

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.762

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-50-57



### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЖАРОСТОЙКОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ СТЕКЛЯННОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

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

Нижегородский государственный технический университет, им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Статья представляет собой исследовательскую экспериментальную работу, проведенную с целью получения композиционного антифрикционного материала, обладающего повышенной жаростойкостью. С этой целью был получен композиционный металлостеклянный материал на основе никеля. Как известно, при разработке порошковых композиционных антифрикционных материалов особое внимание уделяется повышению износостойкости. Однако множество узлов трения эксплуатируются при повышенной температуре на протяжении длительного периода времени. При разработке материала, работающего в подобных условиях, помимо износостойкости, необходимо учитывать длительное сопротивление повышенной температуре. **Используемые методы.** В ходе выполнения исследования, были использованы методы порошковой металлургии, включающие в себя: получение порошка боя тарного стекла (БТ-1); смешивание двухкомпонентной шихты, состоящей из порошка стекла и восстановленного порошка никеля (ПНК-УТ3); формование при помощи гидравлического пресса и последующее спекание в защитной восстановливающей атмосфере водорода. Для определения жаростойкости применялся весовой метод исследования при помощи аналитических весов. Для получения цифровых моделей зависимости жаростойкости от состава композиционного материала применялся комплекс математического анализа STATISTIKA 10. **Новизна.** Получение композиционного материала с повышенной жаростойкостью, в качестве матрицы которого использовался порошок никеля, а армирующим элементом выступал порошок боя тарного стекла. **Результат.** Была исследована и получена зависимость жаростойкости от химического состава композиционного материала и метода его изготовления. **Практическая значимость.** Заключается в разработке нового материала, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками, с возможностью последующего внедрения на производстве в качестве материала для изготовления подшипников скольжения.

**Ключевые слова:** жаростойкость, металлостеклянные материалы, антифрикционные материалы, износостойкость, порошковая металлургия, математический анализ.

© Хлыбов А.А., Мальцев И.М., Беляев Е.С., Гетмановский Ю.А., Беляева С.С., 2021

#### Для цитирования

Исследование зависимости жаростойкости от концентрации стеклянного наполнителя в металлостеклянных композитах на основе никеля / Хлыбов А.А., Мальцев И.М., Беляев Е.С., Гетмановский Ю.А., Беляева С.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-50-57>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# RESEARCH ON THE DEPENDENCE OF HEAT RESISTANCE ON THE CONCENTRATION OF A GLASS FILLER IN METAL-GLASS COMPOSITES BASED ON NICKEL

**Khlybov A.A., Maltsev I.M., Belyaev E.S., Getmanovsky Yu.A., Belyaeva S.S.**

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract. Statement of the problem (relevance of the research).** This paper is experimental research carried out in order to produce a composite antifriction material with increased heat resistance. For this purpose, a composite nickel-based, metal-glass material was produced. As you know, when developing powder composite antifriction materials, a special attention is paid to increasing wear resistance. However, many friction units are operated at elevated temperatures for a long period of time. When developing a material that works in such conditions, in addition to wear resistance, it is necessary to take into account the long-term resistance to elevated temperature. **Methods applied.** In the course of the study, we used the methods of powder metallurgy, including production of powder of broken container glass (BT-1), a two-component mixture consisting of glass powder and reduced nickel powder (PNK-UT3), molding by means of a hydraulic press and subsequent sintering in a protective reducing atmosphere of hydrogen. To determine the heat resistance, we used a gravimetric research method, involving an analytical balance. To get digital models of the dependence of heat resistance on the composition of the composite material, we applied STATISTICA 10, a mathematical analysis package. **Novelty.** Producing a composite material with increased heat resistance, where nickel powder was used as a matrix and container glass powder was used as a reinforcing element. **Result.** We studied and determined the dependence of heat resistance on the chemical composition of the composite material and the method of production. **Practical significance.** Development of a new material with improved performance characteristics and a potential subsequent implementation in production as a material for manufacturing plain bearings.

**Keywords:** heat resistance, metal-glass materials, antifriction materials, wear resistance, powder metallurgy, mathematical analysis.

## For citation

Khlybov A.A., Maltsev I.M., Belyaev E.S., Getmanovsky Yu.A., Belyaeva S.S. Research on the Dependence of Heat Resistance on the Concentration of a Glass Filler in Metal-Glass Composites Based on Nickel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-50-57>

## Введение

Одной из основных задач материаловедения на данный момент является повышение эксплуатационных характеристик деталей и узлов механизмов [1]. Это обусловлено повышением ресурсоемкости и, следовательно, снижением стоимости обслуживания [2]. Но, к сожалению, при разработке материалов с повышением качества одного из параметров материала прочие параметры снижаются [3]. Решить такую проблему позволяет применение методов порошковой металлургии. С помощью этих методов можно получать строго гетерогенные материалы, способные объединить в одной композиции химические элементы с абсолютно разными свойствами (температура плавления, плотность) [4]. Одним из их представителей являются антифрикционные материалы, а именно металлостеклянные [5]. Имея высокую износостойкость, они могут обладать высокими значениями твердости [6].

Для получения материалов с заданными эксплуатационными свойствами наиболее широко

применяются методы порошковой металлургии (ПМ). ПМ позволяет создавать материалы, обладающие такими противоречивыми свойствами, как высокая твердость и пластичность [7]. ПМ вносит большой вклад в создание новых материалов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами. Повысить комплекс свойств порошковых материалов можно путем легирования неметаллическими включениями. Одним из таких включений является порошок стекла, введение которого позволяет добиться повышения износостойкости и твердости за счет возникновения новой фазы – фаялита ( $MeSiO_4$ ) [8].

В настоящее время существует множество узлов трения, в которых применяются антифрикционные материалы – цилиндрические и шариковые подшипники, подпятники, вкладыши, направляющие, скользящие токосъемники, торцевые и боковые уплотнения, шарнирные устройства, поршневые кольца и др. Не менее разнообразны и условия их работы – со смазкой, при пограничном трении, трении без смазки, в вакууме, при повышенных температурах, высо-

ких скоростях, больших нагрузках, в воде и агрессивных средах, углекислом газе, инертных газах и др. Эти условия работы усложняются тем, что узлы трения могут работать как при одностороннем, так и при возвратно-поступательном движении. В частности, как известно, подшипники скольжения могут использоваться в узлах, подверженных воздействию высоких температур. На основании этого возникает вопрос, будут ли обладать металлостеклянные материалы возможностью эксплуатации в таких условиях. Одним из критериев работы подшипников скольжения при повышенной температуре, как одних из представителей антифрикционных узлов, является жаростойкость. Это параметр, отвечающий за сопротивление материала окислению при длительных воздействиях температуры [9].

В первый период появления спеченные антифрикционные материалы рассматривались только в качестве заменителей таких традиционных материалов, как баббиты и бронзы. Решалась задача замены в массовом производстве подшипников из цветных дефицитных металлов менее дефицитными. Однако быстрое развитие машиностроения выдвинуло задачу создания новых антифрикционных материалов, обладающих повышенной износостойкостью, низким коэффициентом трения, способностью работать при высоких скоростях и больших нагрузках, а также в различных активных средах.

При разработке металлостеклянных материалов особое внимание уделяется их износостойкости. В ряде работ [10–12] были проведены исследования коррозионной стойкости и ударной вязкости. К сожалению, проводимые исследования не затрагивали вопросы эксплуатации таких материалов при высоких температурах. Исследование жаростойкости проводилось в работе [13], где в роли матрицы композиционного материала выступала марганцевая сталь, а в качестве армирующего компонента – порошок боя тарного стекла.

Цель проводимого исследования заключается в определении жаростойкости антифрикционного металлостеклянного материала на основе никеля.

#### Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Основными задачами в ходе эксперимента были:

1. Создание композиционного материала на основе никеля.

2. Проведение испытания на жаростойкость.
3. Анализ полученных данных.

В качестве матрицы композиционного материала выступал восстановленный порошок никеля ПНК-УТ3, фракция которого составляет 20 мкм, этот порошок широко используется при изготовлении конструкционных материалов. В качестве армирующего элемента был использован порошок боя тарного стекла БТ-1 с фракцией 50 мкм, его состав приведен в табл. 1. Микроструктура порошка никеля и стекла представлена на рис. 1.

Таблица 1. Химический состав тарного стекла БТ-1  
Table 1. Chemical composition of container glass BT-1

Группа стекла	Марка стекла	Содержание оксидов, % по массе				
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO+MgO	Na <sub>2</sub> O	Sp <sub>3</sub>
Бесцветное	БТ-1	72	2,5	11	14	0,5

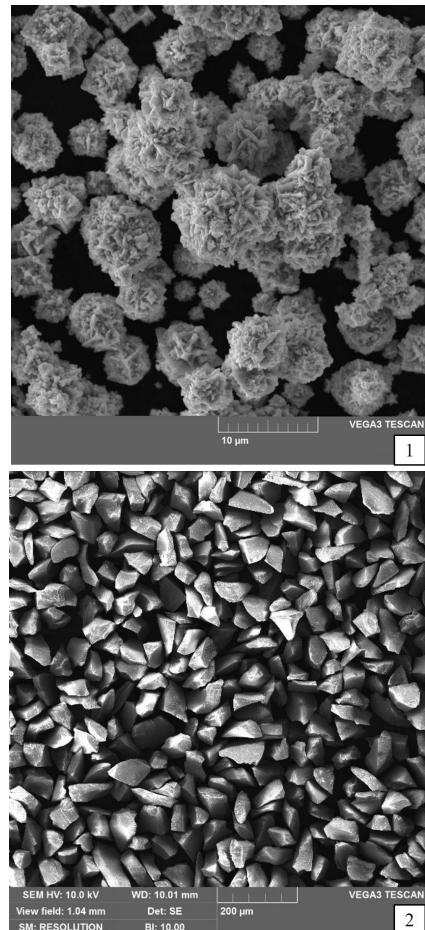


Рис. 1. Микроструктура порошков (РЭМ VEGA3 TESCAN): 1 – порошок ПНК-УТ3;

2 – порошок боя тарного стекла БТ-1

Fig. 1. Microstructure of powders (SEM using TESCAN VEGA 3): 1 is powder PNK-UT3; 2 is powder of broken container glass BT-1

Порошок боя тарного стекла был получен при помощи размола стекла в планетарной мельнице и дальнейшего его разделения на фракции при помощи сит. Порошок фракции 50 мкм был выбран в качестве матрицы композиционного материала по причине того, что в его составе отсутствуют примеси иных фракций.

Методика изготовления композиционного материала включала в себя следующие этапы:

1. Холодное прессование при помощи гидравлического пресса, усилие холодного прессования составляло 281,5 МПа.

2. Спекание в защитной восстановительной атмосфере водорода при температуре 1000°C в течение 60 мин.

3. Холодная пластическая деформация на гидравлическом прессе с целью получения беспористого материала (пористость не более 4%).

В ходе эксперимента варьировалось содержание стеклянного наполнителя в композиционном материале. Содержание стекла составляло 15, 20, 25% от объема шихты. Эталонный образец представлен прессовкой из порошка ПНК-УТЗ без содержания стеклянного наполнителя.

Жаростойкость определялась весовым методом, скорость окисления определялась по привесу образца к единице площади, эксперименты

проводились в течение 8 ч, в интервале температур 900–1200°C. Для исключения грубых ошибок в эксперименте на каждом этапе испытания использовалось 5 образцов для получения одной экспериментальной точки. Все полученные результаты были подвергнуты статистической обработке при помощи программного пакета STATISTIKA 10. Полученные после обработки результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Масса привеса экспериментальных образцов после проведения испытания  
Table 2. Weight gain of experimental samples after testing

Содержание стекла, % от объема шихты	Температура испытания, °C			
	900	1000	1100	1200
0 (эталон)	0,008	0,011	0,015	0,020
15	0,005	0,005	0,013	0,018
20	0,002	0,004	0,007	0,011
25	0,005	0,007	0,011	0,013

После проведения испытания были построены экспериментальные графики, представленные на рис. 2–5.

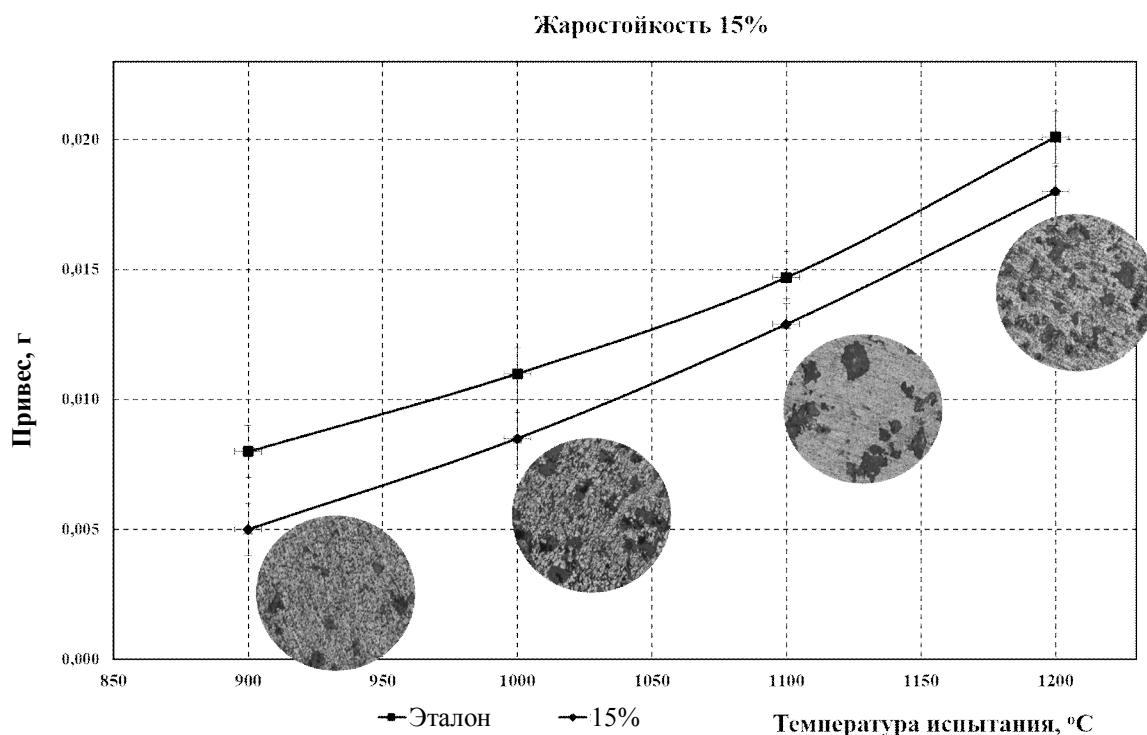


Рис. 2. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образца 15% и эталонного образца  
Fig. 2. Heat resistance-test temperature dependence diagram for a sample of 15% and a reference sample

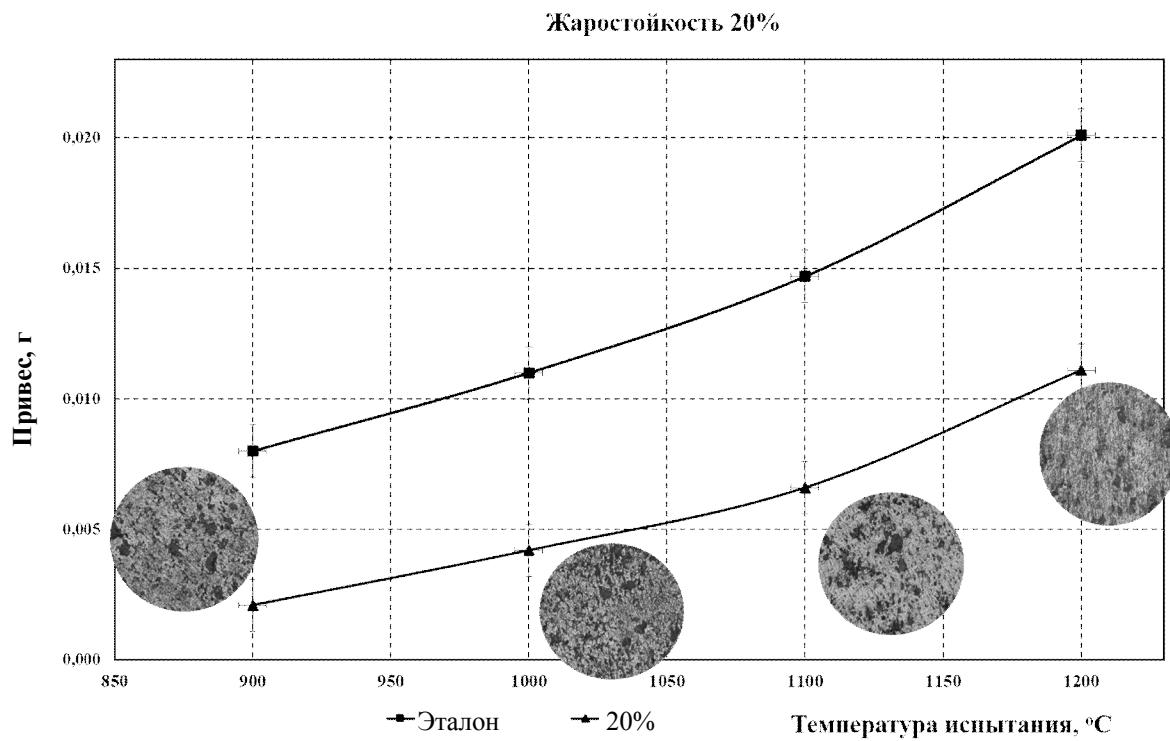


Рис. 3. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образца 20% и эталонного образца  
Fig. 3. Heat resistance-test temperature dependence diagram for a sample of 20% and a reference sample

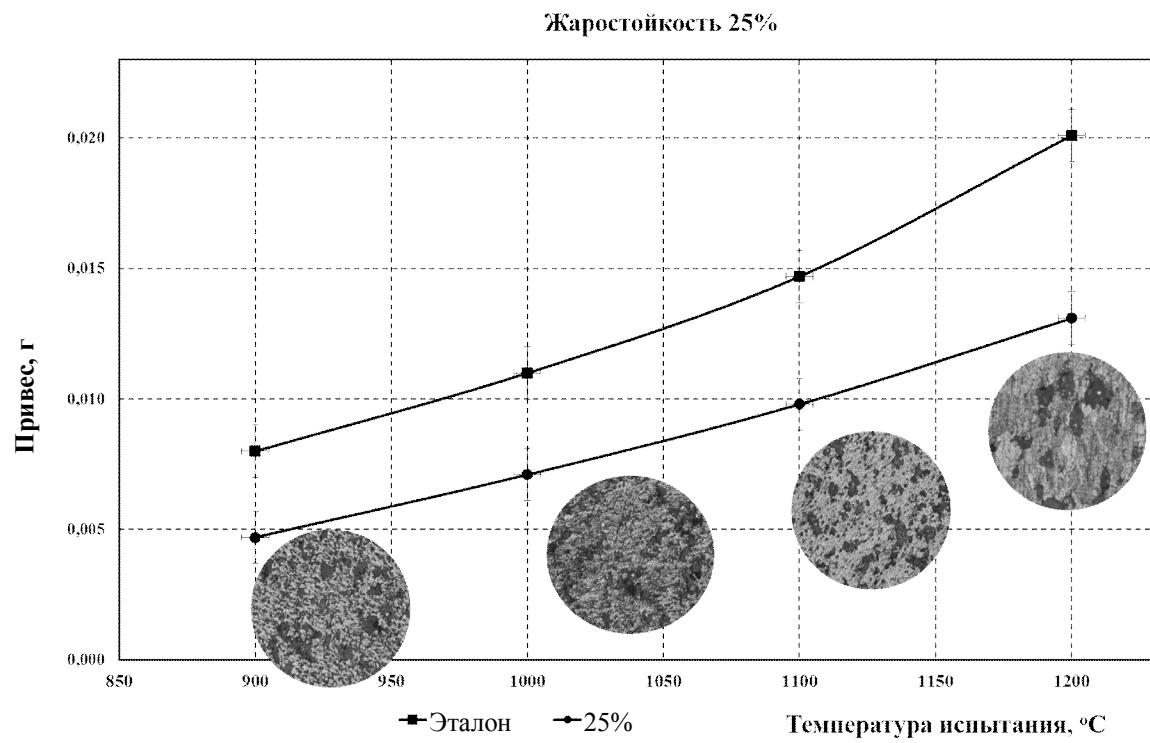


Рис. 4. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образца 25% и эталонного образца  
Fig. 4. Heat resistance-test temperature dependence diagram for a sample of 25 % and a reference sample

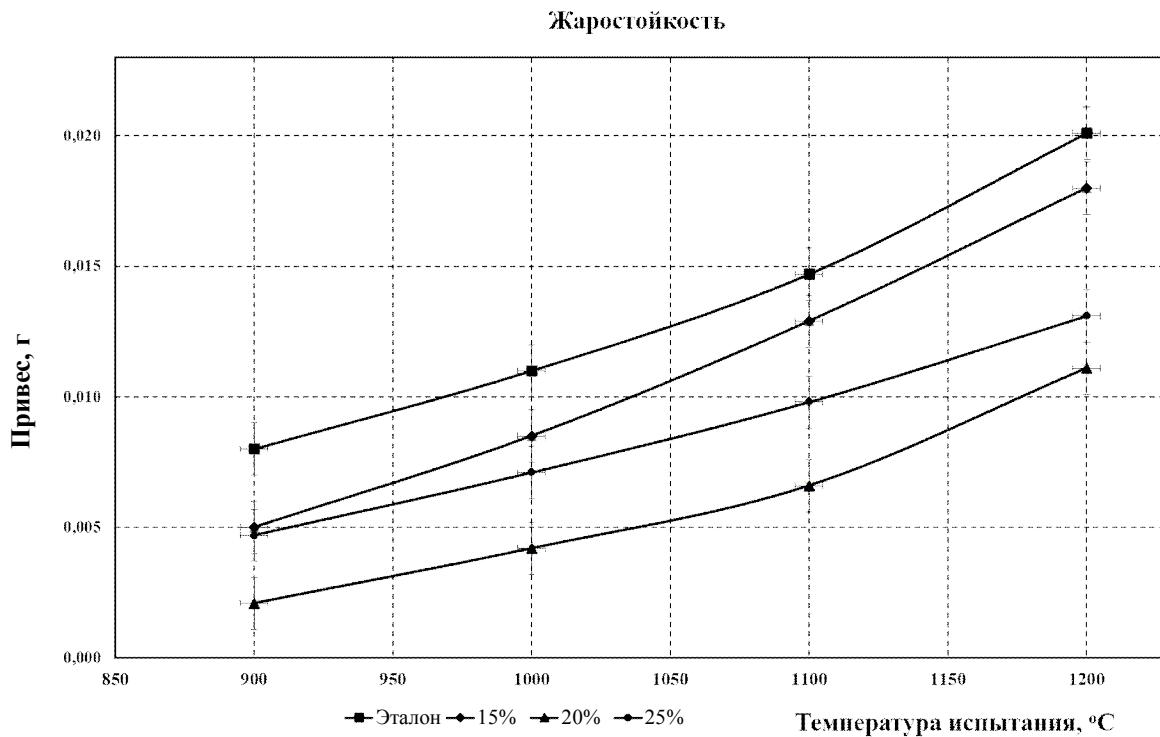


Рис. 5. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образцов с различным содержанием стекла

Fig. 5. Heat resistance-test temperature dependence diagram for samples with different glass content

### Полученные результаты и их обсуждение

На основании полученных графиков были определены их математические функции [14]:

– для эталонного образца

$$f(x) = -937087 \cdot x^2 + 51124 \cdot x + 550,99;$$

– для образца с содержанием стекла 15%

$$f(x) = -487900 \cdot x^2 + 34179 \cdot x + 772,88;$$

– для образца с содержанием стекла 20%

$$f(x) = -574623 \cdot x^2 + 64854 \cdot x + 742,29;$$

– для образца с содержанием стекла 25%

$$f(x) = -383251 \cdot x^2 + 54176 \cdot x + 668,04,$$

где  $f(x)$  – функция зависимости образовавшихся окислов;  $x$  – температура испытания.

На приведенных графиках видно, что до температуры 1000°C материал практически не окисляется. Это объясняется образованием на поверхности и в устье пор тонкой защитной окисной пленки из окислов никеля, железа и кремния. Окисление основы композита способствует образованию окисной пленки состава NiO. Следовательно, до 1000°C материал обладает длительной жаростойкостью.

Дальнейшее увеличение температуры приводит к интенсификации процессов окисления, особенно по границам спеченных металлических частиц, причем процесс окисления не затухает во времени. Образующиеся по границам частиц окислы вызывают разупрочнение на межфазных границах. На этом основании можно сделать вывод, что материал обладает недостаточной жаростойкостью в интервале температур 1100–1200°C.

Изменение механизма окисления объясняется наличием точек экстремума, определяемых из полученных уравнений.

### Заключение

Таким образом, было выявлено, что жаростойкость изменяется в зависимости от концентрации стеклянного наполнителя. Жаростойкость возрастает с увеличением стеклянной фазы до 20%. При дальнейшем увеличении происходит снижение жаростойкости.

### Список литературы

- Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3-х кн. Кн. 1. Материаловедение / гл. ред. А.В. Белый. Минск, 2018. 295 с.

2. Рудской А.И., Баурова Н.И. Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. № 2. С. 2–10.
3. Мантуров Д.С. Методы повышения износостойкости металлополимерных и металлических трибосистем // Вестник РГУПС. 2020. № 2. С. 15–24.
4. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысельский И.Д. и др. Киев: Наук. думка, 1985. 624 с.
5. Власюк Р.З., Луговецкая Е.С., Радомысельский И.Д. Металлостеклянный материал // Порошковая металлургия. 1971. № 5. С. 657–660.
6. 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.
7. Бойцова В.В., Колобов М.Ю., Максимов А.С. Технология изготовления порошковых металлостеклянных железографитовых материалов // Надежность и долговечность машин и механизмов. 2018. С. 284–287.
8. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Порошковая металлургия и metallurgical additive technologies. Based on the proceedings of the European Congress of Powder Metallurgy Euro PM2017. Poroshkovaya metallurgiya: resp. mezhved. sb. nauch. tr. / red. kol.: Ильющенко А.Ф. [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2017. Вып. 40. С. 5–14.
9. Гнедаш Е.Е., Акчурин Т.К., Стефаненко И.В. Состояние и перспективы развития технологий жаростойких композиционных материалов // Известия ВолГТУ. 2018. №9 (219). С. 56–61.
10. Shinozaki A., Hirai H., Kagi H. et al. Reaction of forsterite with hydrogen molecules at high pressure and temperature. Phys Chem Minerals, 2012, 39, 123–129.
11. Liu X.F., Chen Y., Jiang M.Q., et al. Tuning plasticity of in-situ dendrite metallic glass composites via the dendrite-volume-fraction-dependent shear banding. Mater Sci Eng-A, 2017, 680, 121–1291.
12. Pang S.J., Zhang T., Asami K., Inoue A. Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance. Acta Mater. 2002, 50, 489–497.
13. Yan G., Yu W., Shengping S. Oxidation Protection of Enamel Coated Ni Based Superalloys: Microstructure and Interfacial Reaction. Corros. Sci., 2020, 173, 108760.
14. Блантер М.Е. Методика исследования металлов и обработки опытных данных. М.: Металлургиздат, 1952. 444 с.
2. Rudskoy A.I., Baurova N.I. Technological heredity in the production and operation of structural materials. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals], 2019, no. 2, pp. 2–10. (In Russ.)
3. Manturov D.S. Methods for increasing wear resistance of metal-polymer and metal tribosystems. *Vestnik RGUPS* [Vestnik of Rostov State Transport University], 2020, no. 2, pp. 15–24. (In Russ.)
4. Fedorchenko I.M., Frantsevich I.N., Radomyselsky I.D. et al. *Poroshkovaya metallurgiya. Materialy, tekhnologiya, svoystva, oblasti primeneniya: spravochnik* [Powder metallurgy. Materials, technology, properties and areas of application: Handbook]. Kiev: Nauk. Dumka, 1985, 624 p. (In Russ.)
5. Vlasuk R.Z., Lugovetskaya E.S., Radomyselsky I.D. Metal-glass material. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder Metallurgy], 1971, no. 5, pp. 657–660. (In Russ.)
6. Belyaev E.S., Makarov N.V., Getmanovskiy Yu.A. Influence of carbon and glass content on the hardness of metal-glass materials. Theoretical & Applied Science, 2017, no. 01 (45), pp. 160–166. (In Russ.)
7. Boytsova V.V., Kolobov M.Yu., Maksimov A.S. Manufacturing technology of powder metal-glass iron-graphite materials. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i mehanizmov* [Reliability and Durability of Machines and Mechanisms], 2018, pp. 284–287. (In Russ.)
8. Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Savich V.V. Powder metallurgy and metallurgical additive technologies. Based on the proceedings of the European Congress of Powder Metallurgy Euro PM2017. *Poroshkovaya metallurgiya: resp. mezhved. sb. nauch. tr.* [Powder metallurgy: the national collection of research papers. Edited by Ilyushchenko A.F. et al.]. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2017, no. 40, pp. 5–14. (In Russ.)
9. Gnedash E.E., Akchurin T.K., Stefanenko I.V. State and prospects of the development of technologies of heat-resistant composite materials. *Izvestiya VolgGTU* [Journal of Volgograd State Technical University], 2018, no. 9 (219), pp. 56–61. (In Russ.)
10. Shinozaki, A., Hirai, H., Kagi, H. et al. Reaction of forsterite with hydrogen molecules at high pressure and temperature. *Phys Chem Minerals*, 2012, 39, 123–129.
11. Liu X.F., Chen Y., Jiang M.Q., et al. Tuning plasticity of in-situ dendrite metallic glass composites via the dendrite-volume-fraction-dependent shear banding. *Mater Sci Eng-A*, 2017, 680, 121–1291.
12. Pang S.J., Zhang T., Asami K., Inoue A. Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance. *Acta Mater.* 2002, 50, 489–497.
13. Yan G., Yu W., Shengping S. Oxidation protection of enamel coated Ni based superalloys: Microstructure and interfacial reaction. *Corros. Sci.*, 2020, 173, 108760.
14. Blanter M.E. *Metodika issledovaniya metallov i obrabotki opytnykh dannykh* [Methods of research on metals and processing of experimental data]. Moscow: Metallurgizdat, 1952, 444 p. (In Russ.)

### References

1. Bely A.V. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauch. tr.* [Modern methods and technologies for producing and processing materials: collection of scientific papers]. Book 1, Materials Science. Minsk, 2018, 295 p. (In Russ.)

Поступила 25.03.2020; принята к публикации 28.04.2021; опубликована 28.06.2021  
Submitted 25/03/2020; revised 28/04/2021; published 28/06/2021

**Хлыбов Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия  
Email: hlybov\_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

**Мальцев Илья Михайлович** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: maltcev@nntu.ru. ORCID 0000-0002-3464-9372

**Беляев Евгений Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

**Гетмановский Юрий Андреевич** – аспирант, ассистент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

**Беляева Сульгун Сбурновна** – аспирант, ассистент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404

**Alexander A. Khlybov** – DrSc (Eng.), Professor,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia  
Email: hlybov\_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

**Ilya M. Maltsev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia  
Email: maltcev@nntu.ru. ORCID 0000-0002-3464-9372

**Evgeniy S. Belyaev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia  
Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

**Yuri A. Getmanovskiy** – postgraduate student, teaching assistant,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia  
Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

**Sulgun S. Belyaeva** – postgraduate student, teaching assistant,  
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia  
Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404