

Хлыбов А.А., Мальцев И.М., Беляев Е.С., Гетмановский Ю.А., Беляева С.С. Исследование свойств металлостеклянного материала на основе порошка карбонильного железа ВК-1 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 82–89. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.11

Khlybov A.A., Maltcev I.M., Belyaev E.S., Getmanovskiy Y.A., Belyaeva S.S. Investigation of properties of metal-glass material based on carbonyl iron powder VK-1. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 82–89. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.11

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.11

УДК 621.762

А.А. Хлыбов, И.М. Мальцев, Е.С. Беляев, Ю.А. Гетмановский, С.С. Беляева

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
Нижегород, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ПОРОШКА КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА ВК-1**

Актуальность представленной работы обусловлена исследованием материалов с заданными свойствами. Это позволяет повысить эксплуатационные характеристики узлов механизмов. Рассмотрены процессы структурообразования в металлостеклянных материалах, получаемых методом порошковой металлургии. Для этого авторы применяют методику получения композиционного материала на основе порошка карбонильного железа ВК-1 и стекла. Рассмотрено получение стеклянного порошка путем размола, смешивания с порошком железа и последующего прессования полученного порошка при помощи гидравлического пресса и спекания в защитной атмосфере. В качестве стеклянного наполнителя представлен бой тарного стекла марки БТ-1. Рассмотрена методика и этапы получения металлостеклянных материалов. Дано обоснование выбора матрицы (порошок карбонильного железа) и армирующего компонента (порошок боя тарного стекла). Устанавливается связь между составом и структурой полученных композиционных материалов и их свойствами. В ходе исследования варьировались такие параметры, как концентрация стеклянного порошка и температура спекания. В качестве изучаемых свойств выступали твердость и пористость после спекания. Математическое моделирование и обработка полученных результатов выполнены при помощи программного комплекса STATISTIKA 10. Проведен микроструктурный анализ полученных образцов при помощи цифрового оптического микроскопа KEYENCE-VHX. Сформулированы основные выводы о причинах полученных зависимостей. Практическая значимость состоит в получении новых материалов с повышенными антифрикционными свойствами. Показано, что с повышением температуры спекания до 1100 °С наблюдается повышение твердости, снижение пористости и образование новой фазы фаялит (FeSiO₄).

Ключевые слова: порошковая металлургия, антифрикционные материалы, композитные материалы, формование, спекание, твердость, пористость, металлостеклянные материалы, математическое моделирование, микроструктура, фаялит, износостойкость.

A.A. Khlybov, I.M. Maltcev, E.S. Belyaev, Y.A. Getmanovskiy, S.S. Belyaeva

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

**INVESTIGATION OF PROPERTIES OF METAL-GLASS MATERIAL
BASED ON CARBONYL IRON POWDER VK-1**

The relevance of the presented work is due to the study of materials with desired properties. This makes it possible to increase the operational characteristics of the units of mechanisms. In this paper, the processes of structure formation in metal-glass materials obtained by powder metallurgy are considered. For this, the authors use the method of obtaining a composite material based on carbonyl iron powder VK-1 and glass. The paper considers the production of glass powder by grinding, mixing with iron powder and subsequent pressing of the resulting powder using a hydraulic press and sintering in a protective atmosphere. Broken container glass of BT-1 brand is presented as a glass filler. The article describes the technique and stages of obtaining metal-glass materials. Substantiations are given for the choice of the matrix (carbonyl iron powder) and the reinforcing component (broken glass powder). The work establishes a connection between the composition and structure of the obtained composite materials and their properties. During the study, parameters such as the concentration of the glass powder and the sintering temperature were varied. The properties under study were hardness and porosity after sintering. Mathematical modeling and processing of the results obtained were performed using the STATISTIKA 10 software package. Microstructural analysis of the obtained samples was carried out using a KEYENCE-VHX digital optical microscope. The main conclusions about the reasons for the obtained dependences are formulated. The practical significance lies in obtaining new materials with enhanced antifriction properties. It is shown that with an increase in the sintering temperature, up to 1100 °C, an increase in hardness, a decrease in porosity and the formation of a new phase of fayalite (FeSiO₄) are observed.

Keywords: powder metallurgy, antifriction materials, composite materials, molding, sintering, hardness, porosity, metal-glass materials, mathematical modeling, microstructure, fayalite, wear resistance.

В случае сохранения конструкционной прочности на протяжении всего времени эксплуатации все механизмы, узлы и детали машин подвергаются разрушению под действием износа. Износостойкие материалы обычно получают методами порошковой металлургии [1]. Разработка и получение материалов с повышенной износостойкостью – одна из актуальных задач материаловедения [2–4].

Критериями оценки износостойкости являются коэффициент трения, твердость и другие механические свойства [5]. При этом износостойкие материалы должны обладать такими противоречивыми свойствами, как высокая твердость и пластичность [6]. Такого эффекта можно добиться, используя композиционные материалы, которые проектируются по принципам аддитивности [7, 8]. Все подобные материалы являются грубо гетерогенными, т.е. объединяют в себе химические элементы, обладающие разными свойствами (температура плавления) [9]. Представителем таких износостойких материалов являются металлостеклянные материалы (МСМ) [10].

При правильном выборе состава металлической составляющей и материала сопряженной детали МСМ могут обладать высокой износостойкостью, так как в этом случае можно легко выполнить основное правило создания износостойкого материала – сочетание мягкой металлической матрицы с твердыми стеклянными включениями [11].

В качестве объекта исследований был использован металлостеклянный материал. Исследовалось влияние температуры спекания и содержания стеклянной фазы на твердость и пористость полученного композиционного материала. Оба этих параметра влияют на эксплуатационные характеристики проектируемых изделий, с ростом твердости и снижением пористости возрастают эксплуатационные свойства [12, 13].

В качестве металлической основы был выбран порошок карбонильного железа ВК-1 (ТУ 2436-005-74439740–14). Выбор такой матрицы обусловлен тем, что железо является наиболее широко применяемый металлом, следовательно, созданный на его основе композит может иметь широкое применение [14, 15]. Микроструктура частиц порошка ВК-1 представлена на рис. 1. Фракция порошка карбонильного железа составляет 5–8 мкм.

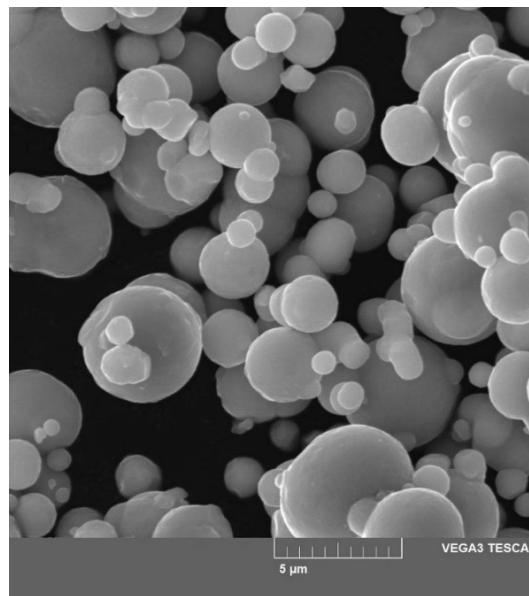


Рис. 1. Микроструктура частиц порошка ВК-1

В качестве стеклянного наполнителя был использован порошок тарного стекла БТ-1 (ГОСТ Р 52022–2003), полученный в результате размол в шаровой мельнице. Химический состав стеклянного порошка представлен в табл. 1.

После размол частицы полученного порошка разделялись по фракциям, фракции порошка –200...+50 были получены с помощью сит по ГОСТ 3584–73. Дальнейший ситовой анализ был невозможен в связи с тем, что у порошков фракции –50 большая склонность к коагуляции и его рассев не возможен [16]. Фракция –50...+10 была разделена при помощи седиментационного анализа [17].

В результате деления были получены следующие фракции: –200...+160, –160...+100, –100...+63, –63...+50, –50...+40, –40...+30 мкм.

При изучении ряда работ [18–20] был сделан вывод, что фазы стекла больше 100 мкм плохо поддаются формованию. При изучении полученных фракций с помощью электронного микроскопа был сделан вывод, что оптимальной является фракция –63...+50 мкм, так как она является наиболее мелкой, содержащей в своем составе мало частиц других фракций. Фотография микроструктуры частиц порошка приведена на рис. 2.

Таблица 1

Химический состав стеклянного порошка

Группа стекла	Марка стекла	Содержание оксидов, мас. %				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	CaO + MgO	Na ₂ O ₃	Sp ₃
Бесцветное	БТ-1	72	2,5	11	14	0,5

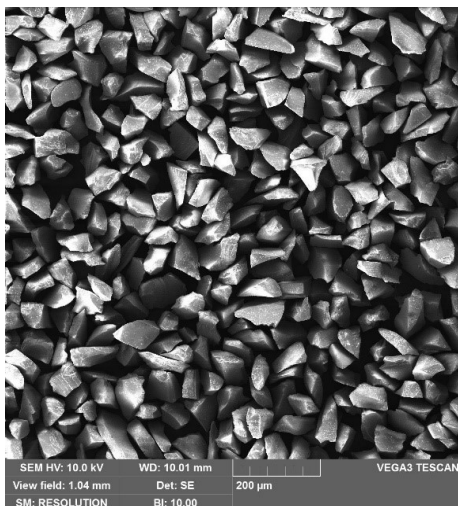


Рис. 2. Микроструктура порошка стекла (–60...+53 мкм)

В исследовании использовался полный факторный эксперимент по плану 2^2 [21, 22]. При разработке матрицы планирования учитывались факторы, влияющие на процесс структурообразования, такие как содержание легирующего элемента (порошок стекла) и температура спекания композиционного материала. В табл. 2 представлены уровни факторов и интервалы их варьирования при исследовании композиционного материала.

Методика изготовления композиционного материала включала в себя следующие этапы:

1. Смешивание исходной шихты.
2. Формование при помощи гидравлического прессы с усилием прессования 40 МПа и удельным давлением 7,56 кН/см².
3. Спекание полученных прессовок при заданных значениях температуры в защитной атмосфере CO₂.

Параметры состава, формования и спекания были выбраны на основе работ [23–25].

Матрица планирования эксперимента, твердость и пористость приведены в табл. 3. Определение твердости проводилось при помощи твердомера Роквелла, определение пористости производилось методом гидростатического взвешивания на весах ВЛА-200М.

После проведения эксперимента с помощью программного пакета STATISTIKA 10 были получены уравнения регрессии:

– для параметра HRB

$$y_1 = 41,6 + 8,3x_1 - 4,7x_2 - 5,3x_1x_2,$$

где y_1 – параметр оптимизации «твердость»; x_1 – варьируемый фактор «температура»; x_2 – варьируемый фактор «содержание стекла»;

– для параметра «пористость»:

$$y_2 = 17,4 - 2,33x_1,$$

где y_2 – параметр оптимизации «пористость»; x_1 – варьируемый фактор «температура».

Таблица 2

Исходные данные для матрицы планирования

Исходные данные	Кодированное значение факторов x_i	Натуральные значения факторов	
		Температура спекания, °C	Содержание стекла, об. %
		$x_{1 \text{ нат}}$	$x_{2 \text{ нат}}$
Основной уровень x_{i0}	0	1000	2
Интервал изменения Δx_i	–	100	1
Верхний уровень $x_{i0} + \Delta x_i$	+1	1100	1
Нижний уровень $x_{i0} - \Delta x_i$	–1	900	3

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта i	Значения факторов				Параметры оптимизации	
	x_1		x_2		y_1	y_2
	код.	нат., %	код.	нат., %	Твердость, HRB	Пористость, %
Опыты на верхнем и нижнем уровнях						
1	+1	1100	+1	3	41	15
2	+1	1100	–1	1	61	15,5
3	–1	900	+1	3	34,0	20
4	–1	900	–1	1	33,5	20
Параллельные опыты на основном уровне						
5–1	0	1000	0	2	39	16,5
6–2	0	1000	0	2	42	17,0
7–3	0	1000	0	2	40	17,5

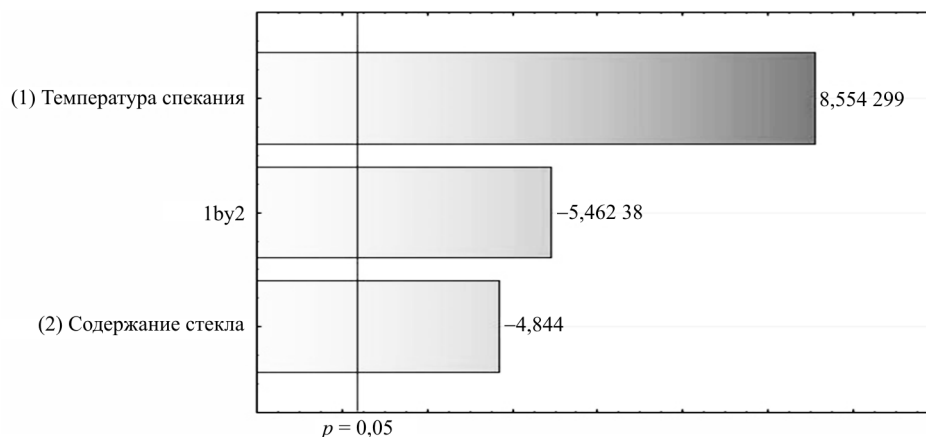


Рис. 3. Диаграмма Парето для твердости

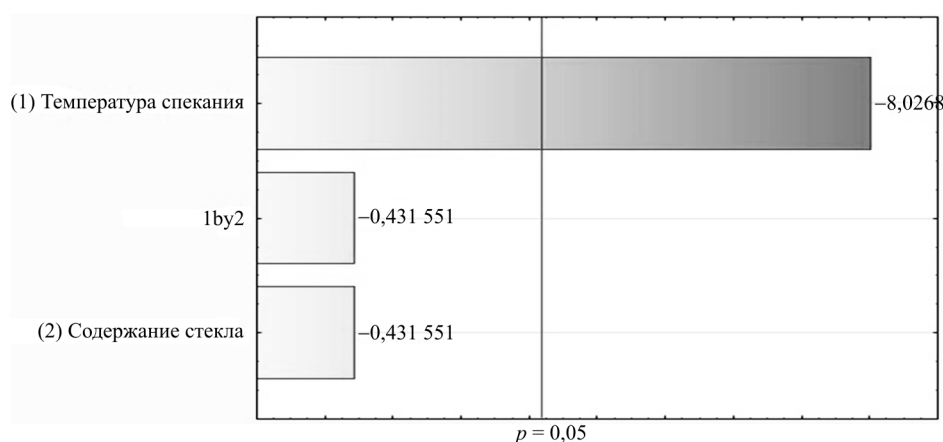


Рис. 4. Диаграмма Парето для пористости

В представленных уравнениях факторы даны в кодовом масштабе, формула перехода от кодированных величин к натуральным:

$$x_1 = \frac{X - 2}{1};$$

$$x_2 = \frac{X - 1000}{100},$$

где X – натуральное значение фактора согласно табл. 3.

Для полученных уравнений регрессий были построены диаграммы Парето, позволяющие визуализировать зависимость параметров оптимизации от варьируемых факторов (рис. 3, 4) [26]. На их основании можно сказать, что твердость полученного композита в большей степени зависит от температуры спекания, чем от концентрации стекла. Кроме того, стекло снижает твердость композита. Это объясняется тем, что с увеличением температуры спекания происходит процесс ситаллизации, в результате чего образуется твердая связка – фаялит. Снижение твердости с увеличением концентрации стеклян-

ного наполнителя можно объяснить тем, что наравне с фаялитом (Fe_2SiO_4) начинает образовываться фаза SiO , составляющая до 30 % от общего объема композита и имеющая более низкую твердость.

Как видно из уравнений регрессии для пористости, статистически значимым является только влияние температуры. С уменьшением температуры пористость возрастает. Это связано с тем, что при повышении температуры происходит более полное заполнение микропор твердой фазой, одновременно с этим освобождается межчастичное пространство, которое было заполнено частицами стекла.

Микроструктура образцов после спекания представлена на рис. 5–9 (микроскоп KEYENCE-VHX, увеличение $\times 1000$).

На полученных изображениях микроструктуры образцов, спекаемых при температуре 900 °С, видны агломераты нерастворившегося стекла (Si_2O), следовательно, пористость имеет меньшие значения по сравнению с остальными образцами, так как в объеме не высвобождаются поры и ситаллизация протекает не полностью.

При температуре спекания 1000 °С увеличивается количество растворяемого стекла, но такая температура недостаточна для образования большого количества фаялита (Fe_2SiO_4), в связи с чем повышается пористость и незначительно возрастает твердость.

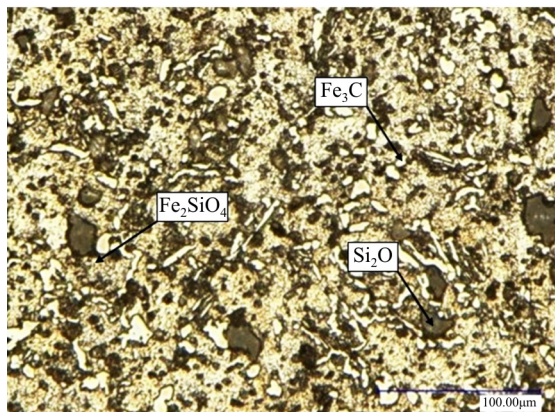


Рис. 5. Микроструктура образца № 1 (1100 °С, 3 % стеклянной фазы) после спекания, $\times 1000$

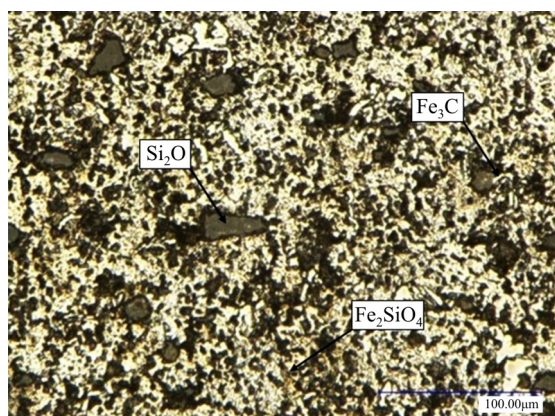


Рис. 6. Микроструктура образца № 2 (1100 °С, 2 % стеклянной фазы) после спекания, $\times 1000$

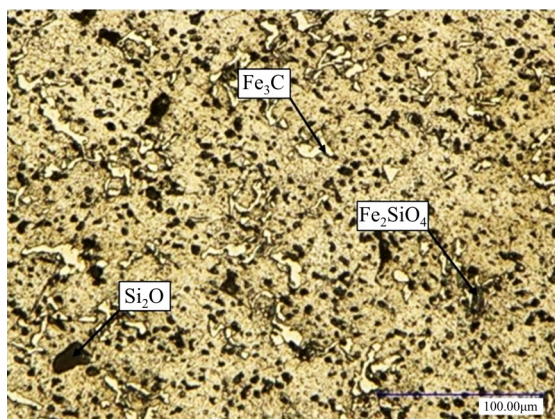


Рис. 7. Микроструктура образца № 3 (900 °С, 3 % стеклянной фазы) после спекания, $\times 1000$

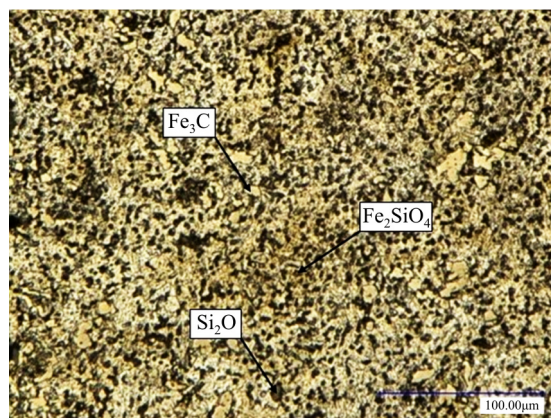


Рис. 8. Микроструктура образца № 4 (900 °С, 2 % стеклянной фазы) после спекания, $\times 1000$

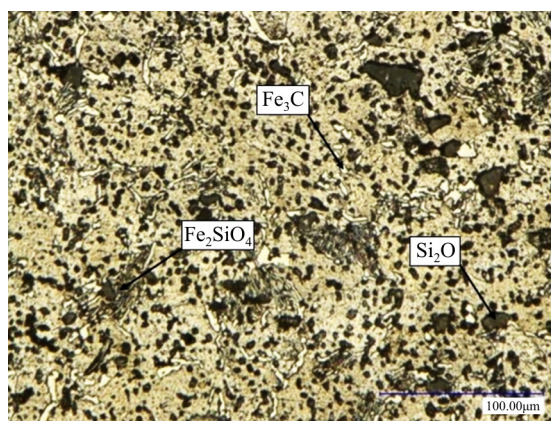


Рис. 9. Микроструктура образцов № 5–7 (1000 °С, 2 % стеклянной фазы) после спекания, $\times 1000$

При температуре спекания 1100 °С ситаллизация протекает полностью, из-за чего образуется наибольшее количество фаялита. Из-за высокой температуры спекания на месте агломератов Si_2O образуются пустоты, заполняемые частицами железа, что снижает пористость.

Заключение

На основании проведенного исследования можно отметить, что с увеличением температуры спекания линейно увеличивается твердость композиционного материала, это обусловлено интенсивным образованием новой фазы фаялит (Fe_2SiO_4). Стекло, как хрупкий материал, с увеличением концентрации в композите снижает его твердость. Пористость возрастает с уменьшением температуры вследствие того, что освобождается межчастичное пространство вместе с растворением фазы Si_2O , но из-за недостаточной температуры оно не успевает заполниться новой фазой.

Список литературы

1. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1985. – 624 с.
2. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1986. – 496 с.
3. Яковлева А.П. Исследование свойств поверхностного слоя стальных деталей, упрочненных электрохимической обработкой // *Авиационная промышленность*. – 2012. – № 2. – С. 8.
4. Мантуров Д.С. Методы повышения износостойкости металлополимерных и металлических трибосистем // *Вестник РГУПС*. – 2020. – № 2. – С. 15–24.
5. Суворова Т.В., Беляк О.А. Контактные задачи для пористоупругого композита при наличии сил трения // *Прикладная математика и механика*. – 2020. – Т. 84, № 4. – С. 529–539.
6. Трибология. Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ / Н.М. Алексеев [и др.] (СНГ); Н. Айсе [и др.] (США); под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. – М.: Машиностроение, 1993. – 451 с.
7. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Порошковая металлургия и металлургические аддитивные технологии. По материалам европейского конгресса порошковой металлургии Euro PM2017 // *Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* / под ред. А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – Вып. 40. – С. 5–14.
8. Преображенский А.П., Токарева Н.М. Применение аддитивных технологий в порошковой металлургии // *Вестник Воронежского института высоких технологий*. – 2018. – № 1 (24). – С. 81–84.
9. Gershman I.S., Bushe N.A. Elements of thermodynamics and self-organization during friction // *Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed*. – London, New York: Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2006. – Ch. 2. – P. 13–58.
10. Бойцова В.В., Колобов М.Ю., Максимов А.С. Технология изготовления порошковых металлостеклянных железуграфитовых материалов // *Надежность и долговечность машин и механизмов*. – Иваново, 2018. – С. 284–287.
11. Bagluk G.A., Kurovskiy V., Kostenko O. Effect of metal phase composition on mechanical and tribological properties of Fe-glass composites // XIII International Scientific Congress “Machines. Technologies. Materials. 2016”, Varna, Bulgaria, 14–17 September 2016. – Varna, Bulgaria, 2016. – Vol. 2. – P. 23–28.
12. Рудской А.И., Баурова Н.И. Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // *Технология металлов*. – 2019. – № 2. – С. 2–10.
13. Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / под ред. А.В. Белого. – Минск, 2018. – 295 с.
14. Сравнительная характеристика порошков, полученных методом распыления расплава струей энергоносителя / О.В. Корзников, Т.В. Федина, Ж.В. Еремеева, В.Ю. Лопатин // *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные матери-*

лы. Сварка: 10-й Междунар. симп., г. Минск, Беларусь, 10–12 апреля 2017 г. – Минск, Беларусь, 2017. – С. 196–204.

15. Влияние добавок нанодispersных порошков железа и оксидов железа на процессы прессования и спекания порошковых сталей / В.К. Нарва, Ж.В. Еремеева, Н.П. Коробов, Д.А. Пфенинг // *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новый порошковые композиционные материалы. Сварка: 10-й междунар. симп. г. Минск, Беларусь, 10–12 апреля 2017 г.* – Минск, Беларусь, 2017. – С. 196–204.

16. Дроздова О.И., Бобыкин А.А., Шагарова А.А. Исследование гранулометрического состава полидисперсного продукта методом ситового анализа // *Математические методы в технике и технологиях*. – 2019. – Т. 2. – С. 7–9.

17. Бридский Е.В., Мьякишев А.М. Седиментационный анализ. Расчет массы и радиуса осевших частиц // *Молодежь и XXI век: материалы IX Междунар. молодеж. науч. конф., г. Курск, 21–22 февраля 2019 г.* – Курск, 2019. – С. 10–13.

18. Zeng Y.B., Meng L.C., Fang X.L. Surface characteristics of Ni-based metallic glass in wire electrochemical micro machining // *J. Electrochem. Soc.* – 2017. – Vol. 164. – P. 408–421.

19. Fabrication of Fe-based metal glass microelectrodes by a vertical liquid membrane electrochemical etching method / Xiujuan Wu, Yumeng Sang, Tao Yang, Yongbin Zeng // *Review of Scientific Instruments*. – 2020. – Vol. 91. – 035109.

20. Сергеев С.Н. Технологии получения порошковых материалов на основе механически активированных шихт (обзор) // *Технология металлов*. – 2012. – № 1. – С. 46–56; 2012. – № 5. – С. 46–55; 2012. – № 6. – С. 47–56.

21. Belyak O.A., Suvorova T.V. Modelling stress deformed state upon contact with the bodies of two-phase microstructure // *Solid State Phenomena*. – 2020. – Vol. 299. – P. 124–129.

22. Тананко И.Е. Основы моделирования систем. – Саратов: Наука, 2018. – 116 с.

23. Власюк Р.З., Луговецкая Е.С., Радомысльский И.Д. Металлостеклянный материал // *Порошковая металлургия*. – 1971. – № 5. – С. 657–660.

24. Структура и свойства металлостеклянных материалов на основе порошка карбонильного железа / Е.С. Беляев, Т.М. Колосова, В.А. Алексеев, Н.В. Макаров, Ю.А. Гетмановский // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 4. – С. 22–27.

25. Беляев Е.С., Макаров Н.В., Гетмановский Ю.А. Влияние содержания углерода и стекла на твердость металлостеклянных материалов // *Theoretical & Applied Science*. – 2017. – № 01 (45). – С. 160–166.

26. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов: пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 544 с.

References

1. Fedorchenko I.M., Frantsevich I.N., Radomysel'skii I.D. et al. Poroshkovaia metallurgiiia. Materialy, tekhnologiiia, svoistva, oblasti primeneniia: spravochnik [Powder metallurgy. Materials, technology, properties, applications]. Kiev: Naukova dumka, 1985, 624 p.
2. Kiparisov S.S., Libenson G.A. Poroshkovaia metallurgiiia [Powder metallurgy]. Moscow: Metallurgiiia, 1986, 496 p.

3. Iakovleva A.P. Issledovanie svoystv poverkhnostnogo sloia stal'nykh detalei, uprochnennykh elektromekhanicheskoi obrabotkoi [Study of surface layer properties of steel parts hardened by electromechanical treatment]. *Aviatsionnaia promyshlennost'*, 2012, no. 2, p. 8.
4. Manturov D.S. Metody povysheniia iznoso-stoikosti metalopolimernykh i metallicheskiy tribosistem [Methods to improve the wear resistance of metal-polymer and metal tribosystems]. *Vestnik RGUPS*, 2020, no. 2, pp. 15–24.
5. Suvorova T.V., Beliak O.A. Kontaknyye zadachi dlia poristoupругogo kompozita pri nalichii sil treniia [Contact problems for poroelastic composites in the presence of frictional forces]. *Prikladnaia matematika i mekhanika*, 2020, vol. 84, no. 4, pp. 529–539.
6. Alekseev N.M., Aise N. et al. Tribologiya. Issledovaniia i prilozheniia: Opyt SShA i stran SNG [Research and Applications: The U.S. and CIS Experience]. Ed. V.A. Belogo, K. Ludemy, N.K. Myshkina. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 451 p.
7. Vitiaz' P.A., Il'iushchenko A.F., Savich V.V. Poroshkovaia metallurgiya i metallurgicheskie additivnyye tekhnologii. Po materialam evropeiskogo kongressa poroshkovoi metallurgii Euro PM2017 [Powder metallurgy and metallurgical additive technologies. Based on the materials of the European Congress of Powder Metallurgy Euro PM2017]. Poroshkovaia metallurgiya. Ed. A.F. Il'iushchenko Minsk: Belaruskaya navuka, 2017, iss. 40, pp. 5–14.
8. Preobrazhenskii A.P., Tokareva N.M. Prime-nenie additivnykh tekhnologii v poroshkovoi metallurgii [Application of additive technologies in powder metallurgy]. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*, 2018, no. 1 (24), pp. 81–84.
9. Gershman I.S., Bushe N.A. Elements of thermodynamics and self-organization during friction. *Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed*. London, New York: Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2006, part 2, pp. 13–58.
10. Boitsova V.V., Kolobov M.Iu., Maksimov A.S. Tekhnologiya izgotovleniia poroshkovykh metallostekliannykh zhelezografityovykh materialov [Manufacturing technology of powder metal-glass iron-graphite materials]. *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov*. Ivanovo, 2018, pp. 284–287.
11. Bagluk G.A., Kurovskiy V., Kostenko O. Effect of metal phase composition on mechanical and tribological properties of Fe-glass composites. XIII International Scientific Congress “Machines. Technologies. Materials. 2016”, Varna, Bulgaria, 14–17 September 2016. Varna, Bulgaria, 2016, vol. 2, pp. 23–28.
12. Rudskoi A.I., Baurova N.I. Tekhnologicheskaya nasledstvennost' pri proizvodstve i ekspluatatsii konstruktivnykh materialov [Technological heredity in the production and operation of structural materials]. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 2, pp. 2–10.
13. Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniia i obrabotki materialov [Modern methods and technologies of creation and processing of materials]: sbornik nauchnykh trudov. Materialovedenie. Ed. A.V. Belogo. Minsk, 2018, 295 p.
14. Korznikov O.V., Fedina T.V., Ereemeeva Zh.V., Lopatin V.Iu. Sravnitel'naya kharakteristika poroshkov, poluchennykh metodom raspyleniia rasplava streei energonositelia [Comparative characteristics of powders produced by atomization of melt by energy jet]. *Poroshkovaia metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novyye poroshkovyye kompozitsionnyye materialy. Svarka: 10-i Mezhdunarodnyi simpozium*. Minsk, Belarus', 2017, pp. 196–204.
15. Narva V.K., Ereemeeva Zh.V., Korobov N.P., Pfening D.A. Vliianie dobavok nanodispersnykh poroshkov zheleza i oksidov zheleza na protsessy pressovaniia i spekaniia poroshkovykh staley [Effect of additives of nanodispersed iron powders and iron oxides on the pressing and sintering processes of powder steels]. *Poroshkovaia metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novyye poroshkovyye kompozitsionnyye materialy. Svarka*. Minsk, Belarus', 2017, pp. 196–204.
16. Drozdova O.I., Bobykin A.A., Shagarova A.A. Issledovanie granulometricheskogo sostava polidispersnogo produkta metodom sitovogo analiza [Study of the granulometric composition of polydisperse product by sieve analysis]. *Matematicheskie metody v tekhnologiiakh*, 2019, vol. 2, pp. 7–9.
17. Bridskii E.V., Miakishev A.M. Sedimentatsionnyy analiz. Raschet massy i radiusa osevsikh chastits [Sedimentation analysis. Calculation of the mass and radius of deposited particles]. *Molodezh' i XXI vek: materialy IX Mezhdunaly molodezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Kursk, 2019, pp. 10–13.
18. Zeng Y.B., Meng L.C., Fang X.L. Surface characteristics of Ni-based metallic glass in wire electrochemical micro machining. *Journal Electrochem. Soc.*, 2017, vol. 164, pp. 408–421.
19. Xiujuan Wu, Yumeng Sang, Tao Yang, Yongbin Zeng. Fabrication of Fe-based metal glass microelectrodes by a vertical liquid membrane electrochemical etching method. *Review of Scientific Instruments*, 2020, vol. 91, 035109.
20. Sergeenko S.N. Tekhnologii polucheniia poroshkovykh materialov na osnove mekhanicheski aktivirovannykh shikht (obzor) [Technologies for obtaining powder materials on the basis of mechanically activated charge materials]. *Tekhnologiya metallov*, 2012, no. 1, pp. 46–56; 2012, no. 5, pp. 46–55; 2012, no. 6, pp. 47–56.
21. Belyak O.A., Suvorova T.V. Modelling stress deformed state upon contact with the bodies of two-phase microstructure. *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 299, pp. 124–129.
22. Tananko I.E. Osnovy modelirovaniia sistem [Fundamentals of system modeling]. Saratov: Nauka, 2018, 116 p.
23. Vlasiuk R.Z., Lugovetskaia E.S., Radomytsel'skii I.D. Metallostekliannyi material [Metal-glass material]. *Poroshkovaia metallurgiya*, 1971, no. 5, pp. 657–660.
24. Beliaev E.S., Kolosova T.M., Alekseev V.A., Makarov N.V., Getmanovskii Iu.A. Struktura i svoystva metallostekliannykh materialov na osnove poroshka karbonil'nogo zheleza [Structure and properties of metallic glass materials based on carbonyl iron powder]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 4, pp. 22–27.
25. Beliaev E.S., Makarov N.V., Getmanovskii Iu.A. Vliianie soderzhaniia ugleroda i stekla na tverdosť metallostekliannykh materialov [Influence of carbon and glass content on the hardness of metallic glass materials]. *Theoretical and Applied Science*, 2017, no. 01 (45), pp. 160–166.

26. Khartman K., Letskii E., Shefer V. *Planirovanie eksperimenta v issledovaniakh tekhnologicheskikh protsessov* [Planning the experiment in the study of technological processes]. Moscow: Mir, 1977, 544 p.

Получено 18.02.2021

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Хлыбов Александр Анатольевич (Нижний Новгород, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой материаловедения, теории материалов и термической обработки металлов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, e-mail: hlybov_52@mail.ru.

Мальцев Илья Михайлович (Нижний Новгород, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, теории материалов и термической обработки металлов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, e-mail: maltcev@nntu.ru.

Беляев Евгений Сергеевич (Нижний Новгород, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения, теории материалов и термической обработки металлов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, e-mail: yaneck@bk.ru.

Гетмановский Юрий Андреевич (Нижний Новгород, Россия) – аспирант, ассистент кафедры материаловедения, теории материалов и термической обработки металлов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, e-mail: getmanovskij@yandex.ru.

Беляева Сульгун Сабуровна (Нижний Новгород, Россия) – аспирант, ассистент кафедры материаловедения, теории материалов и термической обработки металлов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, e-mail: sulgun888@mail.ru.

About the authors

Alexander A. Khlybov (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, Theory of Materials and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, e-mail: hlybov_52@mail.ru.

Ilya M. Maltsev (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials Science, Theory of Materials and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, e-mail: maltcev@nntu.ru.

Evgeniy S. Belyaev (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials Science, Theory of Materials and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, e-mail: yaneck@bk.ru.

Yuri A. Getmanovskiy (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Postgraduate Student, Assistant, Department of Materials Science, Theory of Materials and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, e-mail: getmanovskij@yandex.ru.

Sulgun S. Belyaeva (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Postgraduate Student, Assistant, Department of Materials Science, Theory of Materials and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, e-mail: sulgun888@mail.ru.