

УДК 621.793

Е.В. АСТРАШАБмладший научный сотрудник¹
E-mail: astrashabev@mail.ru**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, проф.заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹
E-mail: mbelotser@gmail.com**А.Н. ГРИГОРЧИК**, канд. техн. наукстарший научный сотрудник¹
E-mail: GrigorchikAN@gmail.com**В.А. КУКАРЕКО**, д-р физ.-мат. наук, проф.начальник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения (коллективного пользования)¹
E-mail: v_kukareko@mail.ru**А.В. СОСНОВСКИЙ**, канд. техн. наукведущий научный сотрудник¹
E-mail: sosnovskij@inbox.ru¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 07.09.2020.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОТЖИГА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ Ni-Cr-Al-ПСЕВДОСПЛАВА

Исследовано структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава в исходном состоянии и после отжига в температурном интервале 550–650 °С с выдержкой 20–60 мин. Показано, что в покрытиях, напыленных методом высокоскоростной металлизации проволоки из Х20Н80 и алюминия АД-1, фазовый состав включает в себя γ -(Ni, Cr, Fe), Al и Al_2O_3 . Установлено, что высокотемпературный отжиг Ni-Cr-Al-покрытий приводит к выделению в них интерметаллидных соединений Al_3Ni , Ni_2Al_3 , Ni_3Al и $NiAl$, а также к возрастанию пористости покрытий до ≈ 15 –20 об.%, что связано с реализацией эффектов Френкеля и Киркендалла. Триботехнические испытания покрытий проводились по схеме возвратно-поступательного движения образца по пластинчатому контртелу в режиме сухого трения при нагрузке 1,5 МПа. Показано, что в результате отжига покрытий регистрируется увеличение их износостойкости в условиях сухого трения до 24 раз по сравнению с исходным состоянием. В частности, интенсивность массового изнашивания Ni-Cr-Al-покрытия в исходном состоянии составляет $28,7 \times 10^{-3}$ мг/м, а подвергнутого отжигу при 600 °С в течение 60 мин — $1,2 \times 10^{-3}$ мг/м. На основании проведенного многофакторного эксперимента установлено, что максимальная износостойкость покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава в условиях сухого трения достигается в результате их отжига при температурах 630–640 °С и времени выдержки 40–50 мин, что связано с выделением в них большого количества дисперсных интерметаллидных фаз Ni_3Al и $NiAl$ при относительно незначительном увеличении пористости покрытий.

Ключевые слова: газотермическое напыление, псевдосплав, отжиг, интерметаллиды, износостойкость

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-60-64>

Введение. Покрытия из псевдосплавов получают все более широкое распространение в промышленности благодаря своим уникальными характеристикам [1–3]. В частности, покрытия, состоящие из нескольких трудносплавляемых материалов, могут иметь повышенную износостойкость, твердость, коррозионную стойкость, жаростойкость и т. д. [1–3]. Вместе с тем, получение материалов

из псевдосплавов методами изостатического пресования и спекания в вакууме, а также самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и плазменного напыления, является дорогостоящими технологическими операциями, что накладывает существенные ограничения на область использования данных материалов [1–3]. Высокоскоростная металлизация является высокоэффективной разно-

видностью газотермического напыления покрытий. Она основана на распылении расплавленных электрической дугой проволочных материалов горючим газом. При этом продукты сгорания горючего газа, истекая через сопло Лаваля, приобретают скорость 900–1500 м/с, а частицы распыляемого материала разгоняются этими продуктами до скоростей порядка ≈300–500 м/с, что позволяет, по сравнению с обычной электрометаллизацией, формировать покрытия с более высокими прочностными и физико-механическими свойствами [4–5]. В то же время формирование покрытий из псевдосплавов методом высокоскоростной металлизации проволочных материалов значительно удешевляет процесс их получения. Кроме этого, напыленные газотермические композиционные покрытия целесообразно подвергать последующей термической обработке, в результате которой в них могут выделяться упрочняющие интерметаллидные фазы. В частности, известно, что интерметаллиды системы Ni-Al обладают рядом уникальных свойств, например, повышенная твердость, износостойкость, жаро- и коррозионная стойкость. В настоящее время отсутствуют данные об исследованиях Ni-Cr-Al-псевдосплавов, полученных методом высокоскоростной металлизации и подвергнутых последующей термической обработке. Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния отжига на структурно-фазовое состояние, диэлектрические и триботехнические свойства Ni-Cr-Al-псевдосплава, полученного методом высокоскоростной металлизации проволоки Х20Н80 и АД-1.

Изготовление образцов и методики исследований.

Напыление газотермических покрытий проводилось на предварительно подготовленную поверхность подложки методом высокоскоростной металлизации с использованием разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси установки АДМ-10 [4]. В качестве подложки использовалась отожженная пластина из стали 20 размером 70 × 70 × 5 мм.

В качестве материалов для высокоскоростной металлизации использовались проволоки из нихрома (Х20Н80) и алюминия (АД-1). Таким образом, на подложке формировалось газотермическое покрытие из Ni-Cr-Al-псевдосплава. В качестве горючего газа при напылении использовался пропан. Толщина напыленного покрытия составляла ≈1,5 мм. Химический состав полученного покрытия представлен в таблице 1. Из пластины с напыленным покрытием из Ni-Cr-Al-псевдосплава вырезались образцы размером 8 × 6 × 5 мм.

Таблица 1 — Химический состав покрытия из Ni-Cr-Al-псевдосплава
Table 1 — Chemical composition of Ni-Cr-Al pseudoalloy coating

| Материал покрытия | Содержание элемента, масс. % | | | | | | | |
|-------------------|------------------------------|------|------|-------|------|------|------|------|
| | Ni | Si | S | Cr | Mn | Zn | Fe | Al |
| Ni-Cr-Al | 35,87 | 1,43 | 0,05 | 10,62 | 0,24 | 0,02 | 0,76 | ост. |

Термическая обработка вырезанных образцов по различным режимам проводилась в муфельной печи SNOL 7.2/1100. Температура нагрева составляла 550, 600, 650 °С, а время выдержки — 20, 40 и 60 мин. Охлаждение проводилось на воздухе. Температурный и временной интервалы отжига были выбраны на основании проведенных ранее исследований по отжигу покрытий, содержащих Al [6], а также с целью построения математической модели влияния отжига на износостойкость покрытий, полученной с помощью многофакторного эксперимента [7].

Триботехнические испытания газотермических покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава проводились по схеме возвратно-поступательного движения образца по пластинчатому контртелу в режиме сухого трения. Средняя скорость взаимного перемещения составляла ≈0,1 м/с. В качестве контртела использовалась пластина из закаленной стали У8. Номинальная удельная нагрузка испытаний *P* в условиях сухого трения составляла 1,5 МПа. Путь трения *L* составлял ≈1200 м с промежуточными замерами массового либо линейного износа. Оценка износа образцов при сухом трении осуществлялась весовым методом с использованием аналитических весов ВЛР-200. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате высокоскоростной металлизации двух различных проволочных материалов на поверхности подложки формируется плотное, слоистое покрытие из псевдосплава, которое состоит из чередующихся между собой частиц нихрома и алюминия (рисунок 1 а). Пористость покрытия после напыления не превышала 5 об.%, а его твердость составляет 160 HV10.

Отжиг покрытий по различным режимам приводит к повышению их пористости до ≈15–20 об.%, что связано с реализацией эффектов Френкеля и Киркендалла [8, 9], заключающихся в том, что при отжиге двух разнородных сваренных материалов, которые существенно различаются температурой плавления, происходит диффузия атомов более активного материала (в нашем случае — алюминия) по вакансионному механизму, при этом вакансии перемещаются в направлении, обратном потоку диффундирующих атомов алюминия. В результате этого происходит смещение границы раздела двух материалов, а также образование диффузионной пористости.

Фазовый состав псевдосплава в исходном состоянии включает в себя γ-(Ni, Cr, Fe), Al и Al₂O₃. Отжиг покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава в течение 20–60 мин приводит к выделению в нем интерметаллидных фаз Ni₂Al₃, NiAl, Al₃Ni и Ni₃Al, что, в свою очередь, обуславливает повышение твердости и микротвердости покрытий в 1,5–2,0 раза по сравнению с исходным состоянием.

Результаты триботехнических испытаний без смазочного материала покрытий из Ni-Cr-Al-псев-

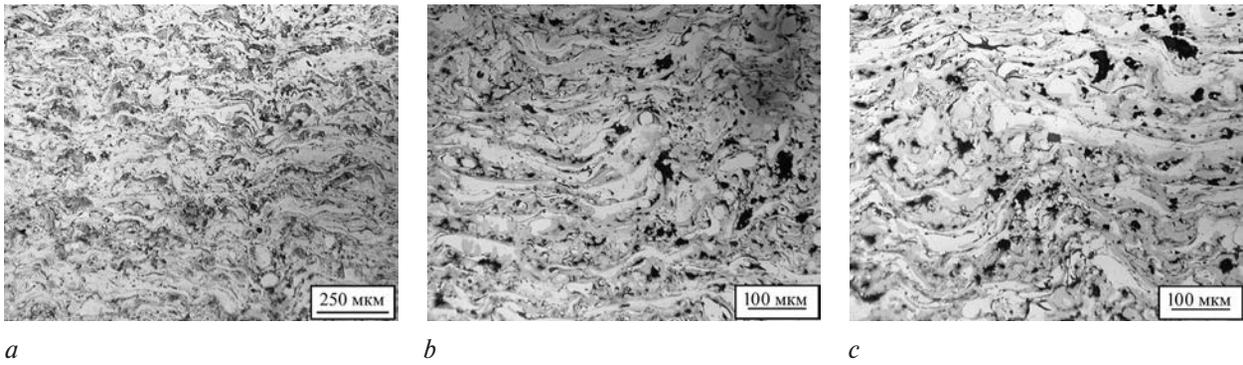


Рисунок 1 — Характерные микроструктуры напыленного покрытия из Ni-Cr-Al-псевдосплава:
 a — исходное состояние; b — после отжига при 600 °С в течение 20 мин; c — после отжига при 600 °С в течение 60 мин
Figure 1 — Characteristic microstructures of the deposited Ni-Cr-Al pseudoalloy coating:
 a — initial state; b — after annealing at 600 °C for 20 min; c — after annealing at 600 °C for 60 min

досплава, подвергнутых термической обработке по различным режимам, представлены в таблице 2. Интенсивность массового изнашивания I_q Ni-Cr-Al-покрытия в исходном состоянии составляет 28,7 мг/м. Из результатов испытаний можно видеть, что отжиг покрытий приводит к существенному повышению их износостойкости, что связано с образованием в них различного количества упрочняющих интерметаллидных соединений Al_3Ni , Ni_2Al_3 , Ni_3Al и $NiAl$. В частности, отжиг покрытий при относительно низкой температуре 550 °С (20–60 мин) приводит к повышению износостойкости в 1,5–2,5 раза, по сравнению с исходным состоянием. Это связано с образованием интерметаллидов Al_3Ni и Ni_2Al_3 , имеющих относительно пониженные механические характеристики [10–11]. Увеличение температуры отжига до 600–650 °С (20–60 мин) приводит к повышению износостойкости покрытий в 1,2–24,0 раза по сравнению с исходным состоянием. Указанное повышение износостойкости покрытий обусловлено тем, что в результате отжига при 600–650 °С и выдержке 20–60 мин образуется большее количество прочных интерметаллидных соединений с высоким содержанием никеля — Ni_3Al и $NiAl$.

На основании результатов триботехнических испытаний покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава, подвергнутых отжигу по различным режимам, проведен двухфакторный эксперимент с целью

Таблица 2 — Интенсивность массового изнашивания I_q газотермических покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава, подвергнутых отжигу при различной температуре и времени выдержки

Table 2 — Mass wear rate I_q of gas-thermal Ni-Cr-Al pseudoalloy coating subjected to annealing at different temperatures and holding times

| Время выдержки, мин | Интенсивность массового изнашивания $I_q, \times 10^{-3}$ мг/м | | |
|---------------------|--|------|-----|
| | Температура отжига, °С | | |
| | 550 | 600 | 650 |
| 20 | 19,3 | 16,6 | 2,3 |
| 40 | 13,0 | 3,2 | 1,4 |
| 60 | 11,5 | 1,2 | 1,5 |

установления оптимальных температурных и временных параметров отжига покрытий. Можно видеть, что зависимость I_q от температуры и времени выдержки нелинейна, поэтому описание функции отклика проводили с помощью полинома второй степени [7]. В результате проведенных расчетов получена следующая зависимость I_q от температуры и времени выдержки при отжиге:

$$I_q = 645,53 - 1,86T - 2,3615\tau + 0,00289T\tau + 0,00136T^2 + 0,00575\tau^2,$$

где T — температура отжига покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава, °С; τ — время отжига, мин. Графическое изображение полученной зависимости I_q покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава от температуры и времени выдержки при отжиге представлено на рисунке 2.

При анализе полученной математической модели зависимости интенсивности массового изнашивания при сухом трении покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава установлено, что максимальная износостойкость покрытий достигается в результате отжига при температурах 630–640 °С и времени выдержки 40–50 мин.

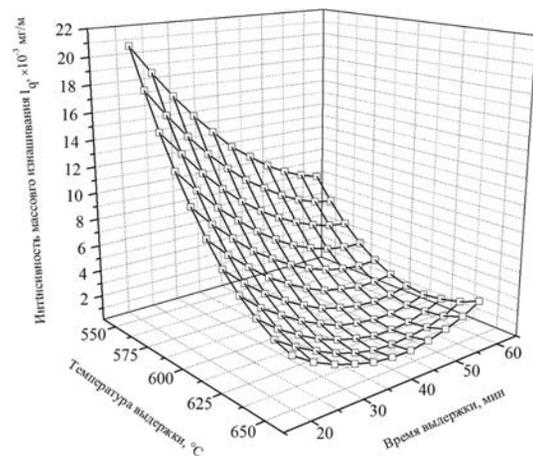


Рисунок 2 — Зависимость интенсивности массового изнашивания I_q покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава от температуры и времени отжига
Figure 2 — Dependence of mass wear rate I_q of Ni-Cr-Al pseudoalloy coatings on temperature and annealing time

Таким образом, можно сделать вывод, что отжиг газотермических покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава приводит к существенному возрастанию его твердости/микротвердости и износостойкости в условиях сухого трения. На основании результатов математического анализа даны рекомендации по режимам термической обработки Ni-Cr-Al-покрытий, приводящим к максимальному возрастанию их дюрOMETрических свойств и износостойкости.

Заключение. Исследованы триботехнические свойства напыленных методом высокоскоростной металлизации покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава в исходном состоянии, а также подвергнутых термической обработке.

Установлено, что отжиг покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава при температурах 550–650 °С в течение 20–60 мин приводит к повышению их износостойкости в условиях сухого трения в 1,4–24,0 раза по сравнению с исходным состоянием. Показано, что повышение износостойкости покрытий связано с образованием в них интерметаллидных соединений Al₃Ni, Ni₂Al₃, Ni₃Al и NiAl. Из анализа математической модели установлено, что минимальная интенсивность массового изнашивания покрытий из Ni-Cr-Al-псевдосплава достигается при отжиге в температурном интервале 630–640 °С и времени выдержки 40–50 мин, что связано с выделением в них большого количества дисперсных интерметаллидных фаз Ni₃Al и NiAl при относительно незначительном увеличении пористости покрытий.

Список литературы

1. Исследование структуры и свойств плазменных покрытий на основе Fe-Al // И.А. Селиверстов [и др.] / Науч. вестн. Херсонской гос. морской академии. — № 1(10). — 2014. — С. 249–254.
2. Композиционные материалы в технике / Д.М. Карпинос [и др.]. — Киев: Техніка, 1985. — 152 с.
3. Влияние горячей штамповки на структуру и свойства порошкового интерметаллида Fe₃Al [Электронный ресурс] / Г.А. Баглюк [и др.] // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. — 2014. — № 1. — С. 88–96. — Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rtvotmm_2014_1_14. — Дата доступа: 02.09.2020.
4. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. — Минск: Технопринт, 2004. — 200 с.
5. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволоочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 12. — С. 17–23.
6. Кукарко, В.А. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и износостойкость газотермических покрытий из железо-алюминиевых псевдосплавов / В.А. Кукарко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2019. — С. 294–298.
7. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
8. Криштал, М.А. Механизм диффузии в железных сплавах / М.А. Криштал. — М.: Металлургия, 1972. — 400 с.
9. Бокштейн, Б.С. Диффузия в металлах / С.Б. Бокштейн. — М.: Металлургия, 1978. — 248 с.
10. Влияние времени отжига газотермических покрытий из псевдосплава «X20H80+АД-1» на его структурно-фазовое состояние и твердость [Электронный ресурс] / М.А. Белоцерковский [и др.] // Инновационные технологии в машиностроении: электронный сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию машиностроительных спец. и 15-летию науч.-техн. парка ПГУ, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т; под ред. В.К. Шелега [и др.]. — Новополоцк, 2020. — С. 87–90. — Режим доступа: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/24802>. — Дата доступа: 01.09.2020.
11. Астрашаб, Е.В. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из псевдосплавов на основе X20H80 / Е.В. Астрашаб [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. — 2020. — Т. 7, № 1–2. — С. 138–144.

ASTRASHAB Evgeniy V.

Junior Researcher¹

E-mail: astrashabev@mail.ru

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

GRIGORCHIK Alexander N., Ph. D. in Eng.

Senior Researcher¹

E-mail: GrigorchikAN@gmail.com

KUKAREKO Vladimir A., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Chief of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products (of Collective Use)¹

E-mail: v_kukareko@mail.ru

SOSNOVSKIY Aleksey V., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher¹

E-mail: sosnovskij@inbox.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF THE ANNEALING ON THE WEAR RESISTANCE OF GAS-THERMAL COATINGS FROM Ni-Cr-Al PSEUDOALLOY

The structural-phase state and tribotechnical properties of gas-thermal coatings made of Ni-Cr-Al pseudoalloy are investigated in the initial state and after annealing in the temperature range of 550–650 °C with holding time of 20–60 min. It is shown that in coatings sprayed by the method of high-speed metallization of wires made of X20H80 (Kh20N80) and aluminum АД-1 (AD-1), the phase composition includes γ -(Ni, Cr, Fe), Al and Al_2O_3 . It is found that high-temperature annealing of Ni-Cr-Al coatings leads to the precipitation of intermetallic compounds Al_3Ni , Ni_2Al_3 , Ni_3Al , and $NiAl$ in them, as well as to an increase in the porosity of the coatings up to ≈ 15 –20 vol.%, which is associated with the implementation of the Frenkel and Kirkendall effects. Tribotechnical tests of coatings are carried out according to the scheme of the reciprocating movement of the sample along the plate counterbody in the dry friction mode at a load of 1.5 MPa. It is shown that as a result of the annealing of the coatings, an increase in their wear resistance under dry friction conditions is registered up to 24 times in comparison with the initial state. In particular, the intensity of mass wear of the Ni-Cr-Al coating in the initial state is 28.7×10^{-3} mg/m, and those subjected to annealing at 600 °C for 60 min — 1.2×10^{-3} mg/m. Based on the carried out multifactorial experiment, it is found that the maximum wear resistance of Ni-Cr-Al-pseudo-alloy coatings under dry friction conditions is achieved as a result of their annealing at temperatures of 630–640 °C and a holding time of 40–50 min, which is associated with the release of large number of dispersed intermetallic phases Ni_3Al and $NiAl$ with a relatively insignificant increase in the porosity of the coatings.

Keywords: gas-thermal spraying, pseudoalloy, annealing, intermetallic compounds, wear resistance

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-60-64>

References

- Seliverstov I.A., Trotsan G.N., Smirnov I.V., Seliverstova S.R. Issledovanie struktury i svoystv plazmennyykh pokrytiy na osnove Fe-Al [Researches of structure and properties of plasma spray coatings on the basis of Fe-Al]. *The scientific bulletin of Kherson state maritime academy*, no. 1(10), 2014, pp. 249–254 (in Russ.).
- Karpinos D.M., et al. *Kompozitsionnye materialy v tekhnike* [Composite materials in engineering]. Kiev, Tekhnika Publ., 1985. 152 p. (in Russ.).
- Bagliuk G.A., Tolochin O.I., Tolochina A.V., Kurikhin V.S., Yakovenko R.V. Vliyaniye goryachey shtampovki na strukturu i svoystva poroshkovogo intermetallida Fe_3Al [The effect of hot forging on structure and properties of Fe_3Al powder intermetallic bond]. *Resource-saving technologies for production and pressure*, 2014, no. 1, pp. 88–96. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rtvotmm_2014_1_14 (accessed 02 September 2020) (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A. *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplamnogo napyleniya antifriktsionnykh pokrytiy* [Technologies of activated gas-flame spraying of anti-friction coatings]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 200 p. (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S. Aktivirovannoe gazoplammennoe i elektrodugovoe napylenie pokrytiy provolochnyimi materialami [Activated gas-flame and electric arc spraying of coatings with wire materials]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2006, no. 12, pp. 17–23 (in Russ.).
- Kukareko V.A., Belotserkovsky M.A., Grigorchik A.N., Astrashab E.V., Sosnovskiy A.V. Vliyaniye otzhiga na strukturno-fazovoye sostoyaniye i iznosostoykost gazotermicheskikh pokrytiy iz zhelezo-alyuminiyevykh psevdosplavov [Effect of annealing on structural-phase state and wear resistance of gas-thermal coatings from iron-aluminum pseudoalloys]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 294–298 (in Russ.).
- Spiridonov A.A. *Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1981. 184 p. (in Russ.).
- Krishtal M.A. *Mekhanizm diffuzii v zheleznykh splavakh* [Mechanism of diffusion in iron alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 400 p. (in Russ.).
- Bokshiteyn B.S. *Diffuziya v metallakh* [Diffusion in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 248 p. (in Russ.).
- Belotserkovsky M.A., et al. Vliyaniye vremeni otzhiga gazotermicheskikh pokrytiy iz psevdosplava “Kh20N80+AD-1” na ego strukturno-fazovoye sostoyaniye i tverdst [Effect of annealing time of gas-thermal coatings made of pseudoalloy “X20H80+AD-1” (“Kh20N80+AD-1”) on its structural-phase state and hardness]. *Innovative technologies in mechanical engineering*, 2020, pp. 87–90. Available at: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/24802> (accessed 01 September 2020) (in Russ.).
- Astrashab E.V., Belotserkovsky M.A., Grigorchik A.N., Kukareko V.A. Vliyaniye otzhiga na strukturno-fazovoye sostoyaniye i tribotekhnicheskiye svoystva gazotermicheskikh pokrytiy iz psevdosplavov na osnove Kh20N80 [Influence of annealing on the structural-phase state and tribotechnical properties of hypersonic metallization coatings from falsely alloys based on Ni80Cr20]. *Actual problems in machine building*, 2020, vol. 7, no. 1–2, pp. 138–144 (in Russ.).