

УДК 621.793(07)

## КОНСТРУКТИВНАЯ ПРОЧНОСТЬ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ СТАЛИ 10\*

**Р.З. Валиев<sup>1,2</sup>**, д.ф.-м.н., профессор, директор института физики перспективных материалов

**Г.В. Клевцов<sup>3</sup>**, д.т.н., профессор кафедры нанотехнологий, материаловедения и механики

**Н.А. Клевцова<sup>4</sup>**, д.т.н., доцент кафедры радиофизики и электроники

**В.М. Кушнаренко<sup>4</sup>**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой деталей машин и промышленной механики

**А.В. Ганеев<sup>1</sup>**, инженер института физики перспективных материалов

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет (Уфа, Россия)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

<sup>3</sup> Тольяттинский государственный университет (Тольятти, Россия)

<sup>4</sup> Оренбургский государственный университет (Оренбург, Россия)

**Аннотация.** Представлены результаты исследований ультрамелкозернистой (УМЗ) стали 10, полученной методом равноканального углового прессования (РКУП) при 200 °С. На полученных образцах проведен комплексный анализ конструкционной прочности, включая статические испытания на растяжение и анализ ударной вязкости и трещиностойкости. Прочность стали 10 возрастает после РКУП в 2,5 раза. При заданном режиме РКУП практически не изменяется порог хладноломкости стали 10, однако сужается интервал вязко-хрупкого перехода. Расчет трещиностойкости показал, что  $K_{IC}$  стали 10 с УМЗ структурой не только не уменьшается по сравнению с этим показателем стали в исходном состоянии, но и даже несколько возрастает. Анализ коррозионной стойкости стали свидетельствует, что скорость коррозии образцов без покрытия из стали 10 после РКУП несколько выше по сравнению с исходным состоянием. Однако скорость коррозии стали после РКУП с покрытием примерно в два раза ниже по сравнению со сталью в исходном состоянии с покрытием. В работе обсуждена природа наблюдаемых закономерностей.

**Ключевые слова:** малоуглеродистая сталь 10, равноканальное угловое прессование, механические свойства, ультрамелкозернистая структура, коррозионная стойкость.

E-MAIL: RZValiev@mail.rb.ru

В своих исследованиях профессор Э.В. Козлов значительное внимание уделяет металлам и сплавам с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Целый ряд оригинальных работ посвящен необычным механическим свойствам УМЗ материалов, механизмам их прочности и пластичности [1 – 3].

Как известно, для получения наноструктурных металлов с размерами зерен в субмикронном диапазоне наиболее широко используются методы интенсивной пластической деформации [1 – 4]. Такие УМЗ материалы обладают высокими прочностными характеристиками, что весьма привлекательно для их внедрения в различные области техники [4 – 6]. Однако, несмотря на значительное количество публикаций, посвященных исследованию УМЗ материалов, практически отсутствуют сведения об их служебных свойствах (ударной вязкости, трещиностойкости, коррозионной стойкости [7, 8]), хотя для конструктивных применений УМЗ материалов именно эти свойства будут становиться все более значимыми.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Постановление 220, грант Правительства РФ; договор 14.B25.31.0017) и РФФИ (проект 14-08-00301).

Авторы благодарят сотрудников НИИФПМ – А.Г. Рааба за помощь в изготовлении образцов и М.В. Караваеву за плодотворное обсуждение результатов.

В настоящей работе впервые проведено комплексное исследование конструктивной прочности и коррозионной стойкости стали 10 в исходном состоянии и с УМЗ структурой, полученной методом равноканального углового прессования (РКУП).

В качестве исследуемого материала была использована малоуглеродистая сталь 10, содержащая 0,11 % С, в исходном состоянии (горячекатаное состояние) со средним размером зерен около 20 мкм, а также в УМЗ состоянии, полученном путем равноканального углового прессования при 200 °С (4 и 6 проходов, маршрут Вс, угол  $\phi = 120^\circ$  [4]). Перед РКУП заготовки в виде прутков были закалены от 880 °С в воде.

Исследования микроструктуры стали 10 проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOLJEM2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Твердость стали определяли на твердомере ТН 300. Прочностные характеристики стали при растяжении исследовали на разрывной машине Р-10 по ГОСТ 1797 – 84. Диаметр образцов для механических испытаний составлял 3 мм. Ударные испытания образцов с V-образным концентратором напряжений проводили на копре JB-W300 в широком интервале температур. Охлаждение и нагрев образцов проводили согласно ГОСТ 9454 – 78 в жидком азоте и в климатической ка-

мере INSTRON C3106366, обеспечивающей интервал температур от  $-100$  до  $+350$  °С. Оценку трещиностойкости стали проводили по глубине пластической зоны под поверхностью изломов [9, 10]. Микроструктуру ударных изломов исследовали с помощью конфокального сканирующего микроскопа LextOLS4000, а также в растровых электронных микроскопах JSM-6390 и SIGMA фирмы «ZEISS». Определение глубины пластических зон под поверхностью изломов проводили рентгеновским методом [9, 11] путем съемки изломов на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4-07.

Для коррозионных испытаний использовали образцы из стали 10 размером  $10 \times 10 \times 3$  мм с упрочняющим покрытием и без покрытия. Тонкопленочное упрочняющее алмазоподобное покрытие на основе оксикарбонитрида кремния наносили на поверхность образцов с помощью установки финишного плазменного упрочнения УФПУ-111. Толщина покрытия составляла 1 мкм. Далее образцы полностью погружали в испытательный раствор (5 %-ый раствор NaCl + 0,5 %-ый раствор  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , насыщенный сероводородом,  $\text{pH} \leq 3,5$ ;  $T = 297$  К). Время коррозионного воздействия 96 ч. Скорость коррозии определяли по разности масс образцов до и после коррозионных испытаний. Металлографические исследования поверхности образцов до и после коррозии проводили с помощью металлографического микроскопа МИМ-8.

**Структура и прочность стали 10 при растяжении.** Структура стали 10 в исходном состоянии представлена на рис. 1, а. Размер ферритных зерен составляет 10 – 15 мкм. В структуре стали после РКУП при 200 °С, 4 прохода (рис. 1, б) наблюдается сильное измельчение зерен до 250 нм, но имеется выраженная их полосчатость с развитой дислокационной структурой. Увеличение числа проходов с 4 до 6 не привело к заметным структурным изменениям. Измельчение микроструктуры приводит к повышению твердости и прочностных характеристик стали в среднем в 2,0 – 2,5 раза и к снижению относительного удлинения в 1,3 – 3,0 раза (см. таблицу).

**Ударная вязкость стали 10 в интервале вязко-хрупкого перехода.** Известно, что материалы с ОЦК

#### Механические свойства стали 10 в исходном состоянии и после РКУП

Состояние стали	НВ	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\delta$ , %
Исходное состояние	121	460	350	25
После РКУП, 4 прохода	235	1028	989	8
После РКУП, 6 проходов	235	1050	955	11

решеткой подвержены хладноломкости. На температурной зависимости ударной вязкости ( $KCV$ ) стали 10 (рис. 2) в исходном состоянии хорошо виден ярко выраженный интервал вязко-хрупкого перехода (примерно от  $-5$  до 100 °С), а после РКУП при 200 °С, 4 прохода – узкий интервал вблизи температуры 50 °С. При этом порог хладноломкости стали практически не изменился. Таким образом, при РКУП по заданному режиму практически не изменяется порог хладноломкости стали 10, однако сужается интервал вязко-хрупкого перехода.

Полученная УМЗ структура стали 10 после РКУП (рис. 1, б) оказала влияние и на механизм ударного разрушения [9]. Так, поверхность низкотемпературных изломов, полученных в нижней области вязко-хрупкого перехода, расположена под углом примерно 45° к оси образца (рис. 3, а). Микрорельеф поверхности таких изломов состоит из ступеней, образовавшихся путем квазискола (рис. 3, з).

Поверхность изломов, полученных в средней области вязко-хрупкого перехода, состоит из глубоких, параллельно расположенных гребней (рис. 3, б), а микрорельеф состоит из чередующихся ступенек с вязкими торцами (рис. 3, д); эти ступеньки образовались, по-видимому, путем расслоения металла и вязкого отрыва. Изломы, полученные в верхней области вязко-хрупкого перехода, вязкие (рис. 3, е) с ямочным микрорельефом (рис. 3, е).

**Трещиностойкость стали 10.** Как уже отмечалось, оценку трещиностойкости углеродистой стали 10 после РКУП при 200 °С, 4 прохода, проводили по глубине пластической зоны под поверхностью изломов, определенной рентгеновским методом.

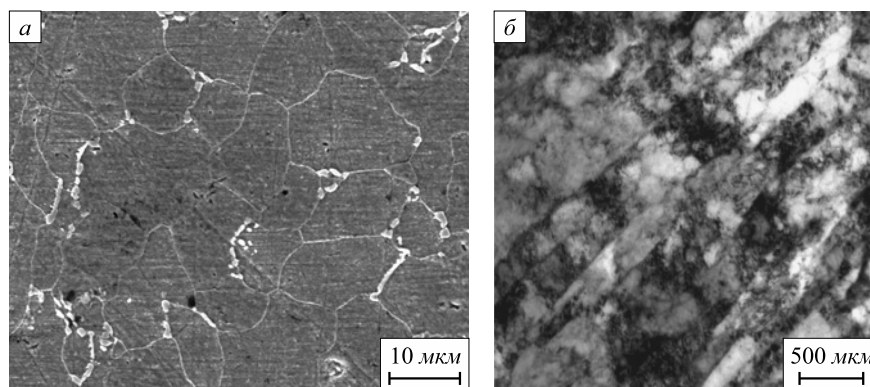


Рис. 1. Микроструктура стали 10 в исходном состоянии, РЭМ (а) и после РКУП при 200 °С, 4 прохода, ПЭМ (б)

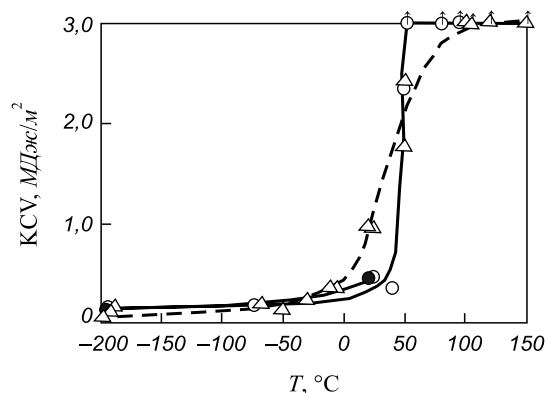


Рис. 2. Температурная зависимость ударной вязкости KCV стали 10 в исходном состоянии ( $\Delta$ ), а также после РКУП, 4 прохода ( $\circ$ ) и после РКУП, 6 проходов ( $\bullet$ )

Глубина пластической зоны ( $h_y$ ) под поверхностью изломов стали 10 после РКУП при 200 °С, 4 прохода, и отношение  $h_{\max}/t$  (где  $h_y$  – глубина пластической зоны;  $t$  – толщина образца) приведены ниже:

$T, ^\circ\text{C}$	-196	-70	20
$h_y, \text{мкм}$	30	30	50
$h_{\max}/t$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$

Результаты фрактографического анализа стали 10 (рис. 3), а также тот факт, что под поверхностью изломов обнаружена только одна пластическая зона, а  $h_{\max}/t < 10^{-2}$ , свидетельствуют о том, что ударное разрушение образцов из стали 10 после РКУП при температурах -196, -70 и 20 °С произошло в условиях плоской деформации

(ПД) [9, 10]. Используя рекомендации ВНИИНМАШ Госстандарта России [10], был проведен расчет трещиностойкости стали 10 в условиях ПД ( $K_{IC}$ ) в исходном состоянии и после РКУП при 200 °С, 4 прохода.

Трещиностойкость стали 10 в исходном состоянии и после РКУП при 200 °С, 4 прохода, составляет 28,0 и 31,0 МПа·м<sup>1/2</sup> соответственно. Расчет показал, что значение  $K_{IC}$  стали 10 в субмикроструктурном состоянии не только не уменьшается по сравнению с  $K_{IC}$  в исходном состоянии, но даже несколько возрастает.

**Коррозионная стойкость стали 10.** Скорость коррозии образцов из стали 10 без покрытия и с покрытием в исходном состоянии составляет 0,298 и 0,227 г/(м²·ч), без покрытия и с покрытием после РКУП – 0,334 и 0,115 г/(м²·ч) соответственно. Скорость коррозии образцов без покрытия из стали 10 после РКУП при 200 °С, 4 прохода несколько выше по сравнению с исходным состоянием. Однако скорость коррозии стали после РКУП с покрытием примерно в два раза ниже по сравнению со сталью в исходном состоянии с покрытием. Следовательно, покрытие, нанесенное на поверхность образцов из стали 10 после РКУП, обладает большей адгезионной прочностью, так как обеспечивает лучшую защиту стали от коррозии по сравнению с покрытием, нанесенным на поверхность образцов из стали 10 в исходном состоянии.

Можно предположить, что некоторое снижение коррозионной стойкости стали 10 в УМЗ состоянии в значительной степени обусловлено повышенной пористостью структуры стали после РКУП. Повышение адгезионной прочности алмазоподобного покры-

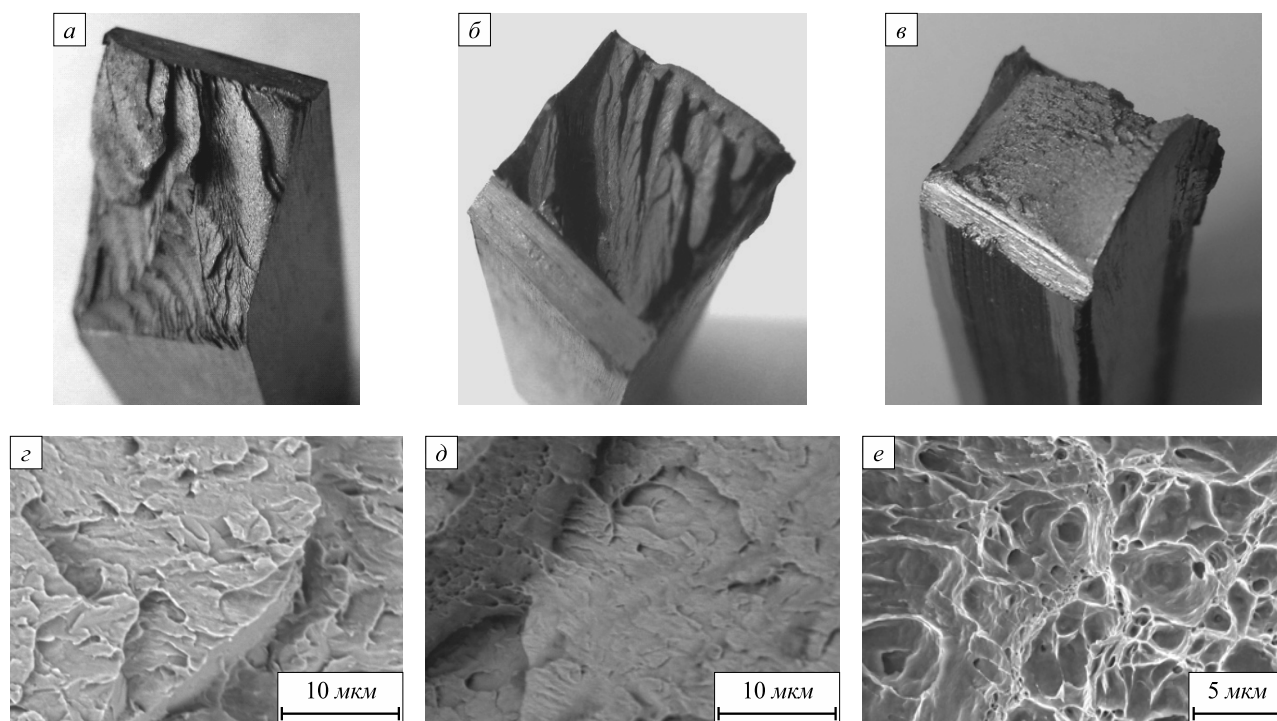


Рис. 3. Общий вид (а – в) и микрорельеф центральной части изломов (з – е) стали 10 после РКУП при 200 °С, 4 прохода, при температуре испытания -196 °С (а, з), 20 °С (б, д), 50 °С (в, е)



тия на поверхности наноструктурированной стали 10, по-видимому, связано с наличием большого количества дефектов кристаллического строения и относительно высокой площади границ зерен в структуре такой стали.

Вопросам повышения прочности наноструктурированных металлических материалов посвящено большое количество специальных монографий и работ (например [1 – 7, 13] и другие). Формирование УМЗ структуры в различных металлах и сплавах обычно приводит к значительному увеличению прочности. Более того, на ряде наноструктурных сплавов обнаружен эффект сверхпрочности, когда величина предела текучести значительно превышает значение предела прочности, определяемого для данного размера зерен из соотношения Холла-Пэтча [15, 16]. Вместе с тем УМЗ материалы типично демонстрируют пониженную пластичность при испытаниях на растяжение, что оказывает влияние на их ударную вязкость и трещиностойкость. Не совсем ясен сам механизм сужения интервала вязко-хрупкого перехода наноструктурированной стали. Можно предположить, что сужение интервала вязко-хрупкого перехода стали 10 после РКУП связано как с формированием УМЗ структуры, так и с высоким уровнем дефектности структуры. При понижении температуры испытания образцов из стали 10 со структурой, образовавшейся после РКУП, имеет место блокировка или, по крайней мере, значительное снижение вклада механизмов пластической деформации, зависящих от температуры в УМЗ зернах, например, переползание дислокаций. Это приводит к охрупчиванию стали, резкому снижению ударной вязкости, а, следовательно, к сужению интервала вязко-хрупкого перехода.

Как показано выше, РКУП при 200 °С приводит в стали 10 к вышеуказанным зависимостям повышения прочности, снижения пластичности и сужения интервала вязко-хрупкого перехода. Однако, как свидетельствуют исследования последнего десятилетия [4, 13], существуют различные подходы повышения пластичности УМЗ материалов при сохранении их высокопрочного состояния. Наиболее эффективным из них является зернограничный дизайн, то есть управление структурой границ зерен за счет варьирования режимов ИПД обработки [4, 13]. Для стали 10 планируется использовать этот подход в предстоящих исследованиях.

**Выводы.** Показано, что формирование УМЗ структуры методом РКУП при 200 °С значительно повышает твердость и прочностные характеристики стали 10, но снижает пластические свойства. При этом трещиностойкость стали 10 с УМЗ структурой в условиях плоской деформации изменяется незначительно. При РКУП при 200 °С сужается интервал вязко-хрупкого перехода стали 10, при этом порог хладноломкости стали практически не изменяется. Коррозионная стойкость

стали 10 после РКУП при 200 °С, 4 прохода несколько ниже по сравнению с исходным состоянием. Однако скорость коррозии стали после РКУП с покрытием примерно в два раза ниже по сравнению со сталью в исходном состоянии с покрытием. Дальнейшее повышение служебных свойств УМЗ стали 10 может быть реализовано за счет увеличения ее пластичности при сохранении высокой прочности, что представляется возможным за счет изменения структуры границ зерен в стали, варьируя условия ИПД обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valiev R.Z., Kozlov E.V., Ivanov Yu.F., Lian J., Nazarov A.A., Baudelet B. // *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994. Vol. 42. Issue 7. P. 2467 – 2475.
2. Козлов Э.В., Конева Н.А., Жданов А.Н. и др. // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № 4. С. 93 – 113.
3. Козлов Э.В., Конева Н.А., Жданов А.Н. // *Физическая мезомеханика*. 2007. Т. 10. № 3. С. 95 – 103.
4. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
5. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. – М.: Физматлит, 2000. – 224 с.
6. Валиев Р.З., Семенова И.П., Латыш В.В. и др. // *Российские нанотехнологии*. 2008. Т. 3. № 9 – 10. С. 80 – 89.
7. Андриевский Р.А., Глезер А.М. // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179. № 4. С. 337 – 358.
8. Sabirov I., Valiev R.Z., Semenova I.P., Pippan R. // *Metallurgical and materials transactions*. 2010. V. 41A. March. P. 727 – 733.
9. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. – М.: изд. МИСиС, 2007. – 264 с.
10. Р 50-54-52/2-94. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение характеристик разрушения металлических материалов рентгеновским методом / Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, Л.П. Гранкова и др. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта России, 1994. – 28 с.
11. Р 50-54-52-88. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения / Г.В. Клевцов, Н.К. Шаурова, Л.Р. Ботвина и др. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1988. – 24 с.
12. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Рааб Г.И. и др. // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 8. С. 9 – 13.
13. Sabirov I., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development // *Materials Science & Engineering*. 2013. Vol. A 560. P. 1 – 24.
14. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ. изд. / И.Я. Сокол, Е.А. Ульянов, Э.Г. Фельдгандлер и др. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
15. Караваева М.В., Киселева С.К., Абрамова М.М. и др. // *Наноинженерия*. 2013. № 10 (28). С. 30 – 35.
16. Valiev R.Z., Murashkin M.Y., Ganeev A.V., Enikeev N.A. // *The Physics of Metals and Metallography*. 2012. T. 113. № 13. P. 1193 – 1201.
17. Sauvage X., Ganeev A., Enikeev N., Murashkin M., Valiev R., Ivanisenko Y. // *Advanced Engineering Materials*. 2012. T. 14. № 11. С. 968 – 974.

## STRUCTURAL STRENGTH AND CORROSION RESISTANCE OF NANOSTRUCTURED STEEL 10

**R.Z. Valiev**<sup>1,2</sup>, *Doctor of Phys.-math. Sciences, Professor, Director of the Institute Physics of Advanced Materials*  
**G.V. Klevtsov**<sup>3</sup>, *Dr. Eng., Professor of the Department of Nanotechnology, Materials and Mechanics*  
**N.A. Klevtsova**<sup>4</sup>, *Dr. Eng., Assist. Professor Department of Radiophysics electronics*  
**V.M. Kushnarenko**<sup>4</sup>, *Dr. Eng., Professor Head of the Department of machine parts and Industrial Mechanics*  
**A.V. Ganeev**<sup>1</sup>, *engineer of the Institute Physics of Advanced Materials*

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia)

<sup>2</sup> St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russia)

<sup>3</sup> Toliatti State University (Toliatti, Samara Region, Russia)

<sup>4</sup> Orenburg State University (Orenburg, Orenburg Region, Russia)

E-MAIL: RZValiev@mail.rb.ru

**Abstract.** The paper presents research results obtained for ultrafine-grained (UFG) steel 10 by equal-channel angular pressing (ECAP) at 200 °C. A complex analysis of structural strength, including static tensile testing and analysis of impact strength and crack resistance, was conducted on the produced samples. It is shown that the strength of steel 10 grows 2.5 times after ECAP. ECAP via the set regime practically does not change the threshold of cold brittleness of steel 10, but narrows the range of ductile-brittle transition. The calculation of crack resistance showed that K<sub>th</sub> of steel 10 with the UFG structure does not decrease as compared to the initial state, but even increases slightly. The analysis of corrosion resistance of the steel shows that the corrosion rate of uncoated samples of steel after 10 ECAP somewhat higher compared with the initial state. However, the corrosion rate of the steel after ECAP coated with about 2 times lower compared with the steel in the initial state with the coating. The paper discusses the nature of the observed patterns.

**Keywords:** low carbon steel 10, ECAP, mechanical properties, ultrafine-grained structure, corrosion resistance.

### REFERENCES

- Valiev R.Z., Kozlov E.V., Ivanov Yu.F., Lian J., Nazarov A.A., Baudelet B. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1994. Vol. 42. Issue 7. Pp. 2467 – 2475.
- Kozlov Ye.V., Koneva N.A., Zhdanov A.N. etc. *Fizicheskaya mekhanika*. 2004. Vol. 7. № 4. Pp. 93 – 113.
- Kozlov Ye.V., Koneva N.A., Zhdanov A.N. *Fizicheskaya mekhanika*. 2007. Vol. 10. № 3. Pp. 95 – 103.
- Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Obemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva* (Bulk nanostructured metallic materials: preparation, structure and properties). Moscow: IKC «Akademkniga», 2007. 398 p.
- Gusev A.I., Rempel' A.A. *Nanokristallicheskie materialy* (Nanocrystalline materials). Moscow: Fizmatlit, 2000. 224 p.
- Valiev R.Z., Semenova I.P., Latysh V.V. etc. *Rossiyskie nanotekhnologii*. 2008. Vol. 3. № 9 – 10. Pp. 80 – 89.
- Andrievskiy R.A., Glezer A.M. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 2009. Vol. 179. № 4. Pp. 337 – 358.
- Sabirov I., Valiev R.Z., Semenova I.P., Pippan R. *Metallurgical and materials transactions*. 2010. Vol. 41A. March. Pp. 727 – 733.
- Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar' L.V. *Fraktodiagnostika razrusheniya metallicheskih materialov i konstruktsiy* (Fraktodiagnostika fracture of metallic materials and structures). Moscow: izd. MISiS, 2007. 264 p.
- R 50-54-52/2-94. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Grankova L.P. etc. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metod rentgenostrukturnogo analiza izlomov. Opredelenie harakteristik razrusheniya metallicheskih materialov rentgenovskim metodom* (Calculations and tests of strength. X-ray diffraction method breaks. Characterisation destruction metallic materials by X-ray method). Moscow: VNIINMASH Gosstandarta Rossii, 1994. 28 p.
- R 50-54-52-88. Klevtsov G.V., Shaurova N.K., Botvina L.R. etc. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metod rentgenostrukturnogo analiza izlomov. Opredelenie glubiny zon plasticheskoy deformatsii pod poverhnost'yu razrusheniya* (Calculations and tests of strength. X-ray diffraction method breaks. Determination of the depth of plastic deformation zones beneath the surface destruction). Moscow: VNIINMASH Gosstandarta SSSR, 1988. 24 p.
- Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Raab G.I. etc. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2011. Vol. 8. Pp. 9 – 13.
- Sabirov I., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z. *Materials Science & Engineering*. 2013. Vol. A 560. Pp. 1 – 24.
- Sokol I.Ya., Ul'yanin E.A., Fel'dgandler Ye.G. etc. *Struktura i korroziya metallov i splavov: Atlas* (Structure and corrosion of metals and alloys: Atlas). Sprav. izd. Moscow: Metallurgiya, 1989. 400 p.
- Karavaeva M.V., Kiseleva S.K., Abramova M.M. etc. *Nanoinzheneriya*. 2013. Vol. 10 (28). Pp. 30 – 35.
- Valiev R.Z., Murashkin M.Y., Ganeev A.V., Enikeev N.A. *The Physics of Metals and Metallography*. 2012. Vol. 113. № 13. Pp. 1193 – 1201.
- Sauvage X., Ganeev A., Enikeev N., Murashkin M., Valiev R., Ivanisenko Y. *Advanced Engineering Materials*. 2012. Vol. 14. № 11. Pp. 968 – 974.

Received January 22, 2014