

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



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

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 ротатбельного композиционного плана 2-го порядка. Получено уравнение, связывающее параметры плазменного напыления и лазерной обработки с интенсивностью изнашивания.

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; дистанция напыления $L = 70...100$ мм; напряжение $U = 65-70$ В на установке УПУ-3Д [13].

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

$$\tilde{y}^0 = \frac{1}{n_0 v} \sum_{j=1}^{n_0} \sum_{i=1}^v \tilde{y}^{2^n+2n+j,i}$$

$$\varphi_2 = (2^{n-p} + 2n)(v - 1) + vn_0 - 1$$

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

$$\hat{a}_1 = \begin{cases} \frac{A}{N} [2\lambda_1(n+2)(O\tilde{y}) - 2\lambda_2\lambda_1 \sum_{i=1}^n (ij\tilde{y})], & i = 0, \\ \frac{\lambda_2}{N} (i\tilde{y}), & i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

$$\tilde{a}_{n+1} = \frac{A}{N} \{ \lambda_2^2 [(n+2)\lambda_1 - n](ii\tilde{y}) + \lambda_2^2 (1 - \lambda_1) \sum_{j=1}^n (jj\tilde{y}) \} - 2\lambda_1\lambda_2(O\tilde{y}),$$

$$i=1, 2, \dots, n,$$

$$\tilde{a}_{2n+j} = \frac{\lambda_2^2}{N\lambda_2}, j=1, 2, \dots, R-2n \text{ (коэффициент при } x_i x_j)$$

Здесь приняты обозначения:

$$\lambda_1 = \frac{2^n N}{(2^n + 2\alpha^2)^2}$$

$$\lambda_2 = \frac{N}{2^n + 2\alpha^2}$$

$$A = \frac{1}{2\lambda_1[(n+2)\lambda_1 - n]}$$

Кроме того, введены обозначения:

$$(O\tilde{y}) = \sum_{j=1}^N \tilde{y}^j ;$$

$$(i\tilde{y}) = \sum_{j=1}^N x_i^j \tilde{y}^j$$

$$(ij\tilde{y}) = \sum_{j=1}^N x_i^j x_j^j \tilde{y}^j ;$$

Соответственно для дисперсий имеем следующие выражения:

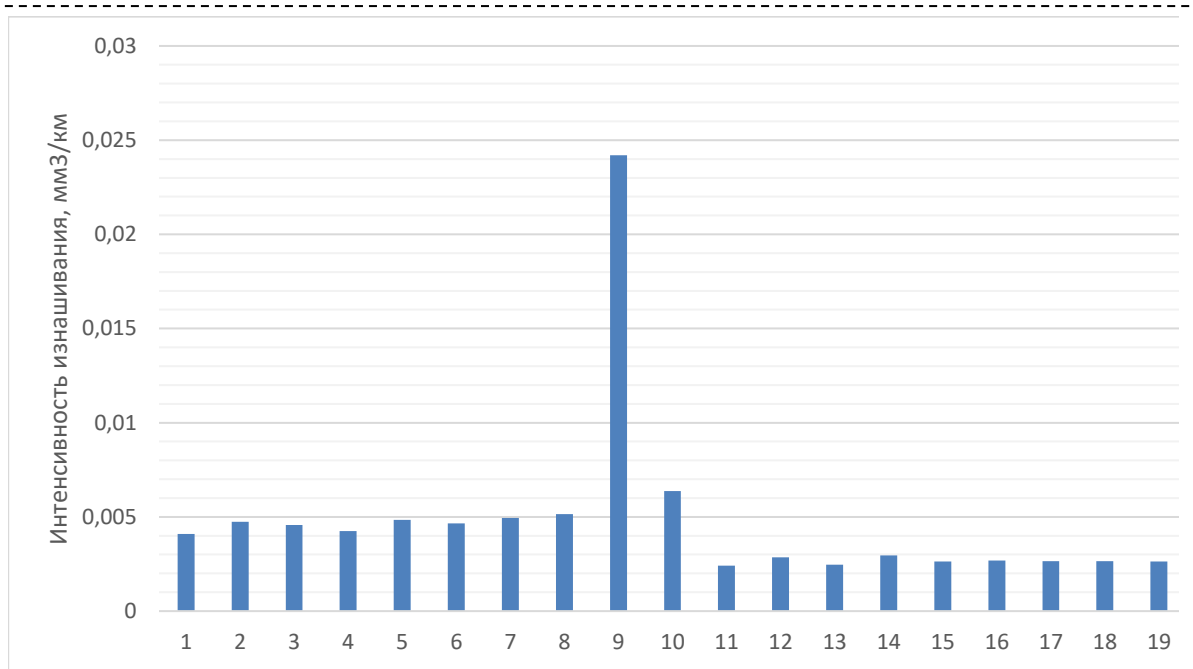


Рис. 1. Интенсивность изнашивания плазменно-напыленных покрытий из диффузионно-легированного порошка с дополнительной лазерной обработкой
 Fig. 1. Wear rate of plasma-sprayed coatings made of diffusion-doped powder with additional laser processing

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

Где s^2 – оценка дисперсии значений \bar{y} (дисперсии наблюдений) с числом степеней свободы $\nu_2 = (2^n + 2n)(\nu - 1) + \nu n_0 - 1$, равная

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

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 $V = 165,9 \dots 334,1$ мм/мин; диаметре лазерного луча $0,659 \dots 2,341$ 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. Пантелеев Ф. И., Оковитый В. А. Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов. Минск : БНТУ, 2019. 231 с.
5. Пантелеев Ф. И. Самофлюсующиеся 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. Пантелеев 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:

Пантелеенко 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:

Пантелеенко 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



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.

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.

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. Formirovanie mnogofunktional'nykh plazmennyykh pokrytiy na osnove keramicheskikh materialov. Minsk: BNTU; 2019. 231 s. (rus)
5. Panteleenko F. I. Samoflyusuyushchiesya diffuzionno-legirovannyye 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, poluchennyye vysoko-energeticheskimi metodami [Composite coatings obtained by high-energy methods]. *Perspektivnyye 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, planirovanie 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. Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov (eksperimental'no-statisticheskie modeli): uchebnoe posobie. Saint-Petersburg: VShTE SPbGUPTD; 2018. 106 s. (rus)
17. Barvinok V. A., Bordakov P. A. Matematicheskoe planirovanie 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.