \text{ МПа}$. После воздействия ЭВП эти же характеристики составили 660 и 731 МПа соответственно. Предел текучести повысился почти в два раза, а предел прочности — в полтора. Повышение прочности СтЗсп связано с измельчением структуры материала. С понижением температуры испытания до 213 K наблюдался некоторый рост прочностных характеристик стали СтЗсп, упрочненной ЭВП.

Анализ условных кривых деформирования образцов из стали СтЗсп в различных состояниях и при разных температурах испытания (рис. 2) показал следующее.

Такие характеристики, как предел прочности при растяжении, разрушающее напряжение, равномерное удлинение, предел текучести и полное

удлинение стали, обработанной ЭВП, при температуре испытания 213 K (кривая 3) выше, чем при комнатной температуре (кривая 2).

Фрактографические исследования изломов образцов из стали СтЗсп в состоянии поставки и после обработки ЭВП, разрушенных при температурах 293 и 213 K, показали следующее. Для образцов из стали СтЗсп в исходном состоянии [11] изломы волокнистой и периферийной частей поверхности сформированы по механизму вязкого разрушения, который определяется образованием ямок путем слияния микропор.

Проведено сравнение изломов образцов из СтЗсп, упрочненных ЭВП и разрушенных при температурах 293 и 213 K.

Разрушение образца из СтЗсп (ЭВП в один проход при 673 K) при температуре испытания 293 K. Вязкое разрушение образца произошло при значительной утяжке с образованием губ среза (рис. 3, а). Излом образца «чашечный», неровный, матовый.

Центральная волокнистая зона (образования и развития трещины) составляет примерно 55 % от общей площади поверхности разрушения. Волокнистая зона характеризуется наличием характерных ямок с гребнями, образованных путем слияния микропор (рис. 3, б, в). Видны следы пластической деформации в виде тонких волнистых линий, которые предшествовали росту ямок. Размеры ямок — 0,2 – 12 мкм, при этом преобладают микроямки. В ямках включения не выявлены. Видны вереницы микроямок,

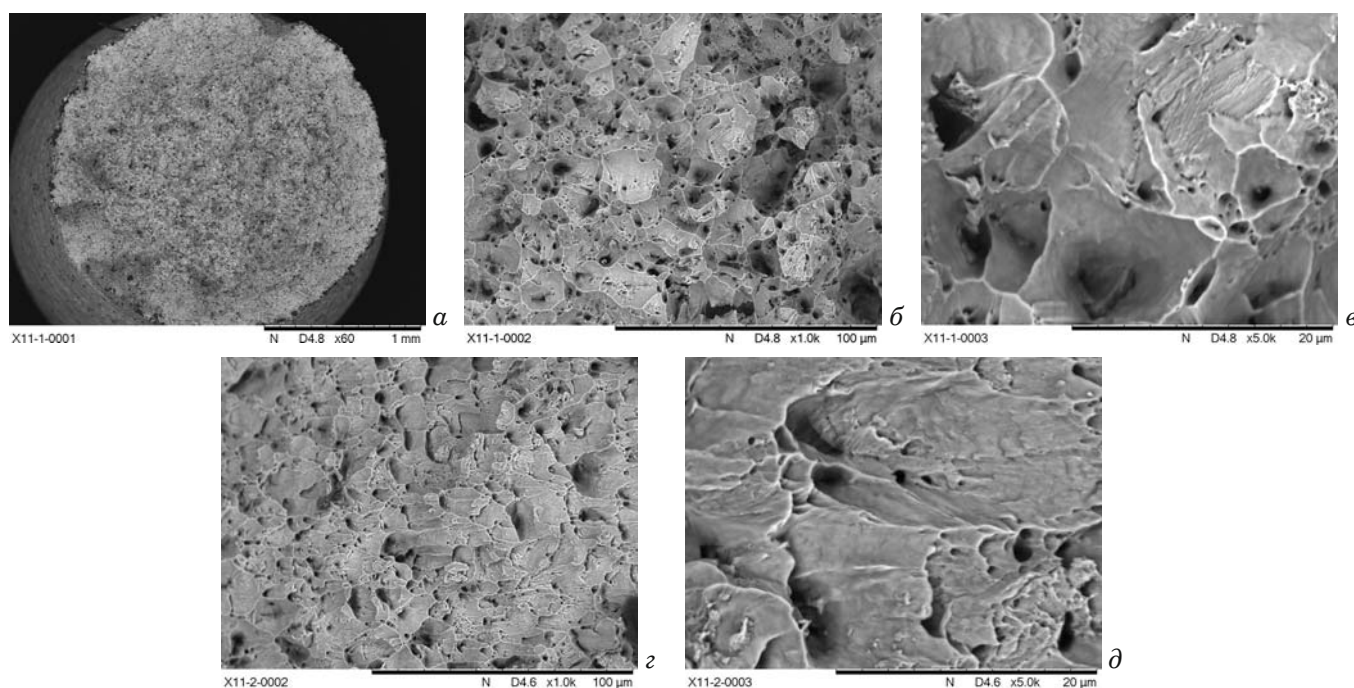


Рис. 3. Макро- и микрорельеф излома образца из стали СтЗсп, подвергнутого ЭВП в один проход при 673 K и разрушенного при 293 K: а — общий вид; б, в — волокнистая зона 1; г, д — зона среза 2

следы скольжения материала при росте ямок и микротрещины, образованные слиянием ямок (рис. 3, б).

Излом в зоне среза, образовавшейся от действия касательных напряжений, характеризуется вытянутыми ямками сдвига (рис. 3, г, д).

Таким образом, излом шейки при разрушении образца стали СтЗсп при 293 К в случае ЭВП в один проход при 673 К также сформирован по механизму вязкого разрушения, как и излом исходного материала.

Разрушение образца из СтЗсп (ЭВП в один проход при 673 К) при температуре испытания 213 К. Излом образца из СтЗсп, упрочненного воздействием ЭВП в один проход при температуре 673 К и разрушенного при 213 К, отличается от излома аналогичного образца, полученного при комнатной температуре. Такой излом, можно условно разделить на три основные зоны: центральную, промежуточную и периферийную (рис. 4, а).

Площадь центральной волокнистой зоны значительно уменьшилась по сравнению с аналогичной зоной образца, испытанного при комнатной температуре. Однако качественно эти области близки. Волокнистая зона также характеризуется образованием ямок путем слияния микропор (рис. 4, б, в). Размеры микроямок и ямок лежат в пределах $\sim 0,2 - 16$ мкм. Здесь также видны вереницы микроямок и микротрещины, образованные слиянием ямок (рис. 4, б).

Несмотря на вязкий характер разрушения промежуточная зона с ямочным рельефом испещрена вторичными трещинами длиной до ~ 130 мкм, преимущественная ориентация которых радиальная. По мере приближения к периферийной зоне длина этих трещин увеличивается. Радиальные трещины направлены от центральной волокнистой зоны к боковым скосам. Видны типичные для однократного растяжения ямки различных размеров и рассредоточенные глубокие вторичные трещины (рис. 4, г).

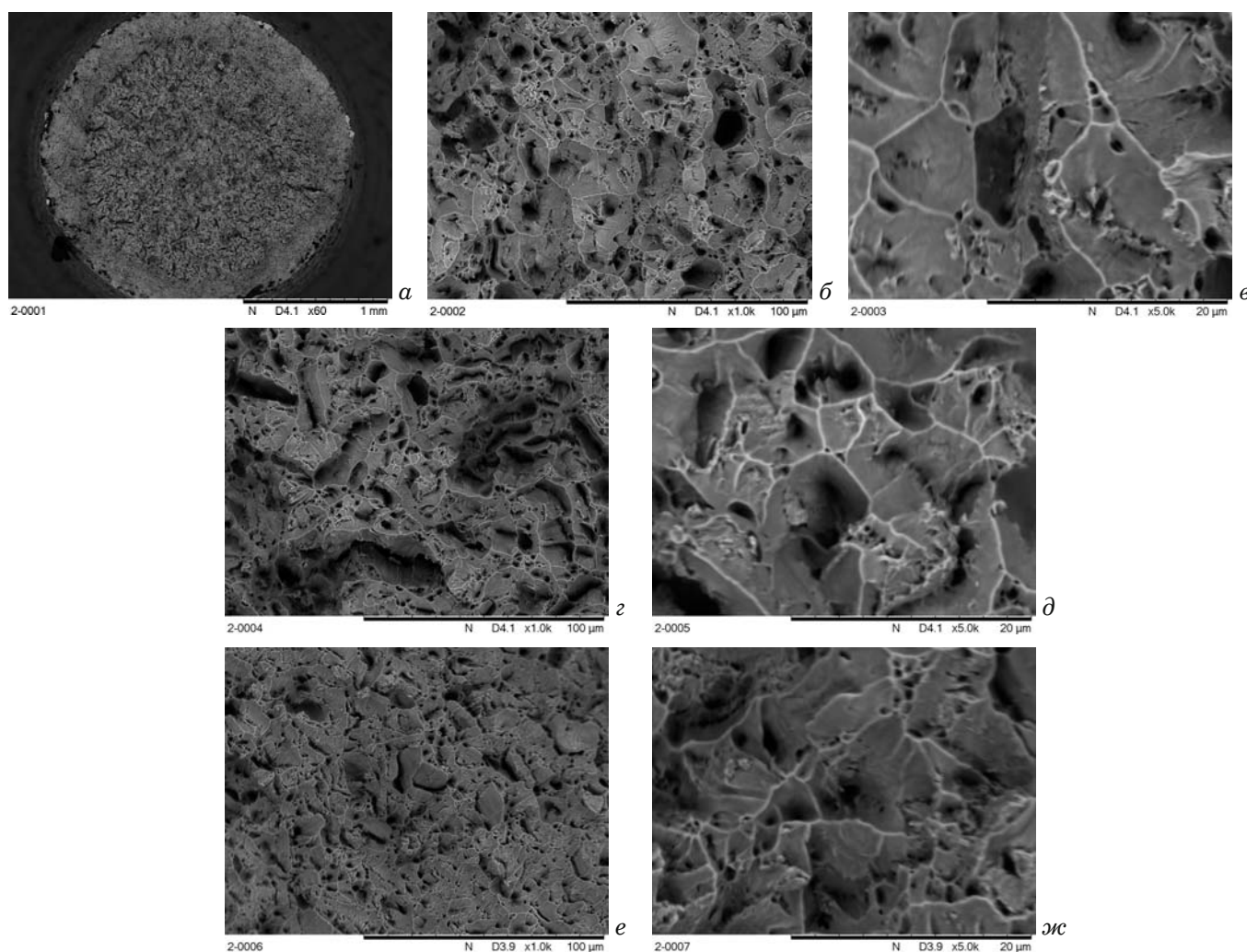


Рис. 4. Макро- и микрорельеф излома образца из стали СтЗсп, подвергнутого ЭВП в один проход при 673 К и разрушенного при 213 К: а — общий вид; б, в — волокнистая зона 1; г, д — промежуточная зона 2; е, жс — зона среза 3

В периферийной зоне ямки среза вытянуты меньше, чем в подобной зоне излома, полученного при комнатной температуре. В этой зоне присутствуют также микротрещины длиной до ~15 мкм.

Следует отметить, что микроямки присутствуют во всех зонах при всех рассмотренных состояниях материала. В случае разрушения обработанных ЭВП образцов при низкой температуре в изломе обнаружены радиальные трещины.

Таким образом, обработка низкоуглеродистой стали СтЗсп комбинированным воздействием экструзией и винтовым прессованием позволила повысить прочность материала в 1,5 – 2 раза. Характеристики прочности и пластичности стали СтЗсп, подвергнутой ЭВП, при низкой температуре испытаний (213 К) имеют более высокие значения, чем при комнатной температуре.

Фрактографические исследования изломов показали, что механизм разрушения образцов при комнатной и низкой температурах во всех рассмотренных состояниях (состояние поставки, после ЭВП) стали СтЗсп носит вязкий характер с присутствием микроямок и ямок во всех зонах поверхности разрушения.

Установлено влияние температуры испытания на характер разрушения образцов из стали СтЗсп, подвергнутых деформационной обработке посредством ЭВП. Изломы таких образцов при низкотемпературных (213 К) испытаниях несмотря на вязкий характер разрушения содержат многочисленные вторичные радиальные трещины в промежутке между центральной волокнистой зоной и зоной среза на поверхности разрушения. На изломах образцов видны ямки различных размеров, типичные для однократного растяжения, и рассредоточенные глубокие вторичные трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев Ю. П. Хладостойкие стали и сплавы: Учебник для вузов. — СПб.: Химиздат, 2005. — 480 с.
2. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И., Павлик Д. А., Мальшев В. Ф. Процессы пластического структурообразования металлов. — Минск: Навука і тэхніка. 1994. — 231 с.
3. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. — М.: Логос, 2000. — 272 с.
4. 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.
5. Сэстри Ш. М. Л., Добаткин С. В., Сидорова С. В. Формирование субмикроструктурной структуры в стали 10Г2ФТ при холодном равноканальном угловом прессовании и последующем нагреве / Металлы. 2004. № 2. С. 28 – 35.

6. Лотков А. И., Гришков 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.
7. Li L., Virta J. Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure / Materials Science and Technology. 2011. Vol. 27. N 5. P. 845 – 862.
8. Maier G. G., Astafurova E. G., Maier H. J., et al. 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. N 1. P. 104 – 107.
9. 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.
10. Иванов А. М., Петрова Н. Д., Лепов В. В. Влияние экструзии и винтового прессования на структуру и механические свойства низколегированной стали / Наука и образование. 2015. № 4(80). С. 87 – 90.
11. 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.

REFERENCES

1. Solntsev Yu. P. Cold-resistant steels and alloys: Textbook for universities. — St. Petersburg: Khimizdat, 2005. — 480 p. [in Russian].
2. Segal V. M., Reznikov V. I., Kopylov V. I., Pavlik D. A., Malyshev V. F. Processes of plastic structuring of metals. — Minsk: Navuka i tekhnika. 1994. — 231 p. [in Russian].
3. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation. — Moscow: Logos, 2000. — 272 p. [in Russian].
4. 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.
5. Séstri Sh. M. L., Dobatkin S. V., Sidorova S. V. Formation submicrocrystalline structure in steel 10G2FT at cold equal-channel angular pressing and subsequent heating / Metally. 2004. N 2. P. 28 – 35 [in Russian].
6. Lotkov A. I., Grishkov V. N., Dudarev E. F., Girsova N. V., Tabachenko A. N. Formation of ultrafine state, martensitic transformations and inelastic properties of NiTi after the «abc»-pressing / Vopr. Materialoved. 2008. N 1(53). P. 161 – 165 [in Russian].
7. Li L., Virta J. Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure / Materials Science and Technology. 2011. Vol. 27. N 5. P. 845 – 862.
8. Maier G. G., Astafurova E. G., Maier H. J., et al. 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. N 1. P. 104 – 107.
9. Ivanov A. M., Syromyatnikova A. S., Petrova N. D. Hardening of severe plastic deformation and fracture of structural steel reinforcing / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2012. N 3. P. 39 – 42 [in Russian].
10. Ivanov A. M., Petrova N. D., Lepov V. V. Influence of screw extrusion and pressing on the structure and mechanical properties of low-alloy steel / Nauka Obrazov. 2015. N 4(80). P. 87 – 90.
11. Kovalenko N. D., Ivanov A. M. Mechanical properties and fracture mechanism of extruded low-carbon steel at low temperatures / Aktual'n. Probl. Mashinost. 2016. N 3. P. 424 – 428 [in Russian].