

УДК 621.793.71

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
ПОД НАПЫЛЕНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

©Дерябкина Е. С.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

Дерябкина Євгенія Станіславівна: ORCID: 0000-0002-5531-0124; 216464g@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Представлены результаты аналитического исследования параметров щеточной обработки поверхности деталей средств транспорта типа «вал» под нанесение восстановительных газопламенных покрытий для обеспечения максимальной прочности сцепления покрытия с основой, с использованием математической теории планирования эксперимента. Для аналитического исследования были выбраны следующие параметры: диаметр иголок вращающейся щетки (мм), свободная длина игл (мм), скорость вращения щетки (об/мин), плотность расположения игл (шт/см²).

Эксперименты показали, что такая случайная характеристика как прочность сцепления приближённо может быть описана нормальным законом распределения, и область её максимума может находиться при значениях диаметра иголок от 0,35 до 0,95 мм со свободными длинами иглы от 30 до 70 мм и при количестве оборотов от 800 до 2500 об/мин, а также при плотности расположения от 20 до 40 шт/см². Определены максимальные значения прочности сцепления в нулевом уровне. Математическая модель в виде полинома позволяет дать количественную оценку влияния каждого фактора на функцию отклика. Для нахождения экстремальных значений использован определитель. Достоверность результатов аналитических исследований подтверждается результатами экспериментальных исследований и промышленных испытаний.

Ключевые слова: газопламенное напыление; прочность сцепления; щеточная обработка; параметры; оптимальные значения.

Дерябкина Є. С. «Оптимізація параметрів обробки поверхні деталей під нанесення відновлювальних покриттів».

Представлені результати аналітичного дослідження параметрів щіткової обробки поверхні деталей засобів транспорту типу «вал» під нанесення відновлювальних газополумєневих покриттів для забезпечення максимальної міцності зчеплення покриття з основою, з використанням математичної теорії планування експерименту. Для аналітичного дослідження були обрані наступні параметри: діаметр голок щітки, що обертається (мм), вільна довжина голок (мм), швидкість обертання щітки (об/хв), щільність розташування голок (шт/см²).

Експерименти показали, що така випадкова характеристика як міцність зчеплення приблизно може бути описана нормальним законом розподілу, і область її максимуму може перебувати при значеннях діаметра голок від 0,35 до 0,95 мм з вільними довжинами голки від 30 до 70 мм і при кількості оборотів від 800 до 2500 об/хв, а також при щільності розташування від 20 до 40 шт/см². Визначено максимальні значення міцності зчеплення в нульовому рівні. Математична модель у вигляді полінома дозволяє дати кількісну оцінку впливу кожного фактора на функцію відгуку. Для знаходження екстремальних значень

використаний визначник. Достовірність результатів аналітичних досліджень підтверджується результатами експериментальних досліджень і промислових випробувань.

Ключові слова: газополуменеве напилювання; міцність зчеплення; щіткова обробка; параметри; оптимальні значення.

Deryabkina E. “Optimization of parameters of processing of surface of details for restorative coatings”.

The results of an analytical study of the parameters of the brush surface treatment of the details of the transport means of the "shaft" type for the application of reducing gas-flame coatings are provided to ensure maximum adhesion strength of the coating to the substrate, using the mathematical theory of experimental design. For the analytical study, the following parameters were chosen: diameter of the rotating brush needles (mm), free needle length (mm), brush rotation speed (rpm), needle density (pcs/cm²).

Experiments have shown that such a random characteristic as the adhesion strength can approximately be described by the normal distribution law and its maximum region can be found with needle diameters from 0.35 to 0.95 mm with free needle lengths from 30 to 70 mm and at the number of revolutions from 800 to 2500 rpm, and also with a density of the location of 20 to 40 pieces/cm². The maximum values of adhesion strength in the zero level are determined. The mathematical model in the form of a polynomial allows to give a quantitative estimate of the influence of each factor on the response function. A determinant is used to find the extremal values. The reliability of the results of analytical studies is confirmed by the results of experimental studies and industrial tests.

Key words: flame spraying; adhesion strength; brush processing; parameters; optimal values.

1. Актуальность

На сегодняшний день существует более 150 технологий восстановительного ремонта деталей средств транспорта, сюда же относятся технологии нанесения покрытий, позволяющие придать новые служебные свойства материалам и продлить срок службы готовых изделий. Одним из перспективных способов нанесения покрытий остается газотермическое напыление (ГТН) [1-4], и в первую очередь покрытия, нанесенные газопламенным способом.

2. Постановка проблемы

Эффективное использование современных технологий нанесения покрытий основано на возможности управления заданными свойствами, обеспечивающих максимальную прочность и долговечность покрытий при минимальной стоимости. Повсеместно отмечается, что их фазовый состав и структура, механические и эксплуатационные свойства изменяются, являясь функциями технологических параметров процесса нанесения покрытий. Высокая чувствительность механических характеристик покрытия и основы к режимам нанесения и упрочнения требует оптимизации ведения технологического процесса [5, 6].

Одной из важнейших характеристик нанесения покрытий является прочность их сцепления с основой. В процессе газопламенного напыления не происходит сплавления частиц напыляемого материала с основой, потому, на её поверхности искусственно формируют шероховатость для обеспечения механического сцепления напыляемых частиц с микронеровностями основы. Повышение прочности сцепления достигается за счет увеличения площади взаимодействия частиц покрытия с поверхностью детали [5].

Для получения развернутого регулируемого профиля поверхности применена механическая обработка щеточным инструментом. Это связано с тем, что щеточная обработка, в отличие от большинства способов поверхностного упрочнения, не требует относительно высоких температур, длительности обработки, не оказывает влияния на структуру сердцевины детали и не вносит существенных изменений в технологию нанесения покрытия [7, 8]. Причем поскольку для щеточной обработки можно использовать ручной электрический или пневматический инструмент этот метод может найти широкое применение как в условиях завода, так и на ремонтных полевых базах при восстановлении деталей комбайнов и тракторов.

3. Цель исследований установить влияние параметров щеточной обработки поверхности при восстановлении деталей типа «вал» на прочность сцепления напыленных покрытий и определить область их оптимальных значений для обеспечения повышения прочности сцепления напыленного покрытия с основой.

4. Основной материал

Современные процессы нанесения покрытий характеризуются высоким уровнем сложности и взаимной обусловленности технологических параметров. В качестве основных управляемых факторов, определяющих качество упрочняемого покрытия, выделим технологические параметры щетки и скорости её вращения. Эффективное использование предлагаемой технологии основано на возможности нанесения покрытий с заданными свойствами, обеспечивающими соотношение механических характеристик в композиции как можно ближе к оптимальным.

Правильный выбор совокупности технологических параметров играет важную роль для получения качественных покрытий. Современные экспериментально-статистические методы планирования и анализа эксперимента эффективны при изучении сложных многофакторных процессов, требующих значительных материальных затрат и длительных сроков. Такими параметрами выбраны: x_1 - диаметр иглол вращающейся щетки (мм), x_2 – свободная длина игл (мм), x_3 - скорость вращения щетки (об/мин), x_4 – плотность расположения игл (шт/см²).

Так как необходимо найти оптимальные значения факторов, то область оптимума должна описываться как минимум уравнением второго порядка:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

Для получения математической модели области оптимума в виде уравнения (1) используются специальные планы [5]. Применим композиционный план ортогонального эксперимента для четырёх факторов, приведенный в табл. 1. Применяя ортогонализацию, введено преобразование.

$$x'_i = x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2, \quad (2)$$

где число экспериментов $N = 25$.

Коэффициенты уравнения регрессии (1) для центрального композиционного ортогонального плана определяются по формулам [9]:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N x'_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N (x'_i)^2} \quad (3)$$

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты эксперимента

Наименование		Факторы				Переменное состояние у
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	
Нулевой уровень		65	50	1650	30	
Интервал варьирования		30	20	850	10	
Опыты	x ₀	План				
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	
1	+1	-1	-1	-1	-1	22
2	+1	+1	-1	-1	-1	22,8
3	+1	-1	+1	-1	-1	21
4	+1	+1	+1	-1	-1	21,5
5	+1	-1	-1	+1	-1	23,2
6	+1	+1	-1	+1	-1	26,1
7	+1	-1	-1	-1	+1	22,3
8	+1	+1	-1	-1	+1	23,3
9	+1	-1	+1	-1	+1	21,5
10	+1	+1	+1	-1	+1	21,9
11	+1	-1	-1	+1	+1	23,6
12	+1	+1	-1	+1	+1	26,8
13	+1	-1	+1	+1	+1	22,3
14	+1	+1	+1	+1	+1	23,1
15	+1	-1,414	0	0	0	23,2
16	+1	+1,414	0	0	0	26,6
17	+1	0	-1,414	0	0	26,4
18	+1	0	+1,414	0	0	23,6
19	+1	0	0	-1,414	0	23,5
20	+1	0	0	+1,414	0	26,7
21	+1	0	0	0	-1,414	25,5
22	+1	0	0	0	+1,414	26,5
23	+1	0	0	0	0	26,4

Дисперсия коэффициентов регрессии рассчитывается по формулам [9]:

$$s_{b_0}^2 = \frac{s_0^2}{N}; \quad s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad s_{b_{ij}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}; \quad s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N (x'_i)^2}, \quad (4)$$

где s_0^2 – ошибка опыта, которая определяется по формуле:

$$s_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{k=1}^{N_0} (y_{0k} - \bar{y}_0)^2, \quad (5)$$

где N_0 – число экспериментов в центре плана; \bar{y}_0 – среднее значение этих экспериментов.

Дисперсия свободного члена b_0 оценивается по формуле:

$$s_{b_0}^2 = s_{b_0}^2 + \frac{16}{25} \sum_{u=1}^N s_{b_u}^2. \quad (6)$$

Дисперсия адекватности s_{ad}^2 определяется по формуле:

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N - l} \sum_{u=1}^N (y_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (7)$$

где l – число членов в уравнении регрессии, оставшихся после оценки значимости.

Адекватность уравнения (1) определяется с помощью критерия Фишера [10]:

$$F_p = \frac{S_{ao}^2}{S_0^2}, \quad (8)$$

где условие адекватности $F_p < F_T(\alpha, N-l, N_0-1)$ и F_T – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости α .

Для нахождения экстремальных значений x_i по модели (1) с оставшимися членами как не исключёнными необходимо найти частные производные этой модели и приравнять их к нулю. Решая полученную систему, находятся стационарные точки x_i^* . Подставляя эти значения x_i^* во вторые частные производные модели (1) с оставшимися членами (не исключёнными) вычисляются определители

$$a_{11}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где элементами служат значения вторых частных производных в стационарных точках.

$$\tilde{y}_{x_i x_k}''(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = a_{ik} \quad (i, k = 1, 2, \dots, n).$$

Так как знаки определителя чередуются, начиная с минуса, то в стационарных точках x_i^* имеется максимум функции регрессии.

Используя данную теорию, найдём оптимальные значения параметров щётки и скорость её вращения для обеспечения максимальной прочности сцепления газопламенного покрытия с основой.

Предварительные эксперименты показали, что такая случайная характеристика как прочность сцепления приближённо может быть описана нормальным законом распределения, и область её максимума может находиться при значениях диаметра иглоок x_1 от 0,35 до 0,95 мм со свободными длинами иглы x_2 от 30 до 70 мм и при количестве оборотов x_3 от 800 до 2500 об/мин, а также при плотности расположения от 20 до 40 шт/см². Имея такие данные, рассчитывается нулевой уровень и интервал варьирования, а также значения в звёздных точках. Проведя эксперименты в этих точках по плану табл. 1, определены значения прочности сцепления. Значимость коэффициентов регрессии оценена по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы $N_0-1=3$. Результаты эксперимента в нулевом уровне: 25,4 МПа, 26,0 МПа, 26,7 МПа, 26,5 МПа [6].

Данные эксперименты позволили найти ошибку опыта $s_0^2=0,336667$, дисперсии коэффициентов регрессии и расчётные значения критерия Стьюдента t_{ij} .

$$\begin{aligned} t_0 &= 204,815; & t_1 &= 5,861; & t_2 &= -7,075; & t_3 &= 6,831; & t_4 &= 2,009; \\ t_{12} &= -2,327; & t_{13} &= 2,154; & t_{14} &= 0,172; & t_{23} &= -2,327; & t_{24} &= 0,0; \\ t_{34} &= 0,172; & t_{11} &= -6,071; & t_{22} &= -5,827; & t_{33} &= -5,583; & t_{44} &= -3,390; \end{aligned}$$

Технологія машинобудування

Из проведенного исследования следует, что при уровне значимости $\alpha = 0,05$ коэффициенты, $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$, значимы, так как для них $|t_i| > t_T = 3,18$; остальные незначимы. С помощью программы данная модель приведена к обычной форме записи

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & -0,49206 + 21,06752x_1 + 0,32232x_2 + 0,00638x_3 + 0,43316x_4 - 0,05625x_1x_2 + \\ & 0,00123x_1x_3 + 0,00833x_1x_4 - 0,00002x_2x_3 + 0,000003x_3x_4 - 13,84025x_1^2 - 0,00299x_2^2 - \\ & 0,000002x_3^2 - 0,00696x_4^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Данная модель проверена на адекватность с помощью критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Для этого были найдены значения функции \tilde{y} во всех 25 точках данного плана. Определена дисперсия адекватности уравнения регрессии (10) при числе членов в уравнении регрессии $l=14$ и $N=25$. Программный расчёт показал, что наша нелинейная модель \tilde{y} адекватна, так $F_p < F_T$ ($0,97 < 8,79$). Отсюда следует, что данную модель можно применить для нахождения оптимальных точек, в которых достигается максимум прочности сцепления. Нахождение оптимальных точек с использованием составленной программы в системе Maple позволило найти эти точки, а также найти значение \tilde{y} в этих точках и показать с использованием значений определителей (10) в этих точках, что найденные точки есть точки максимума. И так, нами были найдены оптимальные значения диаметра иголок $x_1 = 0,78$ мм со свободной длиной иглы $x_2 = 39,6$ мм при оптимальном количестве оборотов $x_3 = 2097$ об/мин и с плотностью расположения $x_4 = 32$ шт/см². Данная максимальная прочность сцепления при этих оптимальных значениях составила $y_{\max} = 27,86$ МПа.

Если произвести исключение незначимых коэффициентов уравнения (10), то получим уравнение регрессии

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & 2,22366 + 20,52707x_1 + 0,25300x_2 + 0,00628x_3 + 0,41735x_4 - 13,84025x_1^2 - \\ & 0,00299x_2^2 - 0,000002x_3^2 - 0,00696x_4^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Проведенные исследования показали, что данная модель адекватна по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе членов уравнения регрессии $l=9$, так $F_p < F_T$ ($2,98 < 8,79$). Упрощенная модель (15) так же имеет максимум в точках $x_1 = 0,74$; $x_2 = 42,32$; $x_3 = 1979$; $x_4 = 30$; и он равен 27,66 МПа. Нетрудно видеть, что все оптимальные значения, как для упрощённой модели, так и для не упрощённой модели достаточно близки. Заметим, что упрощения делались только для простоты вычисления, что в настоящий момент в связи развитием вычислительных средств можно и не делать. Влияние некоторых факторов пусть незначительное, но оно существует и в конечном итоге это влияние оказывает некоторое значение. Поэтому для решения задачи оптимизации факторов взята неупрощённая модель регрессии.

На рис. 1–6 приведены поверхности отклика прочности сцепления газопламенного покрытия с основой при двух полученных максимальных значениях параметров щеточной обработки.

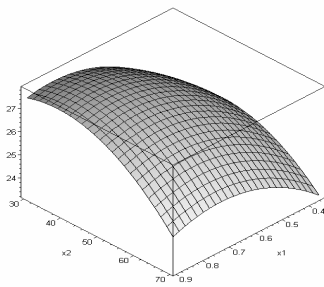


Рис. 1 – Поверхность прочности сцепления газопламенного покрытия при оптимальном количестве оборотов $x_3 = 2097$ об/мин и с плотностью расположения игл $x_4 = 32$ шт/см²

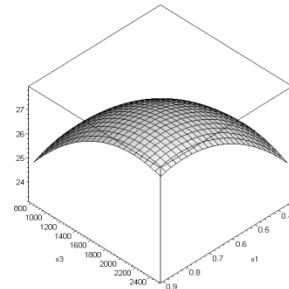


Рис. 2 – Поверхность прочности сцепления газопламенного покрытия со свободной длиной иглы $x_2 = 39,6$ мм и с плотностью расположения иглы $x_4 = 32$

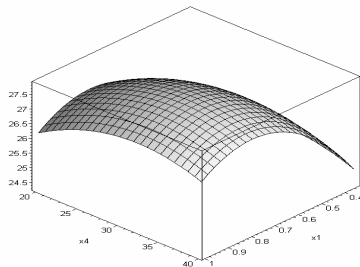


Рис. 3 – Поверхность прочности сцепления газопламенного покрытия при оптимальном количестве оборотов $x_3 = 2097$ об/мин. со свободной длиной иглы $x_2 = 39,6$ мм

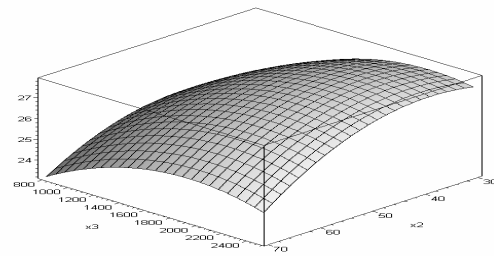


Рис. 4 – Поверхность прочности сцепления газопламенного покрытия при найденном оптимальном значении диаметра иглолок $x_1 = 0,78$ мм, с плотностью расположения иглы $x_4 = 32$ шт/см²

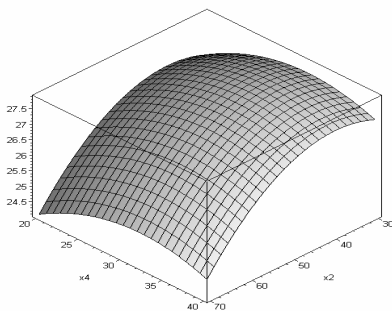


Рис. 5 – Поверхность прочности при найденном оптимальном значении диаметра иглолок $x_1 = 0,78$ мм, и при оптимальном количестве оборотов $x_3 = 2097$ об/мин

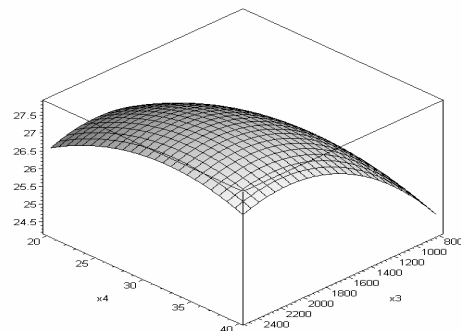


Рис. 6 – Поверхность прочности сцепления газопламенного покрытия при найденном оптимальном значении диаметра иглолок $x_1 = 0,78$ мм, со свободной длиной иглы $x_2 = 39,6$ мм

Из рисунков наглядно видно, что есть точка максимума прочности сцепления газопламенного покрытия, зависящая от параметров x_1, x_2, x_3, x_4 .

Технологія машинобудування**Выводы**

1. Теоретически установлено, что параметры щеточной обработки влияют на прочность сцепления напыленного покрытия с основой.

2. На основе результатов экспериментов выбраны рациональные технологические параметры щеточной обработки поверхности детали типа «вал» под нанесение покрытий газопламенным напылением: скорость вращения, диаметр и свободная длина игл, плотность их набивки, натяг.

3. Установлены расчетно-аналитические зависимости, определяющие связь технологических параметров щеточной обработки (скорости вращения n об/мин, диаметра d мм и длины игл l мм, плотности их набивки p шт/см²) с прочностью сцепления напыленных покрытий $\sigma_{сц}$.

4. Достоверность результатов исследований подтверждается удовлетворительной сходимостью данных, полученных на базе математической модели, с результатами экспериментальных исследований и промышленных испытаний.

Список использованных источников

1. Какуевичкий В. А. Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин / В. А. Какуевичкий. – Киев : Техника, 1989. – 174 с.
2. Харламов Ю. А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин / Ю. А. Харламов // Тяжелое машиностроение. – 2000. – № 2. – С. 3-10.
3. Витязь П. А. Упрочнение газотермических покрытий : монография / П. А. Витязь, Р. О. Азизов, М. А. Белоцерковский. – Минск : Бестпринт, 2004. – 192 с.
4. Термическое распыление. Thermal spraying. Weld. Des. and Fabr. 2003 Apr., s. 41-42.
5. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А.Ф. Пузряков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 360 с.
6. Лузан С. А. Повышение технологических свойств покрытий / С. А. Лузан, Е. С. Дерябкина // Технологии термической и химико-термической обработки металлов и сплавов (ОТТОМ-9) : тез. докл. 9-й Международной научно-технической конф. IX Международного научно-технического Конгресса, термистов и металловедов (г. Харьков, 21-25 апреля 2008 г.). – Харьков, 2008. – С. 334-336.
7. Introduction to thermal spray processing. Handbook of thermal spray technology. 2004 ASM international.
8. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, Л. С. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – Киев : Наук. думка, 1987. – 544 с.
9. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель. – М. : Мир, 1965. – 450 с.
10. Дэйвид Г. Порядковые статистики / Г. Дэйвид. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 336 с.

References

1. Kakuevitskiy, V 1989, *Primeneniye gazotermicheskikh pokrytiy pri izgotovlenii i remonte mashin*, Kiev.
2. Kharlamov, Yu 2000, 'Gazotermicheskoye napylenie pokrytiy i ekologichnost proizvodstva, ekspluatatsii i remonta mashin', *Tyazheloye mashinostroyeniye*, no. 2, pp. 3-10.
3. Vityaz, P, Azizov, R & Belotserkovskiy, M 2004, *Uprochneniye gazotermicheskikh pokrytiy*, Minsk.
4. 'Termicheskoye raspyleniye. Thermal spraying', *Weld. Des. and Fabr.*, 2003 Apr., pp. 41-42.
5. Puzryakov, A 2003, *Teoreticheskiye osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya*, Moskwa.
6. Luzan, S & Deryabkina, E 2008, 'Povysheniye tekhnologicheskikh svoystv pokrytiy', *Tekhnologii termicheskoy i khimiko-termicheskoy obrabotki metallov i splavov (OTTOM-9)*, tez. dokl. 9-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konf. IKh Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo Kongressa termistov i metallovedov, Kharkiv, 21-25 April 2008, pp. 334-336.
7. *Introduction to thermal spray processing. Handbook of thermal spray technology*, 2004, ASM international.
8. Borisov, Iu, Kharlamov Iu, Sidorenko, L. & Ardatovskaia 1987, *Gazotermicheskiye pokrytiia iz poroshkovykh materialov*, Kiyy.
9. Gumbel, E 1965, *Statistika ekstremalnykh znachenii*, Mir.
10. Deivid, G *Poriadkovyye statistiki*, Nauka.

Стаття надійшла до редакції 19 жовтня 2017 р.