

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ / MATERIAL SCIENCE



УДК 536.46:539.219

DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-57-61

Оригинальная статья
Original article

ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ Ni_3Al В РЕЗУЛЬТАТЕ СВС-ЭКСТРУЗИИ

К. О. Акимов[✉], К. В. Иванов, М. Г. Фигурко, В. Е. Овчаренко

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

[✉ akimov_ko@ispms.ru](mailto:akimov_ko@ispms.ru)

Аннотация. В рамках работы на примере микротвердости исследована возможность улучшения прочностных свойств интерметаллического соединения Ni_3Al путем уменьшения среднего размера его зерна. Исследуется влияние деформации реагирующей смеси при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) на размер зерна и микротвердость интерметаллического соединения Ni_3Al . СВС-экструзию проводили на экспериментальном стенде, позволяющем непрерывно контролировать параметры синтеза. Одним из ключевых факторов, влияющих на характеристики зеренной структуры и микротвердость, является степень деформации продукта синтеза. Увеличение диаметра экструзионного отверстия от 3 до 5 мм приводит к увеличению максимального линейного перемещения плунжера пресса вследствие более легкого выхода материала через отверстие большего диаметра. Предполагается, что при этом имеют место уменьшение сопротивления деформированию материала при приложении давления, увеличение степени деформации материала внутри пресс-формы и ее снижение в экструдированном материале. В результате средний размер зерна Ni_3Al , оставшегося в объеме пресс-формы после синтеза, уменьшается на 40 % (от 7 до 5 мкм), а прошедшего через экструзионное отверстие – возрастает в два раза (от 3 до 6 мкм). По сравнению с Ni_3Al , полученным методом СВС-компактирования, средний размер зерна экструдированного Ni_3Al меньше в 5,6 раза (17 и 3 мкм соответственно). Уменьшение среднего размера зерна экструдированного Ni_3Al приводит к увеличению микротвердости на 600 МПа. Полученные результаты позволяют разработать рекомендации по получению интерметаллидов и сплавов на их основе с мелким размером зерна и высокой микротвердостью.

Ключевые слова: структура, размер зерна, микротвердость, СВС-экструзия, деформация, улучшение свойств

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, тема № FWRW-2021-0004.

Для цитирования: Акимов К.О., Иванов К.В., Фигурко М.Г., Овчаренко В.Е. Формирование зеренной структуры и микротвердости интерметаллического соединения Ni_3Al в результате СВС-экструзии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(1): 57–61.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-57-61>

GRAIN STRUCTURE FORMATION AND MICROHARDNESS OF Ni_3Al INTERMETALLIC COMPOUND FABRICATED BY SHS EXTRUSION

К. О. Akimov[✉], K. V. Ivanov, M. G. Figurko, V. E. Ovcharenko

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

[✉ akimov_ko@ispms.ru](mailto:akimov_ko@ispms.ru)

Abstract. In this paper we studied the possibility to enhance the microhardness of Ni_3Al intermetallic compound by reducing the average grain size and the effect of the mixture deformation during self-propagating high-temperature synthesis (SHS) on the Ni_3Al grain size and microhardness. We used an SHS extrusion test bench to continuously monitor the synthesis variables. One of the key factors affecting the grain structure and microhardness is deformation rate of the synthesis product. Increasing the extrusion nozzle diameter from 3 to 5 mm results in a longer displacement of the press plunger since it takes less force to extrude the material through the larger diameter orifice. It is assumed that the resistance to deformation under pressure decreases, while the deformation rate increases for the material in the mold, and decreases for the extruded material. As a result, the average grain size of Ni_3Al remaining in the mold after synthesis decreases by 40 % (from 7 to 5 μm), while the grain size of the extruded material is doubled

(from 3 to 6 μm). Compared to Ni_3Al produced by SHS compaction, the average grain size of extruded Ni_3Al is 82 % less (17 and 3 μm , respectively). Reducing the average grain size of extruded Ni_3Al leads to a 600 MPa increase in microhardness. The results obtained may assist the development of guidelines for fine grain, high microhardness intermetallic/alloy manufacturing.

Keywords: structure, grain size, microhardness, SHS extrusion, deformation, material enhancement

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, project FWRW-2021-0004.

For citation: Akimov K.O., Ivanov K.V., Figurko M.G., Ovcharenko V.E. Grain structure formation and microhardness of Ni_3Al intermetallic compound fabricated by SHS extrusion. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023; 66(1): 57–61.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-57-61>

ВВЕДЕНИЕ

Интерметаллическое соединение Ni_3Al является основой современных суперсплавов на никелевой основе и определяет их высокие прочность при высоких температурах и сопротивление ползучести [1 – 4]. Несмотря на высокие механические свойства в интервале повышенных температур, практическое применение соединения Ni_3Al ограничено низкой пластичностью при комнатной температуре из-за склонности к хрупкому разрушению по границам зерен, значительно усложняющей его механическую обработку [5 – 8]. Увеличение пластичности соединения Ni_3Al с одновременным повышением его прочностных свойств может быть достигнуто легированием [9, 10] или измельчением зеренной структуры, например, методами интенсивной пластической деформации [11 – 14]. Однако интенсивной пластической деформации могут быть подвергнуты только образцы малого размера: диски толщиной примерно 0,5 мм и диаметром до 15 мм при кручении с одновременным приложением давления [15] или пластинки толщиной менее 30 мкм при многократной прокатке [16].

Измельчение зеренной структуры в массивных образцах Ni_3Al возможно в условиях деформации при температурах, близких к температуре плавления. Указанные условия достижимы на стадии кристаллизации заготовки в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с частичной экструзией (СВС-экструзии) [17, 18]. При объемной экзотермической реакции синтеза интерметаллида Ni_3Al из порошковой смеси никеля с алюминием протекание фазовых превращений происходит одновременно во всем объеме порошковой прессовки [19], а деформация реагирующей смеси позволяет целенаправленно влиять на величину среднего размера зерна синтезированного под давлением соединения Ni_3Al [20, 21].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния деформации реагирующей смеси в процессе СВС-экструзии на средний размер зерна и микротвердость соединения Ni_3Al .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

СВС-экструзию Ni_3Al проводили на экспериментальном стенде на основе гидравлического пресса,

оснащенного генератором высокой частоты для нагрева пресс-формы [22]. Использовали смесь порошка никеля (марки ПНК-1Л8, размер частиц 1 – 5 мкм) с алюминием (порошок марки АСД-4, размер частиц 1 – 4 мкм). Порошковую смесь помещали в стальную пресс-форму с внутренним диаметром 58 мм и диаметром экструзионного отверстия от 3 до 5 мм. Температуру системы (внутри стенки стальной пресс-формы) измеряли термпарой ТХА с точностью $\pm 7^\circ\text{C}$. Давление на прессовку рассчитывали с использованием данных о давлении в системе пресса и площади пуансона. Линейное перемещение плунжера пресса непрерывно измеряли датчиком Shahe 5403-200 с точностью $\pm 0,6$ мм.

Процесс высокотемпературного синтеза интерметаллического соединения Ni_3Al из порошковой смеси никеля и алюминия под давлением включает в себя ряд последовательных шагов: приложение предварительной нагрузки к порошковой смеси ($3\text{Ni} + \text{Al}$) в пресс-форме (115 МПа); нагрев порошковой прессовки до образования (Ni-Al)-эвтектики; плавление в порошковой прессовке алюминиевой компоненты; инициирование экзотермической реакции образования интерметаллического соединения Ni_3Al с одновременным нагружением продукта высокотемпературного синтеза до заданного давления; выдержку конечного продукта высокотемпературного синтеза при заданном давлении (430 МПа).

Ключевыми параметрами процесса высокотемпературного синтеза интерметаллического соединения под давлением, определяющими характеристики формирующейся зеренной структуры в синтезированном интерметаллиде, являются степень деформации реагирующей смеси в рабочем пространстве пресс-формы и время задержки приложения давления к термореагирующей порошковой смеси после инициирования реакции синтеза интерметаллида.

В работе были получены цилиндрические заготовки интерметаллического соединения Ni_3Al с вогнутыми торцами диаметром 58 мм и высотой в центральной части 16 мм в условиях высокотемпературного синтеза под давлением при различной величине степени деформации и частичной экструзии продукта синтеза из пресс-формы через отверстия диаметром 3, 4 и 5 мм при времени задержки приложения давления к продукту синтеза 1 с. Выбор времени задержки 1 с

обусловлен наиболее однородным распределением давлений в пресс-форме с экструзионными отверстиями различного диаметра. Увеличение диаметра отверстия для экструзии реагирующей смеси соответствует увеличению степени деформации смеси в рабочем пространстве пресс-формы. Материал, прошедший через экструзионное отверстие, имел форму стержня соответствующего диаметра длиной до 180 мм.

Образцы материала, оставшегося в пресс-форме, в виде пластинок толщиной 1 мм вырезали из центральных частей заготовок в вертикальном сечении, для исключения влияния краевых эффектов на структуру и свойства материала. В экструдированном материале образцы готовили в сечении, содержащем аксиальную ось. Для получения шлифов образцы механически шлифовали с применением алмазной пасты с постепенным уменьшением размера абразива до 1 мкм. Финишную полировку проводили на суспензии оксида алюминия с размером абразива 0,3 мкм на сукне. Зеренную структуру выявляли травлением ионами аргона при ускоряющем напряжении 0,6 кВ. Металлографические исследования проводили на микроскопе Carl Zeiss AXIOVERT-200MAT. Средний размер зерна измеряли методом случайных секущих по ГОСТ 5639 – 82 по 150 измерениям. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,98 Н и времени нагружения 15 с. За величину микротвердости принимали среднее арифметическое значение результатов измерения не менее 10 отпечатков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены зависимости перемещения плунжера пресса на стадии сжатия реагирующей смеси

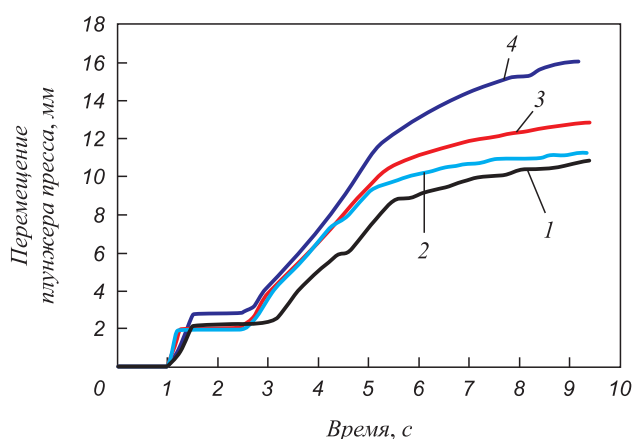


Рис. 1. Зависимости линейного перемещения плунжера пресса на стадии сжатия продукта синтеза в пресс-форме без экструзии (1) и с частичной экструзией продукта через отверстия диаметром 3, 4 и 5 мм (2 – 4) от времени

Fig. 1. Dependences of linear movement of press plunger during compression of the synthesis product in the mold without extrusion (1) and with partial extrusion of the product through the nozzles 3, 4 and 5 mm diameter (2 – 4)

от времени при СВС-экструзии через экструзионные отверстия диаметром 3, 4 и 5 мм.

С увеличением диаметра экструзионного отверстия максимальное линейное перемещение плунжера в пресс-форме увеличивается. Это указывает на уменьшение сопротивления деформированию материала при приложении давления. Предполагается, что при этом степень деформации продукта синтеза, остающегося во внутреннем объеме пресс-формы, увеличивается, а экструдированного материала – снижается.

На рис. 2 видно, что увеличение диаметра отверстия приводит к уменьшению среднего размера зерна Ni_3Al , оставшегося в объеме пресс-формы после синтеза, на 40 % (от $7 \pm 0,4$ до $5 \pm 0,3$ мкм). В экструдированном материале уменьшение диаметра экструзионного отверстия от 5 до 3 мм приводит к уменьшению среднего размера зерна в два раза (от $6 \pm 0,5$ до $3 \pm 0,3$ мкм). По сравнению с соединением Ni_3Al , полученным методом СВС-компактирования, наблюдается уменьшение среднего размера зерна в 5,6 раза (от $17 \pm 0,5$ до $3 \pm 0,3$ мкм). Таким образом, при СВС-экструзии имеет место уменьшение среднего размера зерна за счет увеличения степени деформации на этапе выхода материала из пресс-формы в экструзионный канал при уменьшении диаметра экструзионного отверстия.

Следует отметить, что характер зависимостей среднего размера зерна синтезированного Ni_3Al от диаметра экструзионного отверстия подтверждает сделанное выше предположение о том, что при увеличении диаметра экструзионного отверстия степень деформации продукта синтеза, остающегося во внутреннем объеме пресс-формы, увеличивается, а экструдированного материала – снижается.

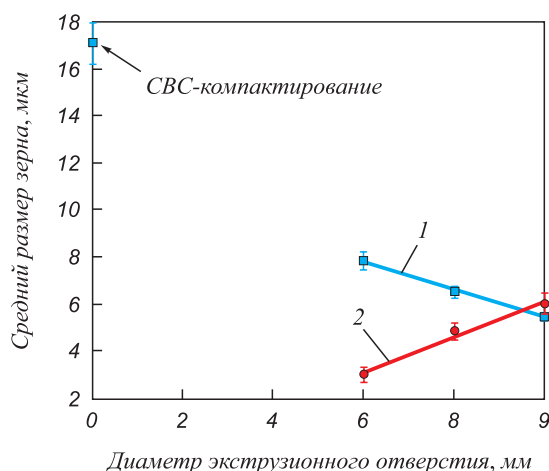


Рис. 2. Зависимость среднего размера зерна Ni_3Al , полученного методом СВС-экструзии, от диаметра экструзионного отверстия при времени задержки приложения давления 1 с: ■ – материал внутри пресс-формы; ● – экструдированный материал

Fig. 2. Dependence of the average grain size of Ni_3Al obtained by SHS extrusion on the extrusion nozzle diameter, 1 s pressure holding period: ■ – material inside the mold; ● – extruded material

На рис. 3 представлены зависимости микротвердости интерметаллида Ni_3Al , полученного методом СВС-экструзии. Видно, что изменение диаметра экструзионного отверстия, приводящее к уменьшению среднего размера зерна Ni_3Al , ведет к увеличению микротвердости интерметаллида на 16 и 20 % для материала, оставшегося внутри пресс-формы после синтеза, и экструдированного материала соответственно.

Представленные результаты согласуются с данными работы [23], в которой указано, что метод СВС-экструзии применим для получения длинномерных изделий из хрупких и труднодеформируемых тугоплавких материалов, одним из которых является интерметаллическое соединение Ni_3Al .

Выводы

Деформация продукта высокотемпературного синтеза в процессе СВС-экструзии оказывает существенное влияние на средний размер зерна и микротвердость интерметаллида Ni_3Al как остающегося в пресс-форме, так и экструдированного. Увеличение степени деформации материала внутри пресс-формы при увеличении диаметра экструзионного отверстия от 3 до 5 мм приводит к уменьшению среднего размера зерна на 30 % и увеличению микротвердости на 16 %. Для экструдированного материала при уменьшении диаметра экструзионного отверстия от 5 до 3 мм имеет место двукратное уменьшение среднего размера зерна и рост микротвердости на 20 % (600 МПа).

Полученные в работе закономерности могут быть использованы при разработке технологий производства интерметаллидов и сплавов на их основе с мелким размером зерна и высокой микротвердостью методом СВС-экструзии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Liu C.T., Sikka V.K. Nickel aluminides for structural use. *Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 1986; 38: 19–21. <https://doi.org/10.1007/BF03257837>
2. Taub A.I., Fleischer R.L. Intermetallic compounds for high-temperature structural use. *New Series*. 1989; 243(4891): 616–621. <https://doi.org/10.1126/science.243.4891.616>
3. Amrit R.P., Manidipto M., Dilpreet S. A critical review on the properties of intermetallic compounds and their application in the modern manufacturing. *Crystal Research and Technology*. 2022; 57(3): 2100159. <https://doi.org/10.1002/crat.202100159>
4. Tewari R., Sarkar N.K., Harish D., Vishwanadh B., Dey G.K., Banerjee S. Intermetallics and alloys for high temperature applications materials under extreme conditions. In: *Materials Under Extreme Conditions*. Tyagi A.K. ed. Amsterdam: Elsevier; 2017: 293–335. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801300-7.00009-7>
5. Stoloff N.S., Liu C.T., Deevi S.C. Emerging application of intermetallics. *Intermetallics*. 2008; 8(9-11): 1313–1320. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00077-7)

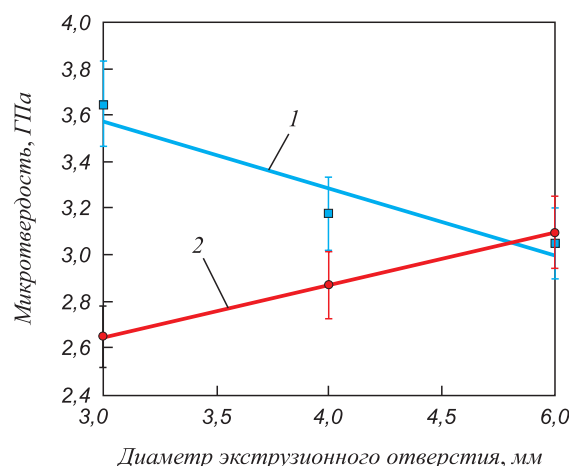


Рис. 3. Зависимости микротвердости интерметаллида Ni_3Al , полученного методом СВС-экструзии, оставшегося внутри пресс-формы после синтеза (●) и экструдированного (■)

Fig. 3. Dependences of microhardness of Ni_3Al intermetallic compound obtained by SHS-extrusion, remaining in the mold (●) and extruded (■)

6. Sikka V.K., Deevi S.C., Viswanathan S., Swindeman R.W., Santella M.L. Advances in processing of Ni_3Al -based intermetallics and applications. *Intermetallics*. 2000; 8(9-11): 1329–1337. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00078-9)
7. Pope D.P., Ezz S.S. Mechanical properties of Ni_3Al and nickel-base alloys with high volume fraction of γ' . *International Materials Reviews*. 1984; 29(1): 136–167. <https://doi.org/10.1179/imtr.1984.29.1.136>
8. Deevi S.C., Sikka V.K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing and applications. *Intermetallics*. 1996; 4(5): 357–375. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9)
9. Schulson E.M., Baker I., Frost H.J. The strength and ductility of intermetallic compounds: Grain size effects. *Materials Research Society Symposia Proceedings*. 1986; 81: 195–205. <https://doi.org/10.1557/PROC-81-195>
10. Polkowski W., Jóźwik P., Karczewski K., Bojar Z. Evolution of crystallographic texture and strain in a fine-grained Ni_3Al (Zr, B) intermetallic alloy during cold rolling. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2014; 14(4): 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.04.011>
11. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zechetbauer M.J., Zhu Y.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *JOM*. 2006; 58: 33–39. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0213-7>
12. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation. *Journal of Materials Research*. 2002; 17: 5–8. <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0002>
13. Jóźwik P., Bojar Z. Analysis of grain size effect on tensile properties of Ni_3Al -based intermetallic strips. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2007; 52(2): 321–327.
14. McFadden S., Mishra R., Valiev R., Zhilyaev A.P., Mukherjee A.K. Low-temperature superplasticity in nanostructured nickel and metal alloys. *Nature*. 1998; 398: 684–686. <https://doi.org/10.1038/19486>
15. Korznikov A.V., Idrisova S.R., Dimitrov O., Pyshmintsev I., Sirenko A.A., Korznikova G. Structure and mechanical pro-

- erties of the nanocrystalline intermetallic compound Ni₃Al. *The Physics of Metals and Metallography*. 1998; 85(5): 564–567.
16. Demura M., Kishida K., Suga Y., Takanashi M., Hirano T. Fabrication of thin Ni₃Al foils by cold rolling. *Scripta Materialia*. 2022; 47(4): 267–272. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00139-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00139-2)
 17. Lebrat J.P., Varma A. Self-propagating high-temperature synthesis of Ni₃Al. *Combustion Science and Technology*. 1992; 88(3-4): 211–221. <https://doi.org/10.1080/00102209308947237>
 18. Hibino A., Matsuoka S., Kiuchi M. Synthesis and sintering of Ni₃Al intermetallic compound by combustion synthesis process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001; 112(1): 127–135. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00558-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00558-1)
 19. Merzhanov A.G. History and recent developments in SHS. *Ceramics International*. 1995; 21(5): 371–379. [https://doi.org/10.1016/0272-8842\(95\)96211-7](https://doi.org/10.1016/0272-8842(95)96211-7)
 20. Ovcharenko V.E., Lapshin O.V., Ramazanov I.S. Formation of the granular structure in the intermetallic compound Ni₃Al in high-temperature synthesis under compression. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2006; 42(3): 302–308. <https://doi.org/10.1007/s10573-006-0055-1>
 21. Si J., Gao F., Han P., Zhang J. Simulation on extrusion process of TiAl alloy. *Intermetallics*. 2011; 19(2): 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.08.021>
 22. Ovcharenko V.E., Akimov K.O. Effect of deformation on the grain size of the Ni₃Al intermetallic compound synthesized under pressure. *Inorganic Materials*. 2020; 56(11): 1122–1126. <https://doi.org/10.1134/S0020168520110114>
 23. Stolin A.M., Bazhin P.M. Manufacture of multipurpose composite and ceramic materials in the combustion regime and high-temperature deformation (SHS Extrusion). *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2014; 48(6): 751–763. <https://doi.org/10.1134/S0040579514060104>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Кирилл Олегович Акимов, младший научный сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-3204-250X

E-mail: akimov_ko@ispms.ru

Константин Вениаминович Иванов, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-8003-271X

E-mail: ikv@ispms.ru

Марина Григорьевна Фигурко, инженер лаборатории физики консолидации порошковых материалов, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

E-mail: figurko.marina@mail.ru

Владимир Ефимович Овчаренко, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории композиционных материалов, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0003-1776-1212

Kirill O. Akimov, Junior Researcher of the Laboratory of Physics of Consolidation of Powder Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-3204-250X

E-mail: akimov_ko@ispms.ru

Konstantin V. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Laboratory of Physics of Consolidation of Powder Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-8003-271X

E-mail: ikv@ispms.ru

Marina G. Figurko, Engineer of the Laboratory of Physics of Consolidation of Powder Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: figurko.marina@mail.ru

Vladimir E. Ovcharenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Composite Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0003-1776-1212

Вклад авторов

Contribution of the Authors

К. О. Акимов – синтез образцов, проведение экспериментов, анализ полученных данных, написание статьи, подготовка графиков.

К. В. Иванов – проработка содержания разделов, обсуждение результатов, корректировка и написание статьи.

М. Г. Фигурко – подготовка образцов для экспериментов.

В. Е. Овчаренко – создание идеи статьи, выбор объекта и методики исследования.

K. O. Akimov – synthesis of the samples, experimentation, analysis of the obtained data, writing the text, preparation of graphs.

K. V. Ivanov – elaboration of the sections content, discussion of the results, correction and writing the text.

M. G. Figurko – preparation of the samples for experiments.

V. E. Ovcharenko – creation of the article idea, selection of the object and methodology of the research.

Поступила в редакцию 04.08.2022

После доработки 26.01.2023

Принята к публикации 27.01.2023

Received 04.08.2022

Revised 26.01.2023

Accepted 27.01.2023