

УДК 621.762:669.2

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.25

Л.И. Шевцова¹, М.А. Есиков^{1,2}, А.И. Гаврилов³

¹ Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

² Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского
отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского
отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО SPS-СПЕКАНИЕМ ПОРОШКОВ ПН85Ю15 И НИКЕЛЯ, ПОДГОТОВЛЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Исследована структура и оценены прочностные свойства компактированного материала на основе Ni_3Al , полученного электроискровым спеканием промышленного порошка марки ПН85Ю15 (основная фаза – Ni_3Al) и никеля в соотношении 7 : 3. Порошковые смеси были подготовлены различными способами: перемешиванием в планетарной шаровой мельнице в течение 6 ч; предварительным измельчением; добавлением бора; а также механической активацией исходных порошков в течение 3 мин. Установлено, что предварительное измельчение порошков в шаровых мельницах усиливает эффект заполнения никелем пор, образующихся при контакте интерметаллидных частиц, что способствует повышению плотности и прочности спеченного материала. Микролегирование бором также способствует повышению относительной плотности компакта до 97 %. Выявлено, что для формирования спеченного материала состава «70 % ПН85Ю15–30 % Ni» с наиболее высокими показателями прочностных характеристик целесообразно проведение предварительной трехминутной механоактивации. Предел прочности при изгибе такого материала составляет 2200 МПа, при растяжении – 1070 МПа.

Ключевые слова: алюминид никеля, бор, никель, электроискровое спекание, механическая активация, измельчение, микролегирование, структура, прочностные свойства.

L.I. Shevtsova¹, M.A. Esikov¹, A.I. Gavrillov³

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

² Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE MATERIAL OBTAINED BY SPS OF PN85YU15 AND NICKEL POWDERS PREPARED BY VARIOUS METHODS

The structure and strength properties of a composite material based on Ni_3Al obtained by electric spark sintering of industrial powder grade PN85Y15 (main phase – Ni_3Al) and nickel in a ratio of 7 to 3 were studied and evaluated. Powder mixtures were prepared in various ways: by mixing in a planetary ball mill for 6 hours, as well as by mechanical activation of the initial powders. Powder mixtures were prepared in various ways: by mixing in a planetary ball mill for 6 hours; by preliminary grinding; by adding boron; as well as by mechanical activation of the initial powders for 3 minutes. It has been established that the preliminary grinding of powders in ball mills enhances the effect of filling with nickel the pores formed by contact of intermetallic particles, which contributes to an increase in the density of the special material. Micro-alloying with boron also contributes to an increase in the relative density of the material up to 97 %. To form a compacted material of the composition "70 % PN85Y15 – 30 % Ni" with the highest strength characteristics, it is advisable to conduct a preliminary three-minute mechanical activation. The bending strength of such a material is 2200 MPa, the tensile strength – 1070 MPa.

Keywords: nickel aluminide, boron, nickel, spark spark sintering, mechanical activation, grinding, micro-alloying, structure, strength properties.

При изготовлении деталей, работающих в условиях воздействия высоких температур и агрессивных сред, используют материалы на основе интерметаллида Ni_3Al благодаря его высокому комплексу физико-механических свойств [1–3]. В настоящее время широкую известность для формирования интерметаллидов получил такой метод порошковой металлургии, как электроискровое спекание (SPS) [4–6]. Этот метод спекания имеет ряд преимуществ, например таких, как кратковременность процесса спекания и сохранение наноструктуры готового материала. Однако применение SPS не позволяет решить вопрос, связанный с повышением пластичности поликристаллического алюминида никеля при комнатной температуре [6–8].

Модифицирование порошковых смесей бором способствует снижению склонности к хрупкому разрушению материалов на основе Ni_3Al , полученных с использованием SPS-технологии [9, 10]. Положительное влияние бора на пластичность интерметаллида связывают с его сегрегацией на границах зерен. В ранее проведенном исследовании повышение плотности и пластичности получаемых интерметаллидных материалов было связано с введением в исходную порошковую смесь частиц никеля более мелкой фракции. Было определено количество вводимого никеля (30 масс. %), позволяющее получать компактированный материал с наиболее высоким комплексом свойств [11].

Другое техническое решение, представленное в данной работе и направленное на повышение плотности и улучшение механических свойств разрабатываемых материалов, заключалось в проведении предварительного механического измельчения порошка ПН85Ю15 в планетарной шаровой мельнице или проведении механической активации смеси заданного состава.

Цель работы – изучение влияния подготовки порошковых смесей, включающей в себя: перемешивание в планетарной шаровой мельнице; предварительное измельчение или механическую активацию; а также микролегирование бором, на структуру и свойства материала «алюминид никеля – никель», полученного электроискровым спеканием.

Методика проведения исследований

Объектом исследования являлась смесь порошков никеля марки ПНК УТ3 (99,85 %, 5 мкм) и промышленного порошка марки ПН85Ю15 (основное соединение Ni_3Al , 80 мкм). В качестве легирующего элемента был выбран бор аморфный марки В-99А. Для формирования компакта состава « $\text{Ni}_3\text{Al} - \text{Ni}$ » (7 : 3) методом SPS были подготовлены порошковые смеси четырех типов (табл. 1). Выбор соотношения компонентов был определен на основании ранее проведенных исследований [11]. Исследуемые порошковые смеси были подготовлены двумя способами: перемешиванием исходных компонентов в планетарной шаровой мельнице (ПШМ) и механической активацией (МА). Один из составов (М2) был микролегирован бором.

Таблица 1

Маркировка порошковых смесей состава «ПН85Ю15 – Ni» и способ их подготовки

Маркировка порошковой смеси	Состав порошковой смеси	Соотношение компонентов	Способ подготовки
М1	ПН85Ю15 + Ni	7 : 3	Перемешивание в течение 6 ч в ПШМ
М2	ПН85Ю15 + (2,95Ni + + 0,05B)		
М3	ПН85Ю15 + Ni		Измельчение ПН85Ю15 (в течение 20 ч в ПШМ) и перемешивание 6 ч в ПМШ
М4			

Перемешивание порошковых смесей М1 и М2 выполняли с использованием планетарной шаровой мельницы «Fritsch Pulverisette 6». Перемешивание осуществляли стальными шарами в стальном стакане объёмом 250 мл. Соотношение масс шаров и порошковой смеси было равным 5 : 1. В качестве рабочей среды был выбран этиловый спирт. Наилучшая однородность порошковых смесей была достигнута в процессе перемешивания компонентов в течение 6 ч с частотой вращения опорного диска 100 об/мин, смеси сушили с использованием вакуумного шкафа в течение 8 ч при температуре 70 °С.

Для получения мелкозернистой структуры спечённого компакта «алюминид никеля – никель» исходный порошок ПН85Ю15 измельчали в ПМШ «Fritsch Pulverisette 6» по следующему режиму: время измельчения составляло 20 ч, частота вращения опорного диска – 300 об/мин. Для получения 30 г готовой порошковой смеси в ёмкость добавляли 10 мл этилового спирта. Полученный таким образом измельчённый порошок в течение 6 ч перемешивали в ПШМ с никелем (М3).

Механическую активацию порошковых смесей осуществляли в двух стальных барабанах мельницы. Объём каждого барабана составил 160 см³, масса шаров в каждом барабане – 200 г, диаметр мелющих шаров – 8 мм. В каждый барабан устройства засыпали по 10 г порошковой смеси. Центробежное ускорение шаров достигало 400 м·с⁻². В результате проведённых экспериментов [6] было определено оптимальное время (3 мин), которое обеспечивает формирование монофазного интерметаллида Ni₃Al.

Компактирование полученных порошковых смесей выполняли на установке Labox-1575 (Sinter Land Inc, Япония). Порошковую смесь засыпали в токопроводящую графитовую пресс-форму с внутренним диаметром 30 мм, которую затем помещали в вакуумную камеру установки (10⁻² Па). Для улучшения электрического контакта подвижных частей пресс-формы (пуансонов и матрицы) внутрь пресс-формы помещали графитовую обечайку.

Режимы спекания были выбраны на основании ранее проведенных исследований [11]. Спекание материалов осуществляли при температуре равной 1100 °С. Средняя скорость нагрева была равной 100 °С/мин. Давление прессования во всех сериях экспериментов оставалось неизменным и составляло 40 МПа. Время выдержки под давлением при температуре спекания составляло 5 мин. Плотность материалов рассчитывали методом гидростатического взвешивания.

Металлографические исследования спеченных материалов были выполнены с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50XVP. Определение фазового состава исследуемых материалов проводили на рентгеновском θ - θ дифрактометре ARL X'TRA, источником излучения в котором являлась медная рентгеновская трубка. Дифракционные картины регистрировали с шагом $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$ и временем накопления $t = 10$ с на одну точку.

Образцы для оценки прочностных свойств вырезали из спечённых заготовок на установке электроэрозионной резки Sodick AG400L. Для проведения испытаний на трёхточечный изгиб использовали образцы прямоугольной формы (3 × 4 × 30 мм³), на растяжение – образцы гантелеобразной формы. Скорость перемещения траверсы при деформации образцов при комнатной температуре на универсальном испытательном комплексе типа Instron 3369 составляла 0,5 мм/мин.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, а, б в качестве примера изображены частицы смеси порошков ПН85Ю15 и никеля в соотношении 7 : 3 после равномерного перемешивания компонентов в течение 6 ч в ПШМ (М1). Из рис. 1, б видно, что во время перемешивания частицы никеля деформируются и частично налипают на крупные частицы порошка алюминида никеля. При этом сферические частицы алюминида никеля марки ПН85Ю15 свою первоначальную форму существенно не изменили. Смесь М2 отличается от М1 добавлением малого количества бора.

Микрофотографии порошка ПН85Ю15, обработанного в ПМШ в течение 20 ч, представлены на рис. 1, в. В процессе обработки частицы алюминида никеля пластически деформировались и изменили свою первоначальную округлую форму. После измельчения в течение этого

времени размер частиц порошка составил 1...20 мкм. Измельченный алюминид никеля далее смешивали с порошком никеля в соотношении 7 : 3 для формирования смеси М3. На рис. 1, *а* показаны конгломераты из механокомпозитов пластинчатой формы, полученных из порошковой смеси состава «ПН85Ю15+Ni» после трёх минут механической активации (М4). Размер конгломератов из сформированных механокомпозитов составил 50...200 мкм.

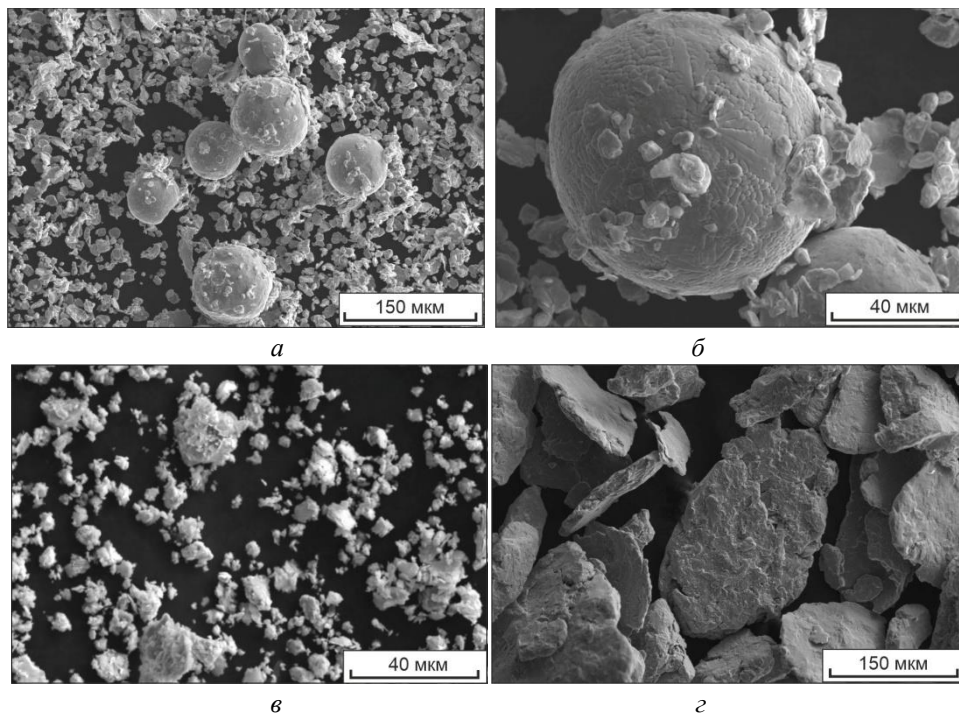


Рис. 1. Морфология порошковой смеси «ПН85Ю15 – Ni» (7 : 3) после 6 ч перемешивания в ПШМ (*а*, *б*); морфология порошка ПН85Ю15, измельченного в течение 20 ч в ПШМ (*в*); конгломераты состава «ПН85Ю15 – Ni» (7 : 3) после 3 мин механоактивации (*г*)

Результаты структурных исследований материалов, полученных спеканием порошковых смесей состава «ПН85Ю15 – Ni» (7 : 3) с исходным порошком ПН85Ю15 (смесь М1) и предварительно измельчённым в течение 20 ч (М3), представлены на рис. 2 *а*, *б* и *д*, *е*. При спекании порошковых смесей всех составов в структуре спечённого образца между частицами порошка алюминида никеля образуется механическая смесь ($\gamma' + \gamma$), состоящая из частиц Ni_3Al (γ' -фаза) и твёрдого раствора алюминия в никеле (γ -фаза) [11]. На рис. 2, *г* отчетливо видны частицы Ni_3Al кубовидной формы размером 0,5–2 мкм. В структуре компактов присутствуют лишь микропоры, что подтверждается высоким уровнем плотности спеченных материалов (табл. 2).

Микролегирование бором (смесь М2) приводит к повышению реакционной способности в процессе спекания порошковой смеси, что способствует повышению плотности спеченного материала до 7,71 г/см³. Полученное значение плотности составляет 97 % от расчетной плотности композита данного состава.

Пластичный никель позволяет заполнить поры, образующиеся при контакте интерметаллидных частиц, что способствует повышению плотности спеченного материала. Предварительное измельчение порошков в шаровых мельницах усиливает этот эффект. Так, относительная плотность композита «70 % ПН85Ю15 – 30 % Ni», полученного методом SPS с предварительной трёхминутной механической активацией компонентов, составляет 96,6 %, а без неё – 91,8 %.

При анализе рентгенограмм образцов, полученных SPS-спеканием порошковых смесей всех типов, были зафиксированы пики интерметаллида Ni_3Al и никеля. Однако относительная интенсивность пиков никеля на рентгенограмме композита, полученного спеканием меха-

нически активированной порошковой смеси ПН85Ю15 и никеля (М4), меньше интенсивности пиков никеля в композите, сформированном спеканием смесей «1» и «2». Это можно объяснить тем, что порошок марки ПН85Ю15 изначально является не монофазным интерметаллидом, а следовательно, при электроискровом спекании часть никеля была израсходована на образование соединения Ni_3Al .

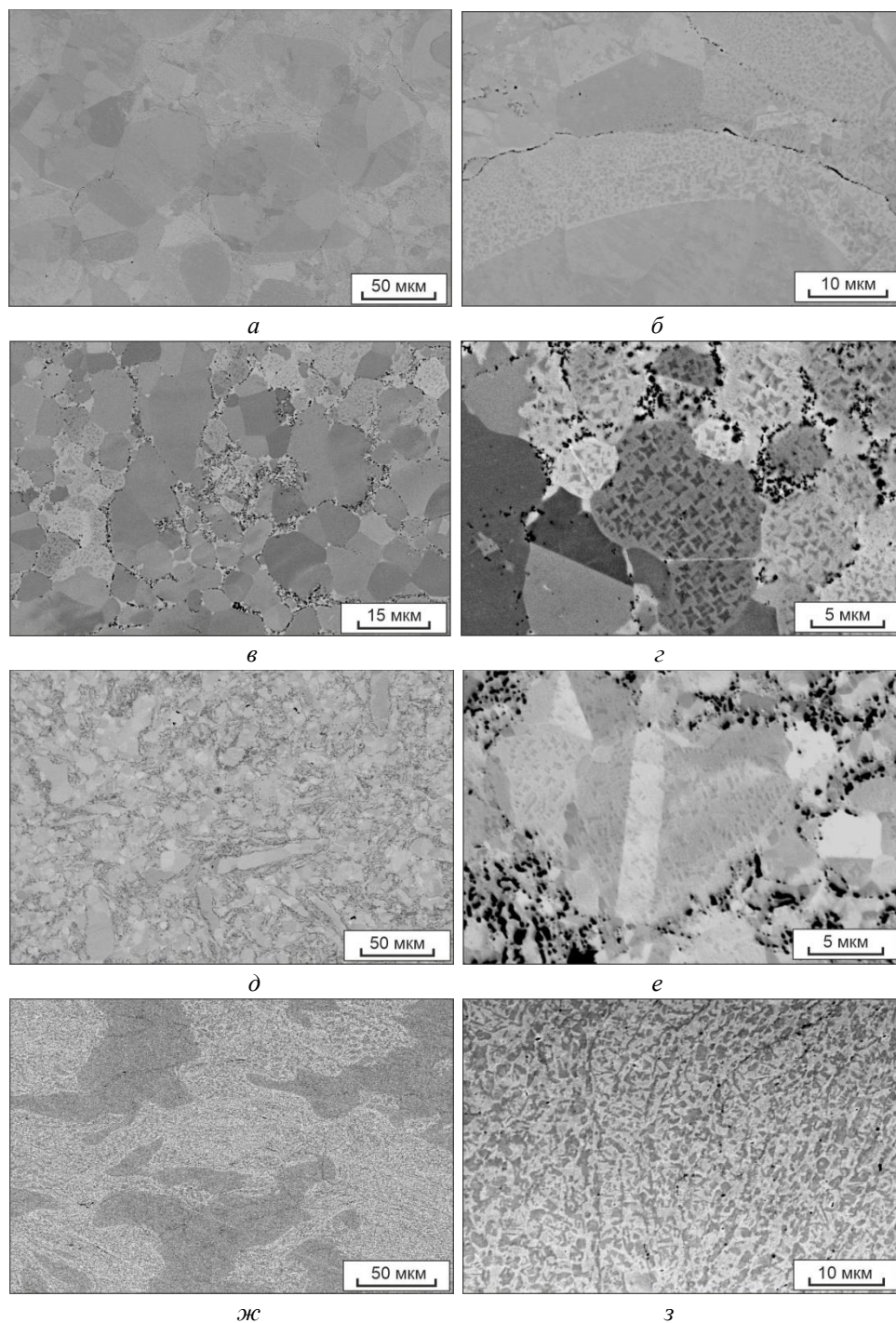


Рис. 2. Структура компактированного материала, сформированного в результате SPS порошковой смеси «ПН85Ю15 – Ni» (7 : 3):
М1 (а, б); М2 (в, г); М3 (д, е) и М4 (ж, з)

Таблица 2

Плотность и относительная плотность спеченных материалов состава
«ПН85Ю15 – Ni» в соотношении 7 : 3

Нумерация порошковой смеси	Состав порошковой смеси	Плотность, г/см ³	Относительная плотность, %
М1	ПН85Ю15 + Ni	7,27	91,8
М2	ПН85Ю15 + Ni+B	7,71	97,3
М3	ПН85Ю15 _{изм} + Ni	7,55	95,3
М4	ПН85Ю15 + Ni (3 мин МА)	7,65	96,6

Экспериментально установлено, что размер, форма и характер упрочненного состояния частиц порошка алюминид никеля оказывают значительное влияние на комплекс свойств материалов, полученных в процессе SPS-спекания. Предварительное измельчение порошка ПН85Ю15 в планетарной шаровой мельнице в течение 20 ч способствует повышению относительной плотности спеченного композита «70 % ПН85Ю15 – 30 % Ni» до ~ 96 %, а также обеспечивает высокие значения предела прочности при изгибе (1590 МПа) и растяжении (1060 МПа) образцов. Зафиксированное значение предела прочности при растяжении почти в 3 раза выше уровня предела прочности механически не измельченного порошка ПН85Ю15 без добавок никеля, спеченного в одинаковых условиях.

На основании анализа результатов, полученных при определении прочностных свойств компактированных материалов «алюминид никеля – никель», был сделан вывод о том, что из синтезированных материалов максимальными свойствами обладает композиционный материал, сформированный в результате трехминутной механической активации порошков ПН85Ю15 и никеля в соотношении 7 : 3 и последующего спекания (SPS) при 1100 °С. Предел прочности при растяжении данного материала почти в два раза превышает значение прочности материала, полученного без МА.

Таблица 3

Прочностные свойства спеченных материалов «ПН85Ю15 – Ni»
в соотношении 7 : 3, подготовленных различными способами

Нумерация порошковой смеси	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа
М1	590 ± 20	1900 ± 20
М2	700 ± 20	1520 ± 50
М3	1060 ± 40	1590 ± 30
М4	1070 ± 110	2200 ± 50

Выводы

В результате спекания методом SPS сформированы материалы состава «70 % алюминид никеля – 30 % никель» из порошков алюминид никеля марки ПН85Ю15 и никеля. Предварительное измельчение порошков в шаровых мельницах усиливает эффект заполнения пор никелем, образующимся при контакте интерметаллидных частиц, что способствует повышению плотности.

Введение в порошковую смесь «алюминид никеля – никель» малых добавок бора благоприятно сказывается на относительной плотности спеченного материала (97 %).

Максимальный уровень предела прочности при изгибе (2200 МПа) и растяжении (1070 МПа) достигнут при спекании методом SPS порошковой смеси состава «70 % ПН85Ю15 – 30 % Ni» с предварительной механической активацией в течение 3 мин.

Библиографический список

1. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля. / Н.А. Ночовная, О.А. Базылева, Д.Е. Каблов. и др. М.: ВИАМ, 2018. 303 с.
2. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni_3Al based intermetallic alloys – current stage and potential perceptivities // Materials. – 2015. – Vol. 8. – P. 2537–2568.
3. A review on sintered nickel based alloys / I.M. Makena, M.B. Shongwe, M.M. Ramakokovhu [et al] // WCE-2017, Proceedings of the World Congress on Eng. – 2017. – P. 922–927.
4. Olevsky E.A., Dudina D.V. Field-assisted sintering: science and applications. – Cham: Springer, 2018. – 425 p.
5. The influence of TiC particles on the structure and mechanical properties of Ni_3Al manufactured by spark plasma sintering / D.A. Osipov, I.V. Smirnov, K.V. Grinyaev [et al]. // Rus. Phys. J. – 2021. – Vol. 63, No.9. – P. 1583–1589.
6. Структура и свойства интерметаллида Ni_3Al , сформированного в результате SPS-спекания порошковых смесей, подготовленных различными способами / Л.И. Шевцова, М.А. Корчагин, М.А. Есиков и др. // Металлург. – 2021. – №11. – С. 56–61.
7. Spark Plasma Sintering of nanoscale (Ni+Al) powder mixture / J.S. Kim, H.S. Choi, D.V. Dudina et. al. // Solid State Phenom. – 2007. – Vol. 119. – P. 35–38.
8. Meng J., Jia C., He Q. Effect of mechanical alloying on structure and property of Ni_3Al by spark plasma sintering // Powder Metall. – 2008. – Vol. 51. – P. 227–230.
9. Ni_3Al+B material obtained by mechanical activation followed by spark plasma sintering / L.I. Shevtsova, M.A. Korchagin, M.A. Esikov [et al] // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 12. No. 1. – P. 120–123.
10. Microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered nanocrystalline Ni_3Al-xB ($0.0 < x < 1.5$ at%) alloy / A. Mohammadnejad, A. Bahrami, M. Sajadi [et al] // Materials Today Communications. – 2018. – Vol. 17. – P. 161–168.
11. Microstructure and mechanical properties of materials obtained by spark plasma sintering of Ni_3Al-Ni powder mixtures / L.I. Shevtsova, V.I. Mali, A.A. Bataev [et al] // Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. 773. – Art. 138882.

References

1. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E. [et al]. *Intermetallidnye splavi na osnove titana i nikelya* [Intermetallic alloys based on titanium and nickel]. Moscow: VIAM, 2018. 303 p.
2. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. *Applications of Ni_3Al based intermetallic alloys – current stage and potential perceptivities* // Materials. 2015. Vol. 8. pp. 2537–2568.
3. Makena I.M., Shongwe M.B., Ramakokovhu M.M. [et al] *A review on sintered nickel based alloys* // WCE-2017, Proceedings of the World Congress on Eng., 2017. pp. 922–927.
4. Olevsky E.A., Dudina D.V. *Field-assisted sintering: science and applications*. Cham: Springer, 2018. 425 p.
5. Osipov D.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V. [et al] *The influence of TiC particles on the structure and mechanical properties of Ni_3Al manufactured by spark plasma sintering* // Rus. Phys. J. 2021. Vol. 63. No.9. pp. 1583–1589.
6. Shevtsova L.I., Korchagin M.A., Esikov M.A. [et al] *Structure and properties of an Ni_3Al intermetallic compound formed as a result of spark plasma sintering of the powder mixtures prepared by various methods* // Metallurgist, 2022. Vol. 65, No. 11–12. pp. 1273–1280.
7. Kim J.S., Choi H.S., Dudina D.V. [et al] *Spark Plasma Sintering of nanoscale (Ni+Al) powder mixture* // Solid State Phenom, 2007. Vol. 119. pp. 35–38.
8. Meng J., Jia C., He Q. *Effect of mechanical alloying on structure and property of Ni_3Al by spark plasma sintering* // Powder Metall. 2008. Vol. 51. pp. 227–230.
9. Shevtsova L.I., Korchagin M.A., Esikov M.A. [et al] *Ni_3Al+B material obtained by mechanical activation followed by spark plasma sintering* // Materials Today: Proceedings, 2019. Vol. 12. No. 1. pp. 120–123.
10. Mohammadnejad A., Bahrami A., Sajadi M. [et al] *Microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered nanocrystalline Ni_3Al-xB ($0.0 < x < 1.5$ at%) alloy* // Materials Today Communications. 2018. Vol.17. pp. 161–168.

11. Shevtsova L.I., Mali V.I., Bataev A.A. [et al] *Microstructure and mechanical properties of materials obtained by spark plasma sintering of Ni₃Al–Ni powder mixtures* // Materials Science and Engineering A. 2020. Vol.773. Art. 138882.

Об авторах

Шевцова Лилия Ивановна (Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение в машиностроении», Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, 630073, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: edeliya2010@mail.ru).

Есиков Максим Александрович (Новосибирск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Газодинамические импульсные устройства», Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, 630073, пр. Карла Маркса, 20); младший научный сотрудник лаборатории «Синтез композиционных материалов», Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 15, e-mail: esikov@hydro.nsc.ru).

Гаврилов Александр Иванович (Новосибирск, Россия) – ведущий инженер лаборатории «Химическое материаловедение», Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (Новосибирск, 630090, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: gavr_sand@mail.ru).

About the authors

Lilia I. Shevtsova (Novosibirsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Materials Science in Mechanical Engineering”, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks av., 630073, Novosibirsk, e-mail: edeliya2010@mail.ru).

Maxim A. Esikov (Novosibirsk, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department “Gas-dynamic pulse devices”, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks av., 630073, Novosibirsk); Junior Researcher of the Laboratory “Synthesis of Composite Materials”, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS (15, Lavrentyev av., 630090, Novosibirsk, e-mail: esikov@hydro.nsc.ru).

Alexander I. Gavrilo (Novosibirsk, Russian Federation) – Leading Engineer, Laboratory “Chemical Materials Science”, Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS (18, Kutateladze str., 630090, Novosibirsk, e-mail: gavr_sand@mail.ru).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-79-00154 (<https://rscf.ru/project/21-79-00154/>). Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой №13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 11.10.2022

Одобрена: 30.11.2022

Принята к публикации: 05.12.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Шевцова, Л.И. Исследование материала, полученного SPS-спеканием порошков ПН85Ю15 и никеля, подготовленных различными способами / Л.И. Шевцова, М.А. Есиков, А.И. Гаврилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 230–237. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.25

Please cite this article in English as: Shevtsova L.I., Esikov M.A., Gavrilo A.I. Investigation of the material obtained by SPS OF PN85Yu15 and nickel powders prepared by various methods. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2022, no. 71, pp. 230–237. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.25