



Оригинальная статья

УДК 620.17:669.15-194.56

DOI 10.17073/0368-0797-2021-11-832-838



ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Г. В. Клевцов¹, Р. З. Валиев², М. В. Фесенюк³, Н. А. Клевцова¹,
М. Н. Тюрков¹, М. М. Абрамова², Г. И. Рааб²

¹Тольяттинский государственный университет (Россия, 445667, Самарская обл., Тольятти, Белорусская ул., 14)

²Уфимский государственный авиационный технический университет (Россия, 450000, Республика Башкортостан, Уфа, ул. К. Маркса, 12)

³АО «ПО «Стрела» (Россия, 460005, Оренбург, ул. Шевченко, 26)

Аннотация. Изучены прочность и механизм разрушения при кручении аустенитной коррозионностойкой стали 08X18H9 с ультрамелкозернистой (УМЗ) и крупнозернистой (КЗ) структурой, широко применяемой в медицине для производства пластин, шурупов, стержней для костного остеосинтеза и других медицинских изделий. Структура КЗ стали исследована с помощью металлографического микроскопа Axiovert 40 MAT, а тонкая структура УМЗ стали – с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100. Проведены испытания на кручение цилиндрических образцов диаметром 10 мм при температуре 20 °С на установке МК-50. Исследована поверхность изломов с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JCM-6000. Анализ диаграмм «крутящий момент – угол кручения» показал, что по сравнению с КЗ сталью предел прочности (σ_k) и предел текучести ($\sigma_{0.3}$) УМЗ стали возрастают в 1,3 – 3,8 раза, а относительный сдвиг (γ) снижется в 2,4 раза. Высокие значения прочностных свойств при кручении УМЗ стали позволяют обеспечить высокий крутящий момент без разрушения изделия. Следовательно, по сравнению с КЗ сталью УМЗ сталь 08X18H9 является более перспективным материалом для изготовления медицинских шурупов и других медицинских изделий, испытывающих в процессе скручивания значительные нагрузки. На поверхности всех изломов выявлено три области: волокнистая центральная часть, переходная (средняя) часть и относительно гладкая периферийная часть. Разрушение начинается с образования ямок сдвига в средней и периферийной областях, которые при дальнейшем вращении образца полностью затираются (в случае КЗ стали), или сохраняются (в случае УМЗ стали). Окончательное разрушение происходит под действием нормальных напряжений в центральной части образца.

Ключевые слова: аустенитная сталь, медицинские изделия, ультрамелкозернистая (УМЗ) структура, испытание на кручение, прочность, разрушение, излом

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (междисциплинарные проекты № 20-69-47059 и частично № 20-63-47027).

Для цитирования: Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Фесенюк М.В., Клевцова Н.А., Тюрков М.Н., Абрамова М.М., Рааб Г.И. Прочность и механизм разрушения при кручении ультрамелкозернистой аустенитной стали медицинского назначения // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 11. С. 832–838. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-832-838>

Original article

STRENGTH AND FRACTURE MECHANISM DURING TORSION OF ULTRAFINE-GRAINED AUSTENITIC STEEL FOR MEDICAL APPLICATIONS

G. V. Klevtsov¹, R. Z. Valiev², M. V. Fesenyuk³, N. A. Klevtsova¹,
M. N. Tyur'kov¹, M. M. Abramova², G. I. Raab²

¹Togliatti State University (14 Belorusskaya Str., Togliatti, Samara Region 445667, Russian Federation)

²Ufa State Aviation Technical University (12 K. Marksa Str., Ufa, Republic of Bashkortostan 450000, Russian Federation)

³JSC Production Association “Strela” (26 Shevchenko Str., Orenburg 460005, Russian Federation)

Abstract. The article considers evaluation of torsional strength and fracture of austenitic corrosion-resistant steel 08Kh18N9 with an ultrafine-grained (UFG) and coarse-grained (CG) structure, widely used in medicine for the production of plates, screws, rods for bone osteosynthesis and other medical products. The structure of the CG steel was studied using an Axiovert 40 MAT metallographic microscope, and the fine structure of the UFG steel was

investigated with a JEM-2100 transmission electron microscope. Torsion tests of the cylindrical samples with a diameter of 10 mm were carried out at a temperature of 20 °C on MK-50 installation. JEOL JCM-6000 scanning electron microscope was used for the microfractographic studies of fracture surfaces. The analysis of the “Torque – torsion angle” diagrams showed that the torsional ultimate strength (τ_u) and yield strength ($\tau_{0.3}$) of UFG steel increase by 1.3 – 3.8 times, and the relative shear (g) decreases by 2.4 times in comparison with CG steel. High values of torsional strength properties of UFG steel make it possible to provide high torque without destroying the product. Consequently UFG steel 08Kh18N9 in comparison with CG steel is a more promising material for the manufacture of medical screws and other medical products that experience significant loads during the torsion process. Three areas were identified on the surface of all fractures: fibrous central part, transitional (middle) part, and a relatively smooth peripheral part. Fracture begins with the formation of shear pits in the middle and peripheral parts, which, with further rotation of the sample, are completely rubbed out (in case CG steel), or remain (in case of UFG steel). Final failure occurs under the action of normal stresses in the central part of the sample.

Keywords: austenitic steel, medical devices, ultrafine-grained (UFG) structure, torsion test, strength, destruction, fracture

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation (interdisciplinary projects No. 20-69-47059 and partly No. 20-63-47027).

For citation: Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Fesenyuk M.V., Klevtsova N.A., Tyur'kov M.N., Abramova M.M., Raab G.I. Strength and fracture mechanism during torsion of ultrafine-grained austenitic steel for medical applications. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 11, pp. 832–838. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-832-838>

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование «щадящих» операционных технологий в медицине предполагает миниатюризацию медицинских имплантатов, главным образом пластин, шурупов, стержней для костного остеосинтеза, а также других медицинских изделий в травматологии и челюстно-лицевой хирургии. Данная задача не может быть решена без использования материалов, обладающих, помимо хорошей биосовместимости, комплексом высоких механических свойств при различных видах нагружения [1 – 3]. Этим требованиям полностью удовлетворяет новый класс объемных металлических материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученных методами интенсивной пластической деформации [4 – 6]. Многочисленные исследования убедительно свидетельствуют о том, что формирование УМЗ структур позволяет значительно повысить твердость, прочность и усталостную долговечность материалов [4 – 10]. В полной мере это относится к коррозионностойким аустенитным сталям, широко применяемым в травматологии [11, 12]. Многие изделия из таких сталей, например, шурупы, стержни, испытывают значительные крутильные напряжения при установке и эксплуатации [13 – 18]. Поэтому влияние УМЗ структуры на сопротивление аустенитных сталей разрушению при кручении остается актуальной задачей.

Целью настоящей работы является оценка прочности и механизма разрушения при кручении аустенитной УМЗ стали медицинского назначения по сравнению с крупнозернистой (КЗ) сталью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследования выбрана широко применяемая в медицине аустенитная коррозионностойкая сталь 08X18N9 (0,023 % C; 17,95 % Cr; 7,95 % Ni; 1,85 % Mn; 0,6 % Cu; 0,38 % Si; 0,35 % Mo; 0,15 % Co). Сталь исследовалась в исходном КЗ состоянии, полученном путем закалки с температуры 1050 °C

с предварительной выдержкой 1 ч, и в УМЗ состоянии. Для создания УМЗ состояния заготовки подвергали равноканальному угловому прессованию (РКУП) при температуре 350 °C (маршрут Вс, $n = 4$, $\varphi = 120^\circ$) [4, 6].

Структуру КЗ стали исследовали с помощью металлографического микроскопа Axiovert 40 MA, а тонкую структуру УМЗ стали – с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100. Испытания на растяжение выполнены на машине Instron 8801 с использованием образцов диаметром 3 мм при скорости деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Испытания на кручение цилиндрических образцов диаметром 10 мм и длиной 100 мм проводили при температуре 20 °C на установке МК-50 согласно ГОСТ 3565–80. Механические свойства стали при кручении оценивали по диаграмме «крутящий момент – угол кручения» [17]. Микрофрактографические исследования поверхностей изломов проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JCM-6000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сталь 08X18N9 в исходном состоянии представляет собой однофазный раствор γ -железа со средним размером зерна 30 мкм. После РКУП в стали наблюдается вытянутая полосовая УМЗ структура. На фоне развивающейся ячеистой структуры образуются микрополосы и полосы сдвига (рис. 1, а, б). Полосы сдвига толщиной до 100 нм образуются внутри четко выраженных мезополос, толщина которых достигает 700 нм. В структуре наблюдаются также двойники как отжига, так и деформационные (рис. 1, в). В теле мезополос имеет место высокая плотность дислокаций, их скопления и клубки. Средний размер зерна и механические свойства стали при растяжении представлены в табл. 1.

Анализ диаграмм «крутящий момент – угол кручения» для стали 08X18N9 показал (рис. 2), что крутящий момент у образцов из УМЗ стали примерно в 1,4 раза выше, чем у образцов из КЗ стали, а число оборотов и угол закручивания у образцов из стали УМЗ в 2,4 раза меньше, чем у образцов из КЗ стали (табл. 2). Расчет

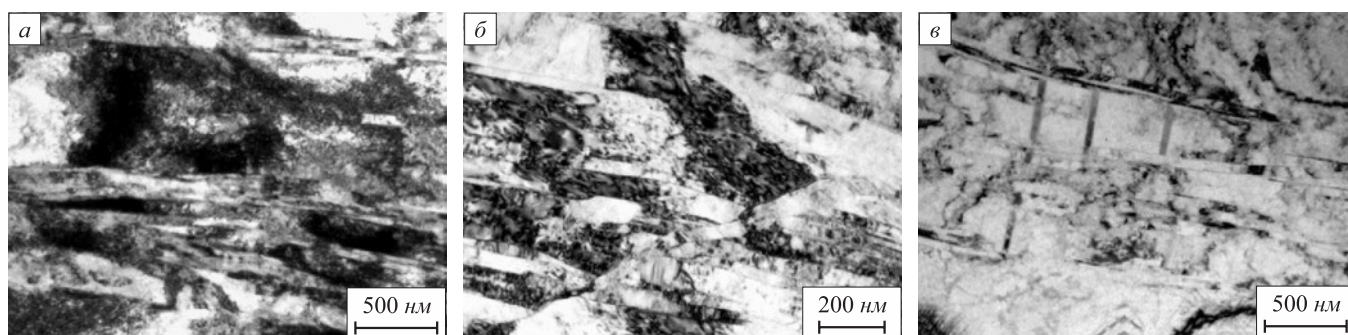


Рис. 1. Тонкая структура аустенитной стали 08X18H9, обработанной путем РКУП

Fig. 1. Fine structure of the ECAP-processed austenitic steel 08Kh18N9

Таблица 1

Средний размер зерна и механические свойства при растяжении стали 08X18H9

Table 1. Average grain size and tensile mechanical properties of the steel 08Kh18N9

Состояние	d_{cp} , мкм	НВ	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
КЗ (исходное)	30	159	624 ± 6	283 ± 2	$80 \pm 0,7$
УМЗ (РКУП)	0,55	363	1112 ± 15	1065 ± 15	$20 \pm 0,5$

предела прочности (τ_k), предела текучести ($\tau_{0,3}$) и относительного сдвига (g) стали при кручении также свидетельствует, что прочностные характеристики УМЗ стали возрастают, а относительный сдвиг снижается по сравнению с КЗ сталью (см. табл. 2).

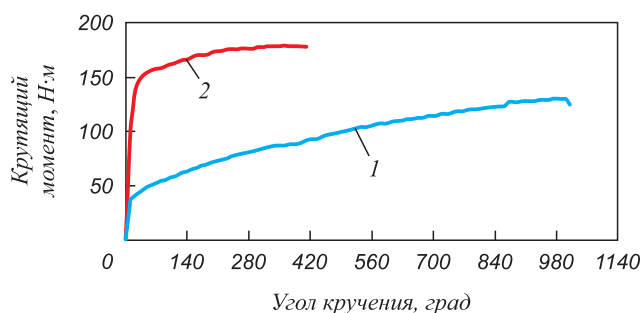


Рис. 2. Диаграмма «крутящий момент – угол кручения», полученная при испытании на кручение образцов из КЗ (1) и УМЗ (2) стали 08X18H9

Fig. 2. “Torque – torsion angle” diagram derived from torsion testing of the samples of CG (1) and UFG (2) steel 08Kh18N9

На поверхности всех полученных изломов можно выделить три области: волокнистую центральную часть, переходную (среднюю) часть и относительно гладкую периферийную часть. В центральной части изломов, независимо от состояния стали, микрорельеф состоит из равноосных ямок (рис. 3, а, з) и бесструктурных участков, образованных, по-видимому, от контакта ответных поверхностей излома. В средней части излома доминируют ямки сдвига, причем в изломе УМЗ стали они наблюдаются более четко (рис. 3, б, д). В периферийной части изломов микрорельеф мало-структурный (рис. 3, в, е), образовавшийся в результате взаимного трения ответных поверхностей излома.

Такое строение микрорельефа полученных изломов отражает процесс разрушения образцов при кручении. Разрушение начинается с периферийной области, где образуются ямки сдвига под действием касательного напряжения. При дальнейшем кручении ямки сдвига становятся полностью затертыми в периферийной части излома и частично затертыми в средней его части из-за контакта с ответными поверхностями изломов.

Таблица 2

Механические свойства стали 08X18H9 при кручении

Table 2. Mechanical properties of the steel 08Kh18n9 during torsion

Состояние	Крутящий момент, Н·м	Обороты, n	Угол закручивания, град	τ_k , МПа	$\tau_{0,3}$, МПа	g , %
КЗ (исходное)	$133 \pm 1,30$	$2,83 \pm 0,014$	$1020 \pm 5,0$	688	194	89
УМЗ (РКУП)	$181 \pm 1,80$	$1,67 \pm 0,019$	$420 \pm 7,0$	917	740	37

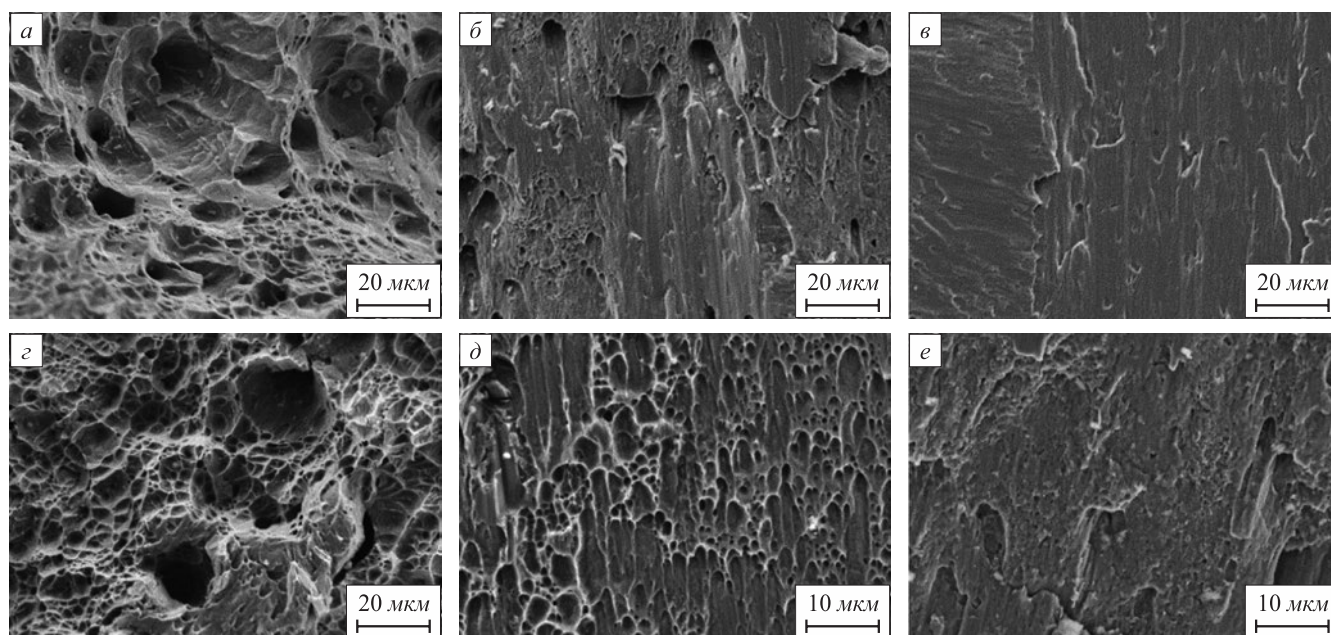


Рис. 3. Микрорельеф изломов на кручение образцов из КЗ (а – в) и УМЗ (з – е) стали 08Х18Н9. Микрорельеф получен с центральной (а, з), средней (б, д) и периферической (в, е) части излома

Fig. 3. Microrelief of the fractures from torsion of the samples of CG (a – в) and UFG (з – е) steel 08Kh18N9. Microreliefs were taken from the central (а, з), middle (б, д) and peripheral (в, е) parts of the fracture

В центральной части изломов доминируют нормальные напряжения отрыва, о чем свидетельствуют преимущественно равноосные ямки.

Как уже отмечалось, в травматологии и других областях медицины коррозионностойкие аустенитные стали широко используются для изготовления различных типов имплантатов (пластин, винтов, стержней и др.), а также инструментов и приспособлений для их установки. Медицинские изделия в процессе эксплуатации подвергаются значительным и разнообразным нагрузкам. Анализ эксплуатационных повреждений медицинских изделий показал [13, 18 – 20], что большой процент разрушения винтов для фиксации пластин и костных отломков в травматологии происходит в большинстве случаев путем среза в гладкой области шурупа между резьбовой частью и головкой. Чаще всего это происходит в процессе откручивания сросшихся с костью шурупов, после выздоровления пациента или по другим причинам [13, 18, 19]. При кручении коэффициент жесткости напряженного состояния материала равен 1, т. е. касательные и нормальные напряжения равны между собой ($\tau_{\max} = \sigma_1$), что свидетельствует о низкой чувствительности данного вида нагружения к наличию концентратора напряжения в образцах или изделиях. Поэтому оценка сопротивления разрушению медицинских шурупов по результатам испытания на кручение гладких образцов является в большинстве случаев правомерной.

В работе представлены результаты испытаний на кручение аустенитной УМЗ стали 08Х18Н9 в сравнении с КЗ сталью. Испытания проведены на образцах

одинакового размера и в одинаковых условиях нагружения.

Результаты испытаний показали, что пределы прочности и текучести на скручивание УМЗ стали 08Х18Н9 увеличиваются в 1,3 – 3,8 раза, а относительный сдвиг снижается в 2,4 раза по сравнению с КЗ сталью (см. табл. 2). Для практики эксплуатации медицинских изделий это является благоприятным фактором, снижающим, например, вероятность разрушения шурупов, сросшихся с костью при их откручивании. Высокие значения прочностных свойств при кручении УМЗ стали позволяют обеспечить высокий крутящий момент без разрушения изделия. Следовательно, УМЗ сталь 08Х18Н9 по сравнению с КЗ сталью является более перспективным материалом для изготовления медицинских шурупов и других медицинских изделий, испытывающих в процессе эксплуатации нагрузки кручением.

Выводы

Пределы прочности и текучести УМЗ стали 08Х18Н9 при кручении возрастают, а значение относительного сдвига снижается по сравнению с КЗ сталью, что является благоприятным фактором, снижающим вероятность разрушения при откручивании сросшихся с костью шурупов при остеосинтезе. Следовательно, по сравнению с КЗ сталью УМЗ сталь 08Х18Н9 является более перспективным материалом для изготовления медицинских шурупов и других медицинских изделий, испытывающих в процессе скручивания значительные нагрузки.

На поверхности всех изломов образцов, независимо от состояния стали, можно выделить три области, отличающиеся микрорельефом поверхности и отражающие процесс разрушения образцов при кручении. Разрушение начинается с образования ямок сдвига в средней

и периферийной области, которые при дальнейшем вращении образца полностью затираются (в случае КЗ стали), или сохраняются (в случае УМЗ стали). Окончательное разрушение происходит под действием нормальных напряжений в центральной части образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Semenova I.P., Klevtsov G.V., Klevtsova N.A., Dyakonov G.S., Matchin A.A., Valiev R.Z. Nanostructured titanium for maxillofacial mini-implants // *Advanced Engineering Materials*. 2016. Vol. 18. No. 7. P. 1216–1224. <http://doi.org/10.1002/adem.201500542>
2. Попков А.В. Биосовместимые имплантаты в травматологии и ортопедии // *Гений Ортопедии*. 2014. № 3. С. 94–99.
3. Fujishiro T., Moojen D.J., Kobayashi N., Dhert W.J., Bauer T.W. Perivascular and diffuse lymphocytic inflammation are not specific for failed metal-on-metal hip implants // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2011. Vol. 469. No. 4. P. 1127–1133. <http://doi.org/10.1007/s11999-010-1649-1>
4. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. *Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. 440 p.
5. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивную пластическую деформацию // *Российские нанотехнологии*. 2006. Т. 1. № 1–2. С. 208–217.
6. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных металлических материалов / Г.В. Клевцов, Е.В. Бобрук, И.П. Семенова, Н.А. Клевцова, Р.З. Валиев. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 240 с.
7. Tsuji N., Ueji R., Minamino Y., Saito Y. A new and simple process to obtain nano-structured bulk low-carbon steel with superior mechanical property // *Scripta Materialia*. 2002. Vol. 46. No. 4. P. 305–310. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01243-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01243-X)
8. Hohenwarter A., Pippan R. Fracture of ECAP-deformed iron and the role of extrinsic toughening mechanism // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. No. 8. P. 2973–2983. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.057>
9. Song R., Ponge D., Raabe D., Speer J.G., Matlock D.K. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 441. No. 1–2. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.095>
10. Estrin Y., Vinogradov A. Fatigue behavior of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview // *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. No. 6. P. 898–907. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.06.022>
11. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. М.: Металлургия, 1982. 184 с.
12. Odnobokova M., Belyakov A., Enikeev N., Molodov D.A., Kaibyshev R. Annealing behavior of 304L stainless steel processed by large deformations of cold and warm rolling // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 689. P. 370–383. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.073>
13. Бондаренко А.В., Пелеганчук В.А., Распопова Е.А., Печенин С.А. Разрушение имплантов при накомостном остеосинтезе переломов длинных костей // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2004. Т. 11. № 2. С. 41–43. <https://doi.org/10.17816/vto200411241-43>
14. Lau T.W., Leung F., Chan C.F. Wound complication of minimally invasive plate osteosynthesis in distal tibia fractures // *International Orthopaedics*. 2008. Vol. 32. No. 5. P. 697–703. <http://doi.org/10.1007/s00264-007-0384-z>
1. Semenova I.P., Klevtsov G.V., Klevtsova N.A., Dyakonov G.S., Matchin A.A., Valiev R.Z. Nanostructured titanium for maxillofacial mini-implants. *Advanced Engineering Materials*. 2016, vol. 18, no. 7, pp. 1216–1224. <http://doi.org/10.1002/adem.201500542>
2. Popkov A.V. Biocompatible implants in traumatology and orthopedics. *Genii Ortopedii*. 2014, no. 3, pp. 94–99. (In Russ.).
3. Fujishiro T., Moojen D.J., Kobayashi N., Dhert W.J., Bauer T.W. Perivascular and diffuse lymphocytic inflammation are not specific for failed metal-on-metal hip implants. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2011, vol. 469, no. 4, pp. 1127–1133. <http://doi.org/10.1007/s11999-010-1649-1>
4. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. *Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014, 440 p.
5. Valiev R.Z. Design of nanostructured metals and alloys with unique properties using severe plastic deformation, *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2006, vol. 1, no. 1–2, pp. 208–217. (In Russ.).
6. Klevtsov G.V., Bobruk E.V., Semenova I.P., Klevtsova N.A., Valiev R.Z. *Strength and Fracture Mechanisms of Bulk Nanostructured Metallic Materials*. Ufa: USATU, 2016, 240 p. (In Russ.).
7. Tsuji N., Ueji R., Minamino Y., Saito Y. A new and simple process to obtain nano-structured bulk low-carbon steel with superior mechanical property. *Scripta Materialia*. 2002, vol. 46, no. 4, pp. 305–310. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01243-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01243-X)
8. Hohenwarter A., Pippan R. Fracture of ECAP-deformed iron and the role of extrinsic toughening mechanism. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 8, pp. 2973–2983. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.057>
9. Song R., Ponge D., Raabe D., Speer J.G., Matlock D.K. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, vol. 441, no. 1–2, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.095>
10. Estrin Y., Vinogradov A. Fatigue behavior of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview. *International Journal of Fatigue*. 2010, vol. 32, no. 6, pp. 898–907. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.06.022>
11. Pickering F.B. *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. Applied Science Publishers, 1978, 275 p. (Russ. ed.: Pickering F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stalei*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 182 p.)
12. Odnobokova M., Belyakov A., Enikeev N., Molodov D.A., Kaibyshev R. Annealing behavior of 304L stainless steel processed by large deformations of cold and warm rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 689, pp. 370–383. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.073>
13. Bondarenko A.V., Peleganchuk V.A., Raspopova E.A., Pechenin S.A. Destruction of implants after extraosseous osteosynthesis of long bones fractures. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2004, vol. 11, no. 2, pp. 41–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/vto200411241-43>
14. Lau T.W., Leung F., Chan C.F. Wound complication of minimally invasive plate osteosynthesis in distal tibia fractures. *International Orthopaedics*. 2008, vol. 32, no. 5, pp. 697–703. <http://doi.org/10.1007/s00264-007-0384-z>

15. Livani B., Belangero W.D., Castro de Medeiros R. Fractures of the distal third of the humerus with palsy of the radial nerve: management using minimally-invasive percutaneous plate osteosynthesis // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 2006. Vol. 88-B. No. 12. P. 1625–1628.
<http://doi.org/10.1302/0301-620X.88B12.17924>
16. Xia L., Zhou J., Zhang Y., Mei G., Jin D. Meta-analysis of reamed versus unreamed intramedullary nailing for the treatment of closed tibial fractures // *Orthopedics*. 2014. Vol. 37. No. 4. P. 332–338.
<http://doi.org/10.3928/01477447-20140401-52>
17. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСиС, 1998. 400 с.
18. Мейснер С.Н., Котенко М.В., Копысова В.А., Яременко А.И., Раткин И.К. Особенности повреждения имплантатов из металлических сплавов // ЭНИ Забайкальский медицинский вестник. 2016. № 1. С. 59–68.
19. Kleweno C.P., Jawa A., Wells J.H., O'Brien T.G., Higgins L.D., Harris M.B., Warner J.J. Midshaft clavicular fractures: Comparison of intramedullary pin and plate fixation // *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2011. Vol. 20. No. 7. P. 1114–1117.
<https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.03.022>
20. Zehir S., Zehir R., Şahin E. Comparison of novel intramedullary nailing with miniinvasive plating in surgical fixation of displaced midshaft clavicle fractures // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2015. Vol. 135. No. 3. P. 339–344.
<https://doi.org/10.1007/s00402-014-2142-1>
15. Livani B., Belangero W.D., Castro de Medeiros R. Fractures of the distal third of the humerus with palsy of the radial nerve: management using minimally-invasive percutaneous plate osteosynthesis. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 2006, vol. 88-B, no. 12, pp. 1625–1628.
<http://doi.org/10.1302/0301-620X.88B12.17924>
16. Xia L., Zhou J., Zhang Y., Mei G., Jin D. Meta-analysis of reamed versus unreamed intramedullary nailing for the treatment of closed tibial fractures. *Orthopedics*. 2014, vol. 37, no. 4, pp. 332–338.
<http://doi.org/10.3928/01477447-20140401-52>
17. Zolotarevskii V.S. *Mechanical Properties of Metals*. Moscow: MISiS, 1998, 400 p. (In Russ.).
18. Meisner S.N., Kotenko M.V., Kopysova V.A., Yaremenko A.I., Ratkin I.K. Features of implants damage from metal alloys. *ENI Zabaikal'skii meditsinskii byulleten'*. 2016, no. 1, pp. 59–68. (In Russ.).
19. Kleweno C.P., Jawa A., Wells J.H., O'Brien T.G., Higgins L.D., Harris M.B., Warner J.J. Midshaft clavicular fractures: Comparison of intramedullary pin and plate fixation. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2011, vol. 20, no. 7, pp. 1114–1117.
<https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.03.022>
20. Zehir S., Zehir R., Şahin E. Comparison of novel intramedullary nailing with miniinvasive plating in surgical fixation of displaced midshaft clavicle fractures. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2015, vol. 135, no. 3, pp. 339–344.
<https://doi.org/10.1007/s00402-014-2142-1>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Всеволодович Клевцов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой нанотехнологий, материаловедения и механики, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0002-4928-7415
E-mail: klevtsov11948@mail.ru

Руслан Зуфарович Валиев, д. ф.-м. н., профессор, директор НИИ физики перспективных материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет
ORCID: 0000-0003-4340-4067
E-mail: rzvaliev@yahoo.com

Максим Викторович Фесенюк, к.т.н., начальник отдела, АО «ПО «Стрела»
ORCID: 0000-0002-4584-6638
E-mail: maksim_fesenyuk@mail.ru

Наталья Артуровна Клевцова, д.т.н., профессор кафедры нанотехнологий, материаловедения и механики, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0001-8667-656X
E-mail: inshtet@mail.ru

Максим Николаевич Тюрков, к.ф.-м.н., доцент кафедры нанотехнологий, материаловедения и механики, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0002-1828-6102
E-mail: turkovmn@mail.ru

Марина Михайловна Абрамова, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник НИИ физики перспективных материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет
ORCID: 0000-0003-2691-6335
E-mail: abramovamm@yandex.ru

Георгий Иосифович Рааб, д.т.н., руководитель лаборатории «Технологии интенсивной пластической деформации (ИПД)» НИИ физики перспективных материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет
ORCID: 0000-0003-3681-4850
E-mail: giraab@mail.ru

Gennadii V. Klevtsov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Nanotechnology, Materials and Mechanics, Togliatti State University
ORCID: 0000-0002-4928-7415
E-mail: klevtsov11948@mail.ru

Ruslan Z. Valiev, Dr. Sci. (Phys.-math.), Prof., Director of the Research Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University
ORCID: 0000-0003-4340-4067
E-mail: rzvaliev@yahoo.com

Maksim V. Fesenyuk, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Division, JSC Production Association "Strela"
ORCID: 0000-0002-4584-6638
E-mail: maksim_fesenyuk@mail.ru

Natal'ya A. Klevtsova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Nanotechnology, Materials and Mechanics, Togliatti State University
ORCID: 0000-0001-8667-656X
E-mail: inshtet@mail.ru

Maksim N. Tyur'kov, Cand. Sci. (Phys.-math.), Assist. Prof. of the Chair of Nanotechnology, Materials and Mechanics, Togliatti State University
ORCID: 0000-0002-1828-6102
E-mail: turkovmn@mail.ru

Marina M. Abramova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Research Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University
ORCID: 0000-0003-2691-6335
E-mail: abramovamm@yandex.ru

Georgii I. Raab, Cand. Sci. (Eng.), Head of the SPD Laboratory of the Research Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University
ORCID: 0000-0003-3681-4850
E-mail: giraab@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ:

Клевцов Г.В. – руководство проектом.

Валиев Р.З. – осуществление выбора схемы и режимов ИПД.

Фесенюк М.В. – испытание на кручение.

Клевцова Н.А. – расчет характеристик материала при растяжении и кручении.

Тюрков М.Н. – макро- и микрофрактография.

Абрамова М.М. – исследование тонкой структуры.

Рааб Г.И. – отработка режимов РКУП.

Поступила в редакцию 02.08.2021

После доработки 14.09.2021

Принята к публикации 29.10.2021

Received 02.08.2021

Revised 14.09.2021

Accepted 29.10.2021