Оригинальная статья УДК 669.295:544.022 DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-80-85

ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА И МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИТА Ті/ТіВ, ПОЛУЧЕННОГО ИСКРОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ

© 2022 г. М. С. Озеров, В. С. Соколовский, Е. А. Поволяева, Е. И. Ноздрачева, С. В. Жеребцов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85)

- Аннотация. Металломатричный композит Ti/TiB был получен методом искрового плазменного спекания при температуре 1000 °C. В исходном состоянии микроструктура композита Ti/TiB состояла из игольчатых волокон TiB, неравномерно распределенных в матрице титана. РЭМ показала, что видимый диаметр волокон TiB варьировался в широком диапазоне: от десятков до нескольких сотен нанометров. Средний диаметр волокон TiB в исходном состоянии составляет 163 ± 35 нм. Горячая прокатка привела к выравниванию фрагментированных частиц-волокон TiB в направлении прокатки. Видимая средняя длина волокон TiB уменьшилась с 8 ± 4 до 3,0 ± 1,2 мкм, вероятно, в результате обрыва волокон при деформации. Установлено, что после горячей прокатки композит обладает повышенным пределом текучести и значительно улучшенными показателями пластичности по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец разрушился при степени деформации на сжатие 25 %, тогда как пластичность для исходного состояний. Прогнозируемая теоретическая прочность, рассчитанная путем суммирования вклада всех механизмов упрочнения, составляет 1946 МПа, что выше экспериментального значения 1200 МПа. Дисперсионное упрочнение обломками волокон TiB вносит наиболее заметный вклад в общую прочность композита (934 МПа или 50 %).
- *Ключевые слова*: металломатричный композит, искровое плазменное спекание, бориды, микроструктура, механические свойства, растровая электронная микроскопия, механизмы упрочнения
- Благодарности: работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования Белгородского государственного национального исследовательского университета «Технологии и материалы» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора № 075-15 -2021-690 (уникальный идентификатор проекта РФ 2296.61321X0030).
- *Финансирование*: работа выполнена за счет гранта НИУ БелГУ по поддержке коллективов молодых ученых «Молодые лидеры в науке».
- Для цитирования: Озеров М.С., Соколовский В.С., Поволяева Е.А., Ноздрачева Е.И., Жеребцов С.В. Горячая прокатка композита Ті/ТіВ, полученного искровым плазменным спеканием // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 80 85. https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-80-85

Original article

STRENGTHENING MECHANISMS OF A TI/TIB COMPOSITE PRODUCED BY SPARK PLASMA SINTERING AFTER HOT ROLLING

© 2022 M. S. Ozerov, V. S. Sokolovsky, E. A. Povolyaeva, E. I. Nozdracheva, S. V. Zherebtsov

Belgorod National Research University (85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation)

Abstract. The Ti/TiB metal-matrix composite was obtained by spark plasma sintering at a temperature of 1000 °C. In the initial state, the Ti/TiB MMC microstructure consisted of TiB needle fibers unevenly distributed in the titanium matrix. SEM showed that the apparent diameter of the TiB fibers varied over a wide range: from tens to several hundreds of nanometers. The average TiB fiber diameter in the initial state is 163 ± 35 nm. Hot rolling caused the fragmented TiB fiber particles to align in the rolling direction. The apparent average length of the TiB fibers decreased from 8 ± 4 to $3.0 \pm 1.2 \mu$ m, probably as a result of fiber breakage during deformation. It has been established that after hot rolling the composite has an increased yield strength and significantly improved ductility compared to the initial state: the hot-rolled sample failed at a compressive strain of 25 %, while the ductility for the initial state was 12 %. The yield strength was 930 and 1200 MPa for the initial and hot-rolled states. The predicted theoretical strength, calculated by summing the contribution of all hardening mechanisms, is 1946 MPa, which is higher than the experimental value of 1200 MPa. Dispersion strengthening by fragments of TiB fibers makes the most significant contribution to the overall strength of the composite (934 MPa or 50 %).

- *Keywords*: metalmatrix composite, spark plasma sintering, borides, microstructure, mechanical properties, scanning electron microscopy, hardening mechanisms
- Acknowledgements: the work was carried out on the equipment of the Center for Collective Use of the Belgorod State National Research University "Technologies and Materials" with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under contract No. 075-15 -2021-690 (unique identifier of the RF project 2296.61321 x 0030).
- *Funding*: the work was carried out at the expense of a grant from the National Research University of Belarus for the support of teams of young scientists "Young Leaders in Science".
- For citation: Ozerov M.S., Sokolovsky V.S., Povolyaeva E.A., Nozdracheva E.I., Zherebtsov S.V. Hot rolling of Ti/TiB composite produced by spark plasma sintering. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2022, no. 4 (42), pp. 80 – 85. (In Russ.). https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-80-85

Введение

За счет привлекательных свойств (таких как высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, биосовместимость) титан и титановые сплавы пользуются большим спросом в промышленности и медицине [1]. Однако проблема недостаточной твердости, прочности и износостойкости титана и низколегированных титановых сплавов остается актуальной и, несомненно, требует новых решений. Повышение прочности и твердости титана может быть достигнуто путем синтеза металломатричных композитов (ММК) с использованием в качестве армирующего компонента таких высокотвердых соединений, как TiB, TiC, TiN [2 – 5]. На сегодняшний день процесс искрового плазменного спекания (ИПС) является одним из наиболее перспективных и востребованных методов создания ММК. Однако стоит признать, что композиты, полученные методом ИПС, часто имеют очень ограниченную пластичность при комнатной температуре [6 – 9]. Для расширения области применения и повышения необходимого баланса технологических свойств композита Ti/TiB необходимы комплексные исследования по поиску возможности увеличения пластических свойств этого материала. Одним из способов повышения пластичности композитов на основе титана является термомеханическая обработка [9-12]. Горячая прокатка является относительно простым методом пластической деформации, с помощью которого можно повысить механические свойства металла, в том числе и металломатричных композитов [9, 13]. Однако следует отметить, что работ по изучению влияния горячей прокатки на структуру и механические свойства титано-матричных композитов, полученных методом искрового плазменного спекания, очень мало.

Целью настоящей работы является изучение влияния горячей прокатки на структуру и механические свойства полученного искровым плазменным спеканием композита Ti/TiB, содержащего 5 % TiB2.

Основные результаты и их обсуждение

В исходном состоянии микроструктура ММК Ті/ТіВ состояла из игольчатых волокон ТіВ, неравномерно распределенных в матрице титана (см. рисунок). РЭМ показала, что видимый диаметр волокон ТіВ варьировался в широком диапазоне: от десятков до нескольких сотен нанометров. Средний диаметр волокн ТіВ в исходном состоянии составляет 163 ± 35 нм. Горячая прокатка привела к выравниванию фрагментированных частиц-волокон ТіВ в направлении прокатки (рис. 1, δ). Видимая средняя длина волокон ТіВ уменьшилась с 8 ± 4 до 3,0 ± 1,2 мкм, вероятно, в результате обрыва волокон при деформации.

После горячей прокатки ММК показал значительно более высокие значения предела текучести и пластичности по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец показал пластичность 25 %, пластичность в исходном состоянии состави-



Изображения микроструктуры ММК Ті/ТіВ (травленая микроструктура (РЭМ)): *a* – исходное состояние; б – состояние после горячей прокатки Images of the Ti/TiB MMC microstructure: *a* – initial state; б – state after hot rolling; etched microstructure (SEM)

ла 12 %. Предел текучести образцов в исходном состоянии и после горячей прокатки составил 930 и 1200 МПа соответственно. Значительно увеличилась твердость прокатанного образца по сравнению с исходным состоянием: микротвердость возросла с 480 до 550 HV.

Из литературы [12, 14, 15] известно, что на прочность металломатричных композитов (помимо армирующих элементов) большое влияние оказывает соотношение размеров (длины и диаметра) армированных частиц [12, 14, 15]. Увеличение соотношения размеров (а не самой длины или толщины) боридных волокон обычно приводит к упрочнению и охрупчиванию композитов. Эта взаимосвязь подтверждается полученными в настоящем исследовании результатами: соотношение длины к диметру волокон исходного и горячекатаного ММК составляет примерно 49 и 18 соответственно. В работе [14] показано, что уменьшение значения данного соотношения и приближение его к значению 15 (или ниже) делает механизм Орована основным механизмом упрочнения композитов.

Вклад наиболее значимых механизмов упрочнения в общую прочность композита можно выразить как [16]:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\Sigma} = \boldsymbol{\sigma}_0 + \boldsymbol{\sigma}_{ss} + \boldsymbol{\sigma}_{\rho} + \boldsymbol{\sigma}_{H-P} + \boldsymbol{\sigma}_{L-T} + \boldsymbol{\sigma}_{TiB(OR)},$$

где σ_0 – напряжение трения решетки; σ_{ss} – вклад твердорастворного упрочнения; σ_{ρ} – субструктурное упрочнение за счет плотности дислокаций; σ_{H-P} – вклад упрочнения по закону Холла-Петча; σ_{L-T} – упрочнение из-за передачи нагрузки от матрицы титана к ТіВ под действием межфазного напряжения сдвига; $\sigma_{TiB(OR)}$ – дисперсионное упрочнение волокнами ТіВ по механизму Орована. Суммарный эффект твердорастворного упрочнения за счет внедренных атомов углерода, кислорода и азота в титане согласно работе [17] составил 160 МПа. В сумме со значением напряжением трения для чистого титана (336 МПа [18]) значение σ_0 было принято равным 496 МПа. Растворимость бора в титановой матрице очень низкая и составляет <0,001 % (атом.) [19], поэтому влиянием атомов бора на упрочнение пренебрегали.

Вклад субструктурного упрочнения за счет роста плотности дислокации σ_ρ может быть вычислен по зависимости [20]

$$\sigma_{\rho} = M \alpha G b \sqrt{\rho},$$

где M – фактор Тейлора; α – постоянная; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; $\rho = 0.5 \cdot 10^{16}$ м⁻² – плотность дислокаций.

Значения M и α составляли 3 и 0,2 соответственно [21]. Для титановой матрицы [18] $b = 2,9 \cdot 10^{-10}$ м. Для композита TI/TiB G = 98 ГПВ [6]. Вклад Холла-Петча в данном случае вряд ли можно оценить из-за отсутствия выраженной зеренной структуры. Однако более ранние расчеты оценивали вклад упрочнения Холла-Петча в 8 – 10 % от общей прочности ММК [14, 21]. В рассматриваемом случае σ_{H-P} было принято равным 110 МПа.

Упрочнение из-за передачи нагрузки от матрицы титана к ТіВ вычисляли по формуле [16]:

$$\sigma_{L-T} = V_{\text{TiB}} \frac{S+2}{2} + V_{\text{Ti}},$$

где V_{TiB} и V_{Ti} – объемные доли соответствующих фаз; S – отношение длины к ширине волокон TiB.

Объемные доли титана и ТіВ, определенные с помощью рентгеноструктурного анализа, составили 0,91 и 0,9 соответственно.

Дисперсионное упрочнение по механизму Орована $\sigma_{\text{тів(OR)}}$ определяли по зависимости [22]:

$$\sigma_{\text{TiB(OR)}} = \left(\frac{0.538Gbf^{1/2}}{X}\right) \ln\left(\frac{X}{2b}\right),$$

где X и *f* – значения диаметра и объемной доли частиц TiB.

Таким образом, прогнозируемое теоретическое значение прочности, рассчитанное путем суммирования вклада всех перечисленных выше механизмов упрочнения, дало 1946 МПа, что выше значения экспериментальной прочности 1200 МПа. Следует отметить, что среди всех других механизмов упрочнения дисперсионное упрочнение обломками волокон TiB вносит наиболее заметный (934 МПа или примерно 50 %) вклад. Близкое значение вклада в упрочнение по Оровану было получено в ММК Ті/ТіВ после кручения под высоким давлением при 400 °С [23]. Таким образом, свойства композита Ті/ТіВ в большей степени связаны с морфологией и распределением волокон TiB, а не со свойствами матрицы. Можно сделать вывод, что деформационная обработка композита имеет хороший потенциал для улучшения механических свойств ММК.

Выводы

Исходная микроструктура металломатричных композитов Ti/TiB состояла из игольчатых волокон TiB со средним диаметром 163 ± 35 нм, распределенных в ГПУ-матрице титана. Горячая прокатка привела к некоторому выравниванию фрагментированных частиц TiB в направлении прокатки. Кажущаяся средняя длина волокон TiB уменьшилась с 8 ± 4 до $3,0 \pm 1,2$ мкм.

После горячей прокатки композита значительно улучшается пластичность по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец разрушился при деформации сжатия 25 %, тогда как пластичность образца в исходном состоянии составила 12 %.

Анализ вклада механизмов упрочнения в общую прочность композита Ti/TiB показывает, что основной вклад (примерно 50 %) вносит дисперсионное упрочнение обломками волокон TiB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Leyens C., Peters M. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. Wiley-VCH: Weinheim, 2003. 499 p.
- **2.** Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites Reinforcement, production methods,

and mechanical properties // Adv. Eng. Mater. 2000. Vol. 2. P. 85–91.

- **3.** Lindroos V.K., Talvitie M.J.J. Recent advances in metal matrix composites // Mater. Process. Technol. 1995. Vol. 53. P. 273–284.
- Radhakrishna Bhat B.V., Subramanyam J., Bhanu Prasad V.V. Preparation of Ti-TiB-TiC & Ti-TiB composites by in-situ reaction hot pressing // Mater. Sci. Eng. A. 2002. Vol. 325. P. 126–130.
- **5.** Ozerov M., Klimova M., Vyazmin A., Stepanov N., Zherebtsov S. Orientation relationship in a Ti/TiB metal-matrix composite // Mater. Lett. 2017. Vol. 186. P. 168–170.
- 6. Morsi K., Patel V.V. Processing and properties of titanium–titanium boride (TiBw) matrix composites a review // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. P. 2037–2047.
- 7. Ragulya A.V. Fundamentals of spark plasma sintering, in encyclopedia of materials. Science and Technology. Eds. K.H. Jürgen Buschow et al.). 2010. 5 p.
- Feng H., Zhou Yu, Jia D., Meng Q., Rao J. Growth mechanism of in situ TiB whiskers in spark plasma sintered TiB/Ti metal matrix composites // Cryst. Growth Des. 2006. Vol. 7. P. 1626–1630.
- Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2012. Vol. 22. P. 79–83.
- 10. Gaisin R.A., Imayev V.M., Imayev R.M. Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near α titanium alloy/TiB composites produced by casting // J. Alloys Compd. 2017. Vol. 723. P. 385–394. http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.287
- Zherebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M. Structure and properties of Ti/TiB metal-matrix composite after isothermal multiaxial forging // Acta Phys. Pol. A. 2018. Vol. 134. P. 695–698. http://doi.org/10.12693/ APhysPolA.134.695
- Ozerov M., Klimova M., Sokolovsky V., Stepanov N., Popov A., Boldin M., Zherebtsov S. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti/TiB metal matrix composite during isothermal multiaxial forging // J. Alloys Compd. 2019. Vol. 770. P. 840–848. http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.215
- Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2012. Vol. 22. P. 79–83. http://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61687-2

- 14. Chen B., Shen J., Ye X., Jia L., Li S., Umeda J., Takahashi M., Kondoh K. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites // Acta Mater. 2017. Vol. 140. P. 317–325.
- **15.** Koo M.Y., Park J.S., Park M.K., Kim K.T., Hong S.H. Effect of aspect ratios of in situ formed TiB whiskers on the mechanical properties of TiBw/Ti-6Al-4V composites // Scr. Mater. 2012. Vol. 66. P. 487–490.
- 16. Munir K.S., Zheng Y., Zhang D., Lin J., Li Y., Wen C. Improving the strengthening efficiency of carbon nanotubes in titanium metal matrix composites // Mater. Sci. Eng. A. 2017. Vol. 696. P. 10–25.
- Conrad H. Effect of interstitial solutes on the strength and ductility of titanium // Prog. Mater. Sci. 1981. Vol. 26. P. 123–403.
- Frost. H.J., Ashby M.F. Deformation-Mechanism Maps. Pergamon Press: Oxford, UK, 1982. P. 1–166.
- **19.** Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites Reinforcement, production methods, and mechanical properties. Adv. Eng. Mater. 2000. Part 2. P. 85–91.
- **20.** Estrin Y., Toth L.S., Molinari A., Brechet Y. A dislocation-based model for all hardening stages in large strain deformation // Acta Mater. 1998. Vol. 46. P. 5509–5522.
- **21.** Ardell A.J. Precipitation hardening // Metall. Mater. Trans. A. 1985. Vol. 16 (12). P. 2131–2165.
- **22.** Gladman T. Precipitation hardening in metals // Mater. Sci. Technol. 1999. Vol. 15. P. 30–36.
- 23. Zherebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M., Ivanisenko Y. Effect of highpressure torsion on structure and microhardness of Ti/TiB metal matrix composite // Metals. 2017. Vol. 7. P. 507.

REFERENCES

- **1.** Leyens C., Peters M. *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications.* Wiley-VCH: Weinheim, 2003, 499 p.
- Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites – Reinforcement, production methods, and mechanical properties. *Adv. Eng. Mater.* 2000, vol. 2, pp. 85–91.
- 3. Lindroos V.K., Talvitie M.J.J. Recent advances in metal matrix composites. *Mater. Process. Technol.* 1995, vol. 53, pp. 273–284.
- Radhakrishna Bhat B.V., Subramanyam J., Bhanu Prasad V.V. Preparation of Ti-TiB-TiC & Ti-TiB composites by in-situ reaction hot pressing. *Mater. Sci. Eng. A.* 2002, vol. 325, pp. 126–130.

- 5. Ozerov M., Klimova M., Vyazmin A., Stepanov N., Zherebtsov S. Orientation relationship in a Ti/TiB metal-matrix composite. *Mater. Lett.* 2017, vol. 186, pp. 168–170.
- Morsi K., Patel V.V. Processing and properties of titanium–titanium boride (TiBw) matrix composites – a review. *J. Mater. Sci.* 2007, vol. 42, pp. 2037–2047.
- 7. Ragulya A.V. *Fundamentals of spark plasma sintering, in encyclopedia of materials.* Science and Technology. K.H. Jürgen Buschow et al. eds. 2010, 5 p.
- 8. Feng H., Zhou Yu, Jia D., Meng Q., Rao J. Growth mechanism of in situ TiB whiskers in spark plasma sintered TiB/Ti metal matrix composites. *Cryst. Growth Des.* 2006, vol. 7, pp. 1626–1630.
- Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2012, vol. 22, pp. 79–83.
- 10. Gaisin R.A., Imayev V.M., Imayev R.M. Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near α titanium alloy/TiB composites produced by casting. J. Alloys Compd. 2017, vol. 723, p. 385–394. http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.287
- Zherebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M. Structure and properties of Ti/TiB metal-matrix composite after isothermal multiaxial forging. *Acta Phys. Pol. A.* 2018, vol. 134, pp. 695–698. *http://doi.org/10.12693/APhysPolA.134.695*
- 12. Ozerov M., Klimova M., Sokolovsky V., Stepanov N., Popov A., Boldin M., Zherebtsov S. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti/TiB metal matrix composite during isothermal multiaxial forging. J. Alloys Compd. 2019, vol. 770, pp. 840–848. http://doi.org/10.1016/j. jallcom.2018.08.215
- Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2012, vol. 22, pp. 79–83. *http://doi.org/10.1016/S1003-*6326(12)61687-2
- 14. Chen B., Shen J., Ye X., Jia L., Li S., Umeda J., Takahashi M., Kondoh K. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites. *Acta Mater.* 2017, vol. 140, pp. 317–325.
- **15.** Koo M.Y., Park J.S., Park M.K., Kim K.T., Hong S.H. Effect of aspect ratios of in situ

formed TiB whiskers on the mechanical properties of TiBw/Ti-6Al-4V composites. *Scr. Mater.* 2012, vol. 66, pp. 487–490.

- Munir K.S., Zheng Y., Zhang D., Lin J., Li Y., Wen C. Improving the strengthening efficiency of carbon nanotubes in titanium metal matrix composites. *Mater. Sci. Eng.* A. 2017, vol. 696, pp. 10–25.
- **17.** Conrad H. Effect of interstitial solutes on the strength and ductility of titanium. *Prog. Mater. Sci.* 1981, vol. 26, pp. 123–403.
- Frost. H.J., Ashby M.F. Deformation-Mechanism Maps. Pergamon Press: Oxford, UK, 1982, pp. 1–166.
- **19.** Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites – Reinforcement, production methods, and mechanical properties. *Adv. Eng. Mater.* 2000, part 2, pp. 85–91.
- 20. Estrin Y., Toth L.S., Molinari A., Brechet Y. A dislocation-based model for all hard-ening stages in large strain deformation. *Acta Mater.* 1998, vol. 46, pp. 5509–5522.
- **21.** Ardell A.J. Precipitation hardening. *Metall. Mater. Trans. A.* 1985, vol. 16 (12), pp. 2131–2165.
- **22.** Gladman T. Precipitation hardening in metals. *Mater. Sci. Technol.* 1999, vol. 15, pp. 30–36.
- **23.** Zherebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M., Ivanisenko Y. Effect of highpressure torsion on structure and microhardness of Ti/TiB metal matrix composite. *Metals.* 2017, vol. 7, pp. 507.

Сведения об авторах

Максим Сергеевич Озеров, к.т.н., научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет *E-mail:* ozerov@bsu.edu.ru ORCID: 0000-0002-2732-0579

Виталий Сергеевич Соколовский, к.т.н., научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет *E-mail:* sokolovskiy@bsu.edu.ru ORCID: 0000-0001-5607-2765

Елизавета Андреевна Поволяева, младший научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет

E-mail: povolyaeva@bsu.edu.ru *ORCID:* 0000-0002-9103-5182

Елена Ивановна Ноздрачева, младший научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет *E-mail:* nozdracheva@bsu.edu.ru ORCID: 0000-0001-9554-2651

Сергей Валерьевич Жеребцов, d.m.н., doцeнт, ведущий научный сотрудник лаборатории объемных наноструктурных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет

E-mail: zherebtsov@bsu.edu.ru *ORCID:* 0000-0002-1663-429X

Information about the authors:

Maxim S. Ozerov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Belgorod National Research University E-mail: ozerov@bsu.edu.ru ORCID: 0000-0002-2732-0579

Vitaly S. Sokolovsky, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Belgorod National Research University *E-mail:* sokolovskiy@bsu.edu.ru ORCID: 0000-0001-5607-2765

Elizaveta A. Povolyaeva, Junior Researche, Belgorod National Research University *E-mail:* povolyaeva@bsu.edu.ru *ORCID:* 0000-0002-9103-5182

Elena I. Nozdracheva, Junior Researcher, Belgorod National Research University *E-mail:* nozdracheva@bsu.edu.ru *ORCID:* 0000-0001-9554-2651

Sergey V. Zherebtsov, Dr. Sci. (Eng.), Assist Professor, Leading Researcher, Belgorod National Research University E-mail: zherebtsov@bsu.edu.ru ORCID: 0000-0002-1663-429X

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare that there is no conflict of interest.

> Поступила в редакцию 22.11.2022 После доработки 30.11.2022 Принята к публикации 02.12.2022

> > Received 22.11.2022 Revised 30.11.2022 Accepted 02.12.2022