

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

Научная статья

УДК 621.793.09, 51-74.

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-1-5-11

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННО-НАПЫЛЕННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Пантелеенко Алексей Федорович

Белорусский национальный технический университет

*для корреспонденции: alex_1895@mail.ru



Аннотация.

В статье изучена интенсивность изнашивания плазменно-напыленных покрытий из самофлюсующегося порошка на основе сталей аустенитного класса. Показано влияние дополнительной лазерной обработки плазменно-напыленного покрытия. Также для определения оптимальных параметров процессов плазменного напыления и лазерной обработки проведено вычисление с использованием центрального ротатабельного композиционного плана 2-го порядка. Получено уравнение, связывающее параметры плазменного напыления и лазерной обработки с интенсивностью изнашивания.

Информация о статье

Поступила:

15 декабря 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 января 2022 г.

Принята к публикации:

25 февраля 2022 г.

Ключевые слова:

плазменное напыление,
диффузионно-легированный
порошок, интенсивность
изнашивания,
математическое
планирование

Для цитирования: Пантелеенко А.Ф. Оптимизация технологических параметров получения плазменно-напыленных износостойких покрытий // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 1 (149). С. 5-11. doi: 10.26730/1999-4125-2022-1-5-11

Актуальность работы: В настоящее время весьма активно ведутся исследования в областях упрочнения и восстановления деталей машин методами газотермического напыления, в частности плазменного напыления [1-6]. Проводится глубокое изучение мировых рынков и трендов развития с учетом влияния на экономические процессы COVID-19 [7]. Номенклатура деталей, которая упрочняется и восстанавливается плазменным напылением, весьма широка, но ее большую долю занимают детали, работающие в условиях абразивного изнашивания и воздействия агрессивных сред. По этой причине многие авторы [8-12] посвящают свои работы поведению деталей с плазменным упрочнением при абразивном изнашивании.

Таблица 1. Таблица ЦКРП в буквенном выражении

Table 1. CCRP table in alphabetical expression

№	X_1 Время борир, час	X_2 Скорость, мм/мин	X_3 Диаметр луча лазера, мм	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y Средняя интенсивность изнашивания, мм ³ /км	Примеча- ние
1.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Y1	ПФЭ
2.	+	+	-	+	-	-	+	+	+	Y2	
3.	+	-	+	-	+	-	+	+	+	Y3	
4.	-	+	+	-	-	+	+	+	+	Y4	
5.	+	-	-	-	-	+	+	+	+	Y5	
6.	-	-	+	+	-	-	+	+	+	Y6	
7.	-	+	-	-	+	-	+	+	+	Y7	
8.	-	-	-	+	+	+	+	+	+	Y8	
9.	-1.682	0	0	0	0	0	0	0	0	Y9	Звездные точки
10.	+1.682	0	0	0	0	0	0	0	0	Y10	
11.	0	-1.682	0	0	0	0	0	0	0	Y11	
12.	0	+1.682	0	0	0	0	0	0	0	Y12	
13.	0	0	-1.682	0	0	0	0	0	0	Y13	
14.	0	0	+1.682	0	0	0	0	0	0	Y14	
15.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y15	Опыты в нулевой точке
16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y16	
17.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y17	
18.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y18	
19.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y19	
20.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y20	

Таблица 2. Таблица ЦКРП в числовом выражении

Table 2. CCRP table in numerical terms

№	X_1 Время борир, час	X_2 Скорость, мм/мин	X_3 Диаметр луча лазера, мм	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y Средняя интенсивность изнашивания, мм ³ /км	Примеча- ние
1.	5	300	2	+	+	+	+	+	+	0,004102	ПФЭ
2.	5	300	1	+	-	-	+	+	+	0,004745	
3.	5	200	2	-	+	-	+	+	+	0,004566	
4.	1	300	2	-	-	+	+	+	+	0,004246	
5.	5	200	1	-	-	+	+	+	+	0,00484	
6.	1	200	2	+	-	-	+	+	+	0,004654	
7.	1	300	1	-	+	-	+	+	+	0,004939	
8.	1	200	1	+	+	+	+	+	+	0,005149	
9.	0	250	1.5	0	0	0	0	0	0	0,0242	Звездны- е точки
10.	6,37	250	1.5	0	0	0	0	0	0	0,006368	
11.	3	165,9	1.5	0	0	0	0	0	0	0,00242	
12.	3	334,1	1.5	0	0	0	0	0	0	0,002847	
13.	3	250	0,659	0	0	0	0	0	0	0,002469	
14.	3	250	2,341	0	0	0	0	0	0	0,002951	
15.	3	250	1,5	0	0	0	0	0	0	0,00263	Опыты в нулевой точке
16.	3	250	1,5	0	0	0	0	0	0	0,002689	
17.	3	250	1,5	0	0	0	0	0	0	0,002659	
18.	3	250	1,5	0	0	0	0	0	0	0,002659	
19.	3	250	1,5	0	0	0	0	0	0	0,00263	
20.	3	250	1,5	0	0	0	0	0	0	0,002659	

Цель работы: определить интенсивность изнашивания плазменно-напыленных покрытий из диффузионно-легированных порошков на основе сталей аустенитного класса, выявить зависимость между интенсивностью изнашивания и параметрами процесса плазменного напыления и лазерной обработки.

Методика изготовления образцов и проведения испытаний, расчетов.

Исходные материалы: 1) порошок из стали аустенитного класса ПР-Х18Н9; 2) порошок из стали аустенитного класса ПР-Х18Н9, диффузионно-легированный бором в течение 1 и 3 часов. Напыление износостойкого слоя из диффузионно-легированных порошков аустенитной стали толщиной 0,4-0,5 мм проводилось на оптимизированных режимах: сила тока $I = 350$ А; дистанции напыления $L = 70 \dots 100$ мм; напряжение $U = 65 \dots 70$ В на установке УПУ-3Д [13].

Дополнительная лазерная обработка напыленных покрытий проводилась на установке «Комета-2» на следующих режимах: скорость обработки $V = 165,9 \dots 334,1$ мм/мин; диаметр лазерного луча $d = 0,659 \dots 2,341$ мм.

Исследования интенсивности изнашивания полученных образцов проводились по схеме Шкода-Савина.

Для оптимизации технологических параметров получения плазменно-напыленного износостойкого покрытия с дополнительной высокоэнергетической обработкой был использован расчет по центральному композиционному ротатабельному плану 2-го порядка (ЦКРП). Расчеты и вычисления проводились согласно работам [14-17].

В таблицах 1 и 2 представлен ЦКРП в буквенном и числовом выражениях.

В общих случаях расчеты для определения численных значений величин проводятся по следующей методике.

В общем случае при наличии n_0 точек в центре плана и повторении эксперимента v раз в каждой точке матрицы X оценка дисперсии единичного эксперимента S_e^2 определяется по формуле:

$$S_e^2 = \frac{S_e}{\varphi_2}$$

где

$$S_e = \sum_{j=1}^{2^n+2n} \sum_{i=1}^v (\tilde{y}^j - \tilde{y}^{ji})^2 + \sum_{j=1}^{n_0} \sum_{i=1}^v (\tilde{y}^0 - \tilde{y}^{2^n+2n+j,i})^2$$

Здесь

$$\begin{aligned} \tilde{y}^0 &= \frac{1}{n_0 v} \sum_{j=1}^{n_0} \sum_{i=1}^v \tilde{y}^{2^n+2n+j,i} \\ \varphi_2 &= (2^{n-p} + 2n)(v - 1) + vn_0 - 1 \end{aligned}$$

Расчетные формулы для оценок коэффициентов и их дисперсий, удобные для ручного счета:

$$\begin{aligned} \hat{a}_1 &= \begin{cases} \frac{A}{N} [2\lambda_1(n+2)(O\tilde{y}) - 2\lambda_2\lambda_1 \sum_{i=1}^n (jj\tilde{y})], & i = 0, \\ \frac{\lambda_2}{N} (i\tilde{y}), & i = 1, 2 \dots, n \end{cases} \\ \tilde{a}_{n+1} &= \frac{A}{N} \{ \lambda_2^2 [(n+2)\lambda_1 - n] (ii\tilde{y}) + \lambda_2^2 (1 - \lambda_1) \sum_{j=1}^n (jj\tilde{y}) \} - 2\lambda_1\lambda_2(O\tilde{y}) \}, \\ &\quad i = 1, 2 \dots, n, \\ \tilde{a}_{2n+j} &= \frac{\lambda_2^2}{N\lambda_2}, j = 1, 2, \dots, R-2n \text{ (коэффициент при } x_i x_j) \end{aligned}$$

Здесь приняты обозначения:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{2^n N}{(2^n + 2\alpha^2)^2} \\ \lambda_2 &= \frac{N}{2^n + 2\alpha^2} \\ A &= \frac{1}{2\lambda_1[(n+2)\lambda_1 - n]} \end{aligned}$$

Кроме того, введены обозначения:

$$\begin{aligned} (O\tilde{y}) &= \sum_{j=1}^N \tilde{y}^j; \\ (i\tilde{y}) &= \sum_{j=1}^N x_i^j \tilde{y}^j \\ (ij\tilde{y}) &= \sum_{j=1}^N x_i^j x_j^j \tilde{y}^j; \end{aligned}$$

Соответственно для дисперсий имеем следующие выражения:

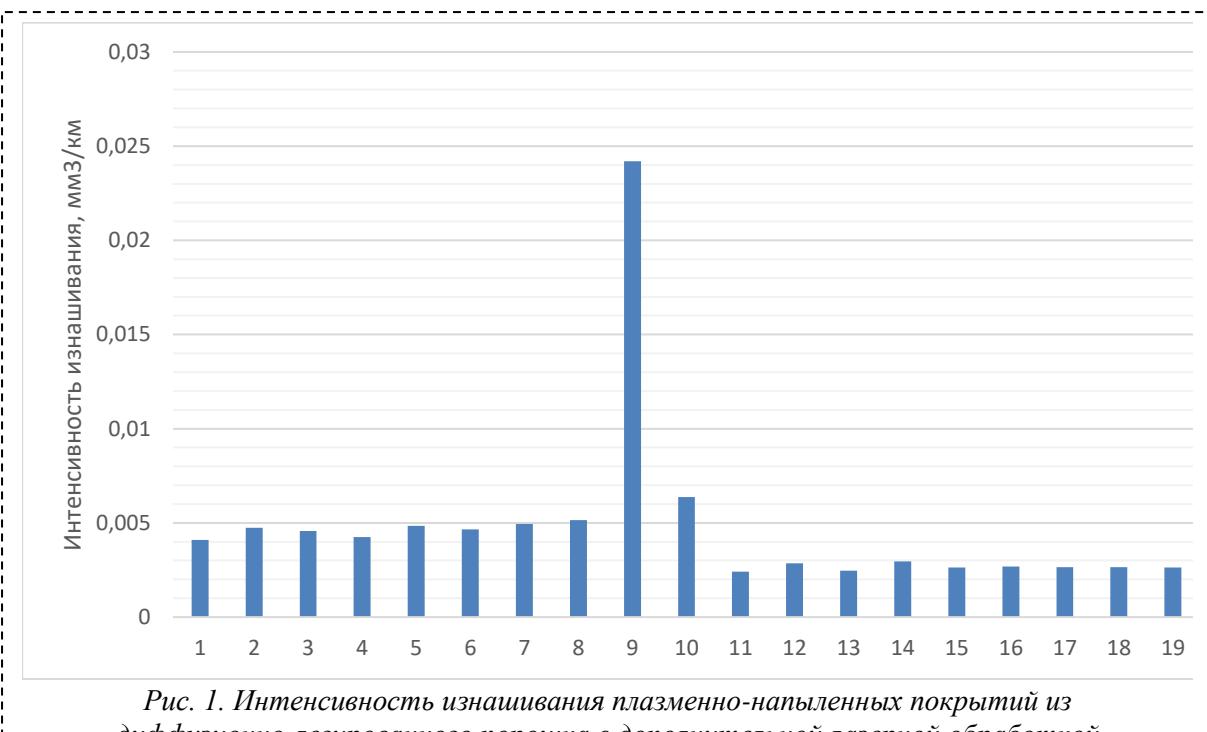


Рис. 1. Интенсивность изнашивания плазменно-напыленных покрытий из диффузионно-легированного порошка с дополнительной лазерной обработкой
Fig. 1. Wear rate of plasma-sprayed coatings made of diffusion-doped powder with additional laser processing

$$s_i^2 = \begin{cases} 2 \frac{A}{N} \lambda_1^2 (n+2) s^2, & i = 0, \\ \frac{\lambda_2}{N} s^2, & i = 1, 2, \dots, n, \\ \frac{A}{N} [(n+1)\lambda_1 - (n-1)] \lambda_2^2 s^2, & i = n+1, \dots, 2n, \\ \frac{\lambda_2^2}{N \lambda_1} s^2, & i = 2n+1, \dots, R. \end{cases}$$

Где s^2 – оценка дисперсии значений \bar{y} (дисперсии наблюдений) с числом степеней свободы $\varphi_2 = (2^n + 2n)(v-1) + vn_0 - 1$, равная

$$s^2 = \frac{s_e^2}{v}$$

Математическая модель выражается формулой следующего вида:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n + a_{n+1} x_1^2 + \dots + a_{2n} x_n^2 + a_{2n+1} x_1 x_2 + \dots + a_R x_{n-1} x_n$$

Результаты: данные, характеризующие интенсивность изнашивания образцов при трении скольжения, представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 и таблицы 2 очевидно, что наименьшей интенсивностью изнашивания обладают плазменные покрытия, полученные из порошка на основе сталей аустенитного класса, диффузионно-легированного в течение 3 часов (6,03% В), при скорости напыления $V = 165,9 \dots 334,1 \text{ мм/мин}$; диаметре лазерного луча $0,659 \dots 2,341 \text{ мм}$.

В результате обработки массива данных (таблица 2) по методике, приведенной в статье ранее, мы получаем формулу, описывающую зависимость интенсивности изнашивания от параметров процесса получения и обработки покрытий.

$$\hat{y} = 0,002709 - 0,00225x_1 - 0,000034x_2 - 0,000095x_3 + 0,002001x_1^2 - 0,000269x_2^2 - 0,000255x_3^2 - 0,000013x_1x_2 - 0,000013x_1x_3 - 0,000013x_2x_3$$

Из зависимости ясно следует, что определяющим фактором, влияющим на интенсивность изнашивания, является содержание бора в порошке для напыления. Наименьшей интенсивностью изнашивания обладают покрытия плазменно-напыленные из диффузионно-легированного в течение 3 часов порошка (содержание В 6,03%).

Выводы:

1) Установлено снижение интенсивности изнашивания в 10,01 раз по сравнению с исходным образцом стали 12Х18Н10 при нанесении плазменно-напыленного покрытия из порошка, борированного в течение 3 часов (6,03% В), после лазерной обработки с $V= 165,9$ мм/мин; диаметром лазерного луча 1,5 мм.

2) Установлена зависимость интенсивности изнашивания покрытия от параметров процесса его плазменного напыления и лазерной обработки. Эта зависимость выражается формулой, которая позволила определить оптимальные с точки зрения минимальной интенсивности изнашивания режимы процесса плазменного напыления с последующей лазерной обработкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Samukawa S. [et al.] The 2012 Plasma Roadmap // Journal of Physics D: Applied Physics. 2012. Vol. 45. 253001.
2. Vardelle A. [et al.] The 2016 Thermal Spray Roadmap // Journal of Thermal Spray Technology. 2016. Vol. 25 (8). P. 1376-1440.
3. Armada S. [et al.]. Future development of thermal spray coatings: types, designs, manufacture and applications / edited by Nuria Espallargas. 1st edition. Woodhead Publishing, 2015. 300 p.
4. Пантелейенко Ф. И., Оковитый В. А. Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов. Минск : БНТУ, 2019. 231 с.
5. Пантелейенко Ф. И. Самофлюсирующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. Минск : УП «Технопринт», 2001. 300 с.
6. Vuoristo P. Thermal spray coating processes // Comprehensive materials processing. Coatings and films; edited by D. Cameron. 1st edition. Elsevier Ltd., 2014, Vol. 4. P 229–276.
7. Thermal spray market – growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022-2027) / Mordor Intelligence [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/thermal-spray-market>. – Date of access: 07.02.2022.
8. Stewart D. A., Shipway P. H., McCartney D. G. Influence of heat treatment on the abrasive wear behaviour of HVOF sprayed WC-Co coatings // Surface and Coatings Technology. 1998. Vol. 105. P. 13-24.
9. Barik R. C. [et al.] Erosion and erosion-corrosion performance of cast and thermally sprayed nickel-aluminium bronze // Wear. 2005. Vol. 259. P. 230–242.
10. Bergmann C. P., Vicenzi J. Protection against erosive wear using thermal sprayed cermet: A review. Berlin : Springer, 2011. 82 p.
11. Huang C. B., Du L. Z., Zhang W. G. Friction and wear characteristics of plasma-sprayed self-lubrication coating with clad powder at elevated temperatures up to 8000C // Journal of Thermal Spray Technology. 2014. Vol. 23(3). P. 463–469.
12. Liu E. Y. [et al.] Effect of the synergetic action on tribological characteristics of Ni-Based composites containing multiple-lubricants // Tribology Letters. 2012. Vol. 47. P. 399–408.
13. Пантелейенко А. Ф., Девойно О. Г. Композиционные покрытия, полученные высокоэнергетическими методами. // Перспективные материалы и технологии. Коллективная монография. Под ред. В.В.Клубовича. - . Витебск : Изд-во УО «ВГТУ», 2013 г. Гл. 28. С. 587–607.
14. Голубцова Е. С., Каледин Б. А., Каледина Н. Б. Основы научных исследований в порошковой металлургии и сварке: учебное пособие. Минск : БНТУ, 2008. 240 с.
15. Берикашвили В. Ш., Оськин С. П. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Юрайт, 2019. 164 с.
16. Евдокимов А. Н., Курзин А. В. Моделирование химико-технологических процессов (экспериментально-статистические модели): учебное пособие. СПб : ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. 106 с.

17. Барвинок В. А., Бордаков П. В. Математическое планирование эксперимента в производстве летательных аппаратов: Учеб. Пособие. Куйбышев: Авиац. ин-т Куйбышев, 1990. 64 с.

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Пантелейенко Алексей Федорович, старший преподаватель кафедры «Материаловедение в машиностроении», Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), alex_1895@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Пантелейенко А.Ф. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

THE OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF OBTAINING PLASMA-SPRAYED WEAR-RESISTANT COATINGS

Alexey F. Panteleenko

Belarusian National Technical University

*for correspondence: alex_1895@mail.ru



Abstract.

The article studies the wear rate of plasma-sprayed coatings from self-fluxing powder based on austenitic steels. The effect of additional laser processing of a plasma-sprayed coating is shown. Also, to determine the optimal parameters of the processes of plasma spraying and laser processing, a calculation was carried out using a central rotatable composition plan of the 2nd order. An equation that relates the parameters of plasma spraying and laser processing with wear rate is obtained.

Article info

Submitted:

15 December 2021

Approved after reviewing:

30 January 2022

Accepted for publication:

25 February 2022

Keywords: plasma spraying, diffusion-alloyed powder, wear rate, mathematical planning.

For citation Panteleenko A.F. The optimization of technological parameters of obtaining plasma-sprayed wear-resistant coatings. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022; 1(149):5-11. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-1-5-11

REFERENCES

1. Samukawa S. [et al.] The 2012 Plasma Roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012; 45:253001.
2. Vardelle A. [et al.] The 2016 Thermal Spray Roadmap. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2016; 25 (8):1376-1440.
3. Armada S. [et al.] Future development of thermal spray coatings: types, designs, manufacture and applications; edited by Nuria Espallargas. – 1st edition. Woodhead Publishing, 2015. 300 p.

4. Panteleenko F. I., Okovityy V. A. Formirovaniye mnogofunktional'nykh plazmennykh pokrytiy na osnove keramicheskikh materialov. Minsk: BNTU; 2019. 231 s. (rus)
5. Panteleenko F. I. Samoflyusuyushchiesya diffuzionno-legirovannye poroshki na zheleznoy osnove i zashchitnye pokrytiya iz nikh. Minsk: UP «Tekhnoprint»; 2001. 300 s. (rus)
6. Vuoristo P. Thermal spray coating processes. *Comprehensive materials processing. Coatings and films; edited by D. Cameron.* 2014; 4:229–276.
7. Thermal spray market – growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022-2027) / Mordor Intelligence [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/thermal-spray-market> – Date of access: 07.02.2022.
8. Stewart D. A., Shipway P. H., McCartney D. G. Influence of heat treatment on the abrasive wear behaviour of HVOF sprayed WC-Co coatings. *Surface and Coatings Technology.* 1998; 105:13-24.
9. Barik R. C. [et al.] Erosion and erosion–corrosion performance of cast and thermally sprayed nickel–aluminium bronze. *Wear.* 2005; 259:230–242.
10. Bergmann C. P., Vicenzi J. Protection against erosive wear using thermal sprayed cermet: A review. Berlin: Springer; 2011. – 82 p.
11. Huang C. B., Du L. Z., Zhang W. G. Friction and wear characteristics of plasma-sprayed self-lubrication coating with clad powder at elevated temperatures up to 8000C. *Journal of Thermal Spray Technology.* 2014; 23(3):463–469.
12. Liu E. Y. [et al.] Effect of the synergetic action on tribological characteristics of Ni-Based composites containing multiple-lubricants. *Tribology Letters.* 2012; 47:399–408.
13. Panteleenko A. F., Devoyno O. G. Kompozitsionnye pokrytiya, poluchennye vysoko-energeticheskimi metodami [Composite coatings obtained by high-energy methods]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii [Perspective materials and technologies].* Kollektivnaya monografiya. Pod red. V.V.Klubovicha. Vitebsk: Izd-vo UO «VGTU»; 2013, g. Gl. 28. S. 587–607.
14. Golubtsova E. S., Kaledin B. A., Kaledina N. B. Osnovy nauchnykh issledovaniy v poroshkovoy metallurgii i svarke: uchebnoe posobie. Minsk: BNTU; 2008. 240 s. (rus)
15. Berikashvili V. Sh., Os'kin S. P. Statisticheskaya obrabotka dannykh, planirovaniye eksperimenta i sluchaynye protsessy: uchebnoe posobie dlya bakalavriata i magistratury (2-e izd., ispr. i dop.) Moscow: Yurayt; 2019. 164 s. (rus)
16. Evdokimov A. N., Kurzin A. V. Modelirovaniye khimiko-tehnologicheskikh protsessov (eksperimental'no-statisticheskie modeli): uchebnoe posobie. Saint-Petersburg: VShTE SPbGUPTD; 2018. 106 s. (rus)
17. Barvinok V. A., Bordakov P. A. Matematicheskoe planirovaniye eksperimenta v proizvodstve letatel'nykh apparatov: Ucheb. Posobie. Kuybyshev, aviats. in-t Kuybyshev; 1990. 64 s. (rus)

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexey F. Panteleenko, Senior Lecturer of the Department “Materials Science in Mechanical Engineering”, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), alex_1895@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexey F. Panteleenko – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.