

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 22-32.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 22-32.

Научная статья  
УДК 621.793.71:621.315.612.7  
doi:

## Влияние режимов плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия

Михаил Евгеньевич Соловьев<sup>1</sup>, д.ф.-м.н.,  
Алексей Борисович Раухваргер<sup>2</sup>, к.ф.-м.н.,  
Сергей Львович Балдаев<sup>3</sup>, к.т.н.,  
Лев Христофорович Балдаев<sup>4</sup>, д.т.н.,  
Виктория Игоревна Мищенко<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия,  
<sup>3,4,5</sup> ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка

<sup>1</sup> me\_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8840-248X>

<sup>2</sup> ABRRS@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup> s.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-7979>

<sup>4</sup> l.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-8771>

<sup>5</sup> v.mishchenko@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8494-0707>

**Аннотация.** Приведены результаты исследования влияния параметров плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия. Предложена математическая модель зависимости свойств покрытия от режимов напыления, таких как расстояние плазмотрона до поверхности подложки, силы тока и расхода водорода. Показано наличие положительной корреляции между пористостью и электрическим сопротивлением покрытия.

**Ключевые слова:** плазменные покрытия, режимы напыления, пористость, электрическое сопротивление

**Для цитирования:** Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И. Влияние условий плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 22–32. doi:

## Influence of conditions of plasma spraying of aluminum oxide powder on the porosity and electrical resistance of a coating

Mikhail E. Soloviev<sup>1</sup>, Dr.Sci. in Physics and Mathematics,  
Alexey B. Rauhvarger<sup>2</sup>, Cand.Sci. in Physics and Mathematics,  
Sergey L. Baldaev<sup>3</sup>, Ph.D. Eng.,  
Lev K. Baldaev<sup>4</sup>, D. Eng.,  
Victoria I. Mishchenko<sup>5</sup>,

<sup>1,2</sup> Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,  
<sup>3,4,5</sup> LLC "Technological systems of protective coatings", Moscow, Shcherbinka

<sup>1</sup> me\_s@mail.ru,

<sup>2</sup> ABRRS@yandex.ru

<sup>3</sup> s.baldaev@tspc.ru

<sup>4</sup> l.baldaev@tspc.ru

<sup>5</sup> v.mishchenko@tspc.ru

**Abstract.** Research evidence of plasma parameters effect when spraying aluminum oxide powder, causing the porosity and electrical resistance of the coating is offered in the article. A mathematical model of the coating effect dependence on spray coating modes, e.g. plasmotron distance to underlay surface, current strength and hydrogen consumption is proposed. Positive correlation between the porosity and the electrical resistance of the coating is shown.

**Keywords:** plasma coatings, spray coating modes, porosity, electrical resistance

**For citation:** Soloviev M.E., Raukhvager A.B., Baldaev S.L., Baldaev L.K., Mischenko V.I. Influence of conditions of plasma spraying of aluminum oxide powder on the porosity and electrical resistance of a coating / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 22–32. doi:

## Введение

К числу специальных покрытий, наносимых методом плазменного или газотермического напыления на поверхность металлов, относятся керамические покрытия, обеспечивающие диэлектрические свойства поверхности металлических деталей [1 – 4]. При плазменном напылении источником высокой температуры, обеспечивающей нагрев и плавление наносимых на поверхность детали порошкообразных частиц, является плазма газового разряда, формируемая в головке распылителя.

В качестве рабочего газа в современных плазматронах чаще всего используются инертные газы, такие как аргон, гелий и т. п., кроме того, в состав газовой смеси может добавляться водород, который обеспечивает повышение температуры газовой струи и улучшения качества покрытия [5]. Порошок подается в струю рабочего газа аксиально или радиально по отношению к направлению газовой струи. Процесс нанесения покрытия заключается в нагреве, диспергировании и переносе частиц распыляемого материала газовым потоком и формировании на подложке компактного слоя.

На качество образующегося покрытия влияет достаточно большое число технологических параметров процесса [2 – 4, 6, 7], среди которых: мощность плазменной струи, состав газа, расход газового потока, геометрия анодного сопла и расстояние от него до обрабатываемой поверхности, расход порошка и способ его подачи.

Среди различных видов керамических покрытий, обеспечивающих диэлектрические свойства поверхности изделия, наиболее распространенным и доступным является оксид алюминия. Промышленностью выпускается как  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , так и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При плазменном напылении в зависимости от метода и режима процесса фазовый состав оксида в покрытии изменяется. Формирование фаз и плотность покрытия зависят от температуры. С повышением температуры напыляемой поверхности

возрастает доля фазы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и увеличивается плотность напыленного оксида [4].

В работе [8] исследована микроструктура и механические свойства покрытий оксида алюминия на нержавеющей стали для трех вариантов режимов нанесения, различающихся значениями одного параметра CPSP (critical plasma spraying parameter): отношения мощности плазменной струи к расходу плазмообразующего газа (аргона). Установлено, что при среднем значении параметра из трех изученных обеспечиваются наилучшие стойкость к износу покрытия при умеренной твердости и хорошей стойкости к термоциклированию.

Авторами [9] изучены следующие свойства плазменных покрытий на основе оксида алюминия с небольшой добавкой оксида титана на стальной подложке: прочность адгезионной связи с подложкой  $A$ , твердость покрытия  $H$  и коэффициент трения  $\mu$ . В качестве варьируемых параметров технологического процесса были выбраны ток плазматрона  $C$  (550 А; 650 А), скорость подачи порошка  $v$  (22.5 г/мин; 26 г/мин) и расстояние от сопла до поверхности напыления  $d$  (75 мм; 90 мм). Всего было сделано восемь экспериментов по ортогональной линейной схеме. По результатам экспериментов были сделаны следующие выводы: увеличение  $v$  и  $C$  приводит к увеличению  $A$ ,  $H$  и снижению  $\mu$ , тогда как с увеличением  $d$  наблюдается снижение  $A$  и  $\mu$  и рост  $H$ . Следует отметить, что отсутствие в работе результатов статистической обработки экспериментов не позволяет судить о достоверности данных выводов.

Автор [10] исследовал влияние расстояния до подложки, толщины покрытия, температуры подложки и ее шероховатости на твердость, пористость и шероховатость поверхности плазменного покрытия оксида алюминия на нержавеющей стали. Установлено, что при заданных постоянных значениях расхода аргона и водорода, тока плазматрона, равном 500 А, и скорости подачи порошка 40 г/мин зависимости твердости, пористости и шероховатости покрытия от расстояния до подложки имеют экстремальный характер. Оптимальное

значение расстояния до подложки  $d$ , при котором наблюдается максимум твердости и минимум пористости и шероховатости, составило около 12 см.

Данные по влиянию параметров напыления на электрические свойства покрытий оксидом алюминия весьма ограничены. Так в работе [11] представлены результаты исследования влияния температуры подложки и мощности плазменной струи на диэлектрические свойства покрытий оксида алюминия на нержавеющей стали. Показано, что с ростом температуры подложки электрическое сопротивление покрытия снижается, тогда как влияние мощности плазменной струи имеет экстремальный характер, проходя через минимум при значении мощности около 30 кВт.

Пористость плазменных покрытий является чрезвычайно важной их характеристикой, определяющей многие другие их физико-химические свойства [12]. Существуют разнообразные методы определения пористости покрытий [13], однако не все они согласуются между собой. В работах [8, 10] отмечалась антибатная зависимость между пористостью и твердостью покрытий.

Резюмируя приведенные данные, можно отметить, что систематического исследования по влиянию одновременно нескольких важных технологических параметров на диэлектрические свойства плазменных покрытий оксидом алюминия не проводилось. В этой связи целью настоящей работы явилось исследование влияния тока плазмотрона  $C$ , расстояния от головки распылителя до обрабатываемой поверхности  $d$  и расхода водорода  $q$  на электрическое сопротивление и пористость плазменных покрытий оксида алюминия с использованием методов математического моделирования и статистического анализа результатов эксперимента.

### Объекты и методы исследования

В качестве металлического подслоя был использован материал на основе сплава никель-хрома, содержащий хром в количестве 20 % по массе. С целью определения основных характеристик были проведены лабораторные исследования пробы порошкового материала марки ПР-Х20Н80.

Насыпную плотность порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 19440–94, она составила 4,53 г/см<sup>3</sup>. Текучесть порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 20899–98, она составила 20 с.

Гранулометрический состав порошковых материалов определяли ситовым методом в соответствии с ГОСТ 18318–94, анализ показал, что 8,94 % массовой доли порошка < 20 мкм; 65,73 % – 20...45 мкм; 25,29 % – 45...63 мкм; 0,04 % ≥ 63 мкм.

В качестве керамического слоя был использован материал на основе оксида алюминия. С целью определения основных характеристик были проведены лабораторные исследования проба порошкового материала.

Насыпную плотность порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 19440–94, она составила 0,95 г/см<sup>3</sup>. Текучесть порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 20899-98, данный порошок не обладает текучестью.

Гранулометрический состав порошковых материалов определяли ситовым методом в соответствии с ГОСТ 18318-94, анализ показал, что 0,42 % массовой доли порошка < 20 мкм; 35,32 % – 20...45 мкм; 29,96 % 45...63 мкм; 34,30 % ≥ 63 мкм.

Плазменное напыление покрытий на образцы проводилось на автоматической установке плазменного напыления ООО «Технологические системы защитных покрытий» (рис. 1) с применением плазмотрона мощностью 35...55 кВт.

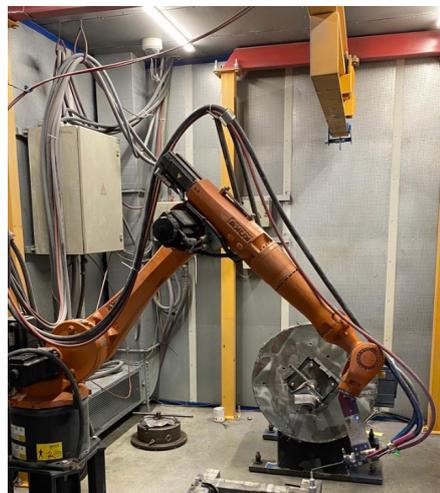


Рис. 1. Установка плазменного напыления

Микроструктуру покрытий изучали на поперечных шлифах. Шлифы подготовлены в несколько этапов. Резку образцов проводили на отрезном станке Struers Secotom-50. Образцы заливали смолой марки Struers VersoCit «холодным» способом.

Для подготовки поверхности к исследованию микроструктуры использовали водостойкую шлифовальную бумагу SiC № 500, № 1000, диск MD Dac, MD Nap. Для исследования микрошлифов использовали микроскоп оптический Микромед МЕТ с фотокамерой ADF PRO 03 с приложением TopView.

Для определения пористости покрытий использовали метод компьютерной обработки микрофотографий шлифов образцов. С этой целью было создано приложение для автоматического распознавания пор по фотографиям срезов слоев, созданных плазменным напылением, позволяющее минимизировать субъективный фактор в определении параметров, необходимых для прогнозирования физико-механических свойств покрытия.

При запуске пользователем процесса обработки выделенного фрагмента микрофотографии создаются два новых изображения (копии фрагмента), которые подвергаются следующим преобразованиям:

1. Оба изображения приводятся к оттенкам серого: вычисляется яркость каждого пикселя по стандарту, соответствующему современным мониторам:

$$z = 0,2126r + 0,7152g + 0,0722b, \quad (1)$$

где  $r, g, b$  – интенсивности компонент цвета в модели RGB. Затем полученное значение  $z$  округляется до целого  $z_{\text{окр}}$  и на место исходного пикселя вставляется новый, с компонентами  $r = z_{\text{окр}}$ ;  $g = z_{\text{окр}}$ ;  $b = z_{\text{окр}}$ .

Обработка первого изображения (рис. 2, а) на этом заканчивается, а второе подвергается дальнейшим преобразованиям.

2. Производится частичное ослабление градиента освещенности. Для этого определяются коэффициенты уравнения регрессии:

$$z_p = b + kx + k_2y + k_{12}xy, \quad (2)$$

из условия минимизация суммы  $\sum_{x=0}^w \sum_{y=0}^h (z - z_p)^2$ , где  $x, y$  – координаты пикселя;  $w, h$  – ширина и высота изображения (в пикселях). Далее яркость каждого пикселя изображения преобразуется вычитанием переменной части (2):

$$z_1 = z - kx - k_2y - k_{12}xy, \quad (3)$$

где  $z_1$  – новая яркость пикселя в положении с координатами  $x, y$ .

3. Производится увеличения яркости изображения. Для этого определяется средняя яркость:

$$z_{\text{cp}} = \frac{1}{wh} \sum_{x=0}^w \sum_{y=0}^h z_{xy}, \quad (4)$$

где  $z_{xy}$  – яркость пикселя в положении с координатами  $x, y$ . Затем вычисляется коэффициент увеличения

$$k = \frac{270}{z_{\text{cp}}} \quad (5)$$

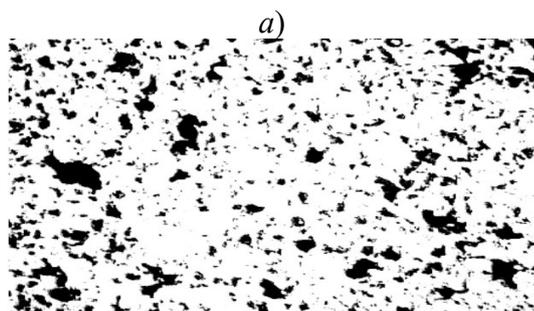
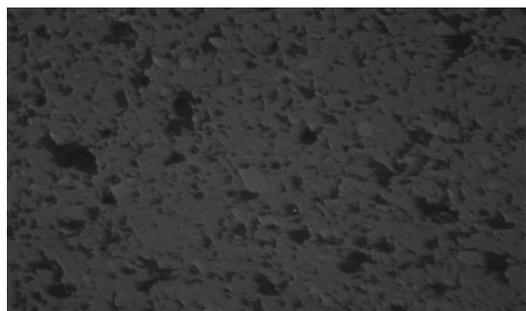
и предварительные значения новой яркости каждого пикселя  $z_{1xy} = kz_{xy}$ . Все значения округляются до целого, если значение превосходит 255, оно заменяется на 255. В соответствующих позициях создаются пиксели с новой яркостью.

4. Производится усиление контраста изображения по «телевизионному» алгоритму [14]. Для этого заново, в изображении, преобразованном по пункту 3, определяется средняя яркость по формуле (4), затем вычисляются предварительные значения новой яркости каждого пикселя по формуле телевизионного алгоритма с коэффициентом контраста равном 5,0:

$$z_{1xy} = z_{xy} + 5(z_{xy} - z_{\text{cp}}). \quad (6)$$

Все значения округляются до целого, если значение превосходит 255, оно заменяется на 255, отрицательные значения заменяются значением 0. В соответствующих позициях создаются пиксели с новой яркостью.

Для распознавания пор используется полученное после выполнения всех пунктов преобразования второе изображение (рис. 2, б).



б)

Рис. 2. Выделенный фрагмент первого изображения на микрофотографии шлифа (а) и преобразование второго изображения (б)

При запуске пользователем процесса распознавания пор, производится обход всех пикселей второго изображения, при котором пиксели с яркостью меньше 170 интерпретируются, как находящиеся в порах. При этом происходит определение пористости, как отношение количества пикселей «в порах» к общему количеству пикселей выделенного фрагмента.

Следует отметить, что данный метод определения пор не позволяет определить истинную пористость образца, как относительную долю объема пор по отношению к общему объему, а служит лишь ее некоторой оценкой. В то же время для многослойного покрытия определение истинной пористости отдельных слоев обычными методами не представляется возможным, тогда как данным методом можно получать такие оценки для каждого слоя и таким образом судить об их качестве.

Измерение сопротивления изоляции проводили с помощью Мегаомметра Е6-24 с испытательным напряжением от 50 до 2500 В. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности установки испытательного напряжения, %: от 0 до плюс 15. Значение сопротивления изоляции электрических

машин и аппаратов в большой степени зависит от температуры. В данной работе замеры производились при комнатной температуре.

### Результаты и обсуждение

Исследование влияния выбранных технологических параметров на электрическое сопротивление ( $y_1$ ) и пористость ( $y_2$ ) покрытий проводили методом математического планирования эксперимента [15]. В табл. 1 приведены значения постоянных и варьируемых параметров плазменного напыления порошков.

#### 1. Значения технологических параметров при плазменном напылении порошков

Параметры	Значения
Сила тока, А	525; 550; 575
Дистанция, мм	90; 105; 120
Расход водорода, л/мин	6; 7; 8
Расход аргона, л/мин	35
Диаметр и угол инжекторов	2×90°
Скорость перемещения горелки, м/с	0,5
Толщина итогового покрытия, мкм	255...265

Для удобства вычислений и анализа варьируемые независимые технологические параметры переводили из натуральных единиц в нормированные ( $x_i$ ) по формулам:

$$x_i = \frac{x_i^{\text{нат}} - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (7)$$

где  $x_i^{\text{нат}}$  – значения параметров в натуральных единицах (С, А; d, мм; q, л/мин, соответственно);  $x_{0i}$  – средний уровень для каждого фактора;  $\Delta x_i$  – шаг варьирования (табл. 2).

#### 2. Средние уровни и шаги варьирования независимых параметров

Параметры	$x_{0i}$	$\Delta x_i$
Сила тока, А	550	25
Дистанция, мм	105	15
Расход водорода, л/мин	7	1

Зависимости исследуемых свойств от независимых факторов аппроксимировали следующими уравнениями регрессии:

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_{1i}x_i + \sum_{i=2}^3 b_{1i}x_1x_i + b_{23}x_2x_3 + \sum_{i=1}^3 b_{22i}x_i^2 + b_{123}x_1x_2x_3, j = 1, 2, \quad (8)$$

где  $B = (b_0, b_{1i}, b_{22i}, b_{123})^T$ ,  $i = 1, 2, 3$  – вектор коэффициентов регрессии.

При проведении экспериментов значения независимых переменных изменяли по схеме ортогональной матрицы планирования, включавшей 25 экспериментов (табл. 3).

### 3. Значения независимых переменных и результаты опытов

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Электрическое сопротивление, $y_1$ МОм	Пористость, % $y_2$
1	1	1	1	6,96	19,3
2	-1	1	1	5,43	20,3
3	1	-1	1	3,65	18,9
4	-1	-1	1	3,85	20,2
5	1	1	-1	4,51	22,9
6	-1	1	-1	6,56	23,6
7	1	-1	-1	5,23	21,5
8	-1	-1	-1	3,06	18,4
9	0	1	1	6,02	19,6
10	0	-1	1	3,09	19,8
11	0	1	-1	0,49	21,2
12	0	-1	-1	0,95	22,1
13	1	0	1	3,54	19,5
14	-1	0	1	3,92	21,1
15	1	0	-1	3,82	19,3
16	-1	0	-1	4,38	21,3
17	1	1	0	7,17	25,0
18	-1	1	0	6,81	24,1
19	1	-1	0	8,68	22,4
20	-1	-1	0	6,72	25,6
21	0	0	0	6,64	24,5
22	0	0	0	5,84	26,6
23	0	0	0	5,07	28,9
24	0	0	0	5,69	25,7
25	0	0	0	7,57	27,3

Значения независимых переменных в опытах 1 – 8 отвечают матрице ортогонального

линейного плана для трех факторов. В опытах 9 – 20 одна из независимых устанавливалась на

среднем уровне, а две других варьировались по схеме ортогонального линейного плана для двух факторов. Опыты в центре плана 21 – 25 проводились для оценки воспроизводимости откликов.

Оценки коэффициентов уравнений регрессии (8) вычисляли методом наименьших квадратов по формулам:

$$B_i = (X_i^T X_i)^{-1} (X_i^T Y_i), i = 1, 2, \quad (9)$$

где  $B_i$  – коэффициенты уравнений регрессии, отвечающие каждому отклику;  $X$  – информационная матрица, столбцы которой соответствуют коэффициентам уравнения регрессии;  $X^T$  – транспонированная матрица;  $Y_i$  – столбцы откликов.

Вычисленные оценки коэффициентов регрессии приведены в табл. 4.

#### 4. Оценки коэффициентов уравнений регрессии

Коэффициент	$y_1$	$y_2$
$b_0$	5,8755	26,2389
$b_1$	0,1769	-0,3670
$b_2$	0,5450	0,4587
$b_3$	0,4663	-0,7330
$b_{12}$	-0,3408	0,0427
$b_{13}$	0,1158	-0,3578
$b_{23}$	0,4583	-0,4527
$b_{221}$	1,5525	-0,9420
$b_{222}$	0,2750	-0,5599
$b_{223}$	-3,1550	-4,5512
$b_{123}$	0,7438	0,5199

В качестве статистики для проверки гипотезы адекватности математических моделей использовали отношение  $F$  дисперсий адекватности моделей к дисперсиям воспроизводимости, которые вычисляли по результатам параллельных измерений в опытах 21 – 25:

$$F_i = \frac{S_{adi}^2}{S_{voc}^2}, i = 1, 2,$$

где  $S_{adi}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2$ ; (10)

$$S_{voc}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2,$$

где  $N$  – общее число опытов ( $N = 25$ );  $l$  – число коэффициентов уравнений регрессии, вычисленных по выборке ( $l = 11$ );  $n$  – число параллельных опытов ( $n = 5$ );  $y_{ij}$  – экспериментальные значения откликов;  $\hat{y}_{ij}$  – значения откликов, рассчитанные по уравнению регрессии;  $\bar{y}_i$  – среднее значение откликов по параллельным измерениям.

Статистика  $F$  удовлетворяет распределению Фишера [16]. Поэтому для проверки гипотезы об адекватности уравнений регрессии вычисленные значения статистики для обоих откликов  $F_i$  необходимо сравнить с квантилем распределения Фишера  $F_{inv}$  при выбранной доверительной вероятности  $p$  и числах свободы сравниваемых дисперсий  $N - l$  и  $n - 1$ . Гипотеза об адекватности уравнения принимается при выполнении неравенства:

$$F_i \leq F_{inv}(p, N - l, n). \quad (11)$$

Как видно из результатов проверки, приведенных в табл. 5, для обоих откликов гипотеза об адекватности уравнений регрессии принимается.

#### 5. Результаты проверки гипотезы об адекватности уравнений регрессии

Параметр	$y_1$	$y_2$
$S_{voc}^2$	0,932	2,687
$S_{adi}^2$	1,787	2,389
$F_i$	1,917	0,889
$F_{inv}$	5,873	

В силу ортогональности матрицы планирования вычисленные оценки коэффициентов регрессии линейно независимы, так что любой из коэффициентов может быть исключен из уравнения без необходимости пересчета оставшихся. Поэтому оценки линейных эффектов  $b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}, i = 1, 2$  можно использовать для сравнения степени влияния независимых

переменных на каждый из откликов в линейном приближении. Согласно табл. 4 наиболее сильное влияние на каждый из откликов в рамках принятых интервалов варьирования (см. табл. 2) оказывает фактор  $x_2$  (дистанция). Также можно отметить, что в среднем все три фактора приводят к увеличению  $y_1$  (все линейные эффекты положительны), тогда как для пористости к увеличению  $y_2$  приводит только увеличение  $x_2$ , а для  $x_1$  и  $x_3$  влияние противоположное.

Эти выводы верны лишь в первом линейном приближении. Для того, чтобы более точно оценить влияние независимых переменных на исследованные отклики, необходимо исследовать поверхности откликов в пространстве всех трех независимых переменных, т. к. уравнения регрессии нелинейны. Поскольку для трех независимых переменных зависимости откликов от независимых переменных представляют собой поверхности в четырехмерном пространстве, визуально изучить их невозможно. Можно изучить только сечения таких поверхностей, задав постоянным один из параметров, и построив поверхность в трехмерном пространстве зависимости отклика от двух оставшихся. Либо, если задать постоянными два параметра, то сечение будет представлять собой график на плоскости, как функция отклика от одного оставшегося параметра.

Для построения сечений поверхностей отклика целесообразно предварительно найти их центры и определить качественный вид поверхностей. Центр поверхностей может быть найден из условия:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = 0; i = 1,2; j = 1,2,3. \quad (12)$$

Если учитывать в уравнениях регрессии (8) эффект тройного взаимодействия факторов  $b_{123}, x_1, x_2, x_3$ , то система уравнений (12) получается нелинейной и решать ее можно будет только численно. Для качественного анализа вида поверхности с учетом линейной независимости коэффициентов регрессии при ортогональной матрице планирования можно найти центр поверхности приближенно, не учитывая в уравнении регрессии эффект тройного взаимодействия факторов. В этом случае система уравнений (12) будет линейной

и в матричном виде ее можно представить следующим образом:

$$Gx = b, \quad (13)$$

где  $x \in R^3$  – неизвестный вектор координат центра поверхности;  $G \in R^3 \times R^3$  – матрица Гессе коэффициентов регрессии  $G_{ij} = \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j}; i = 1,2,3; j = 1,2,3$ ;  $b \in R^3$  – вектор, компоненты которого равны линейным коэффициентом регрессии с противоположным знаком.

Координаты центра поверхности легко находятся из решения (13):

$$x^* = G^{-1}b, \quad (14)$$

где  $G^{-1}$  – обратная матрица Гессе.

Вид поверхности можно оценить на основании собственных значений матрицы Гессе  $G^i, i = 1,2,3$ : если все они имеют одинаковые знаки, то в центре поверхности экстремум, в противном случае центр поверхности представляет собой седловую точку.

Результаты качественного исследования поверхностей отклика приведены в табл. 6, из которой видно, что в центре поверхность отклика для функции  $y_1$  (электрическое сопротивление) представляет собой минимакс (знаки  $G^i$  разные), а для для функции  $y_2$  (пористость) в центре поверхность имеет максимум (все  $G^i$  отрицательные).

**6. Результаты качественного анализа вида поверхностей отклика**

Параметр	$y_1$	$y_2$
$x_1^*$	-0,177	-0,167
$x_2^*$	-1,093	0,442
$x_3^*$	-0,009	-0,096
$G^1$	3,150	-9,145
$G^2$	0,538	-1,874
$G^3$	-6,342	-1,086

Графики сечений поверхностей приведены на рис. 3 и 4, где для функции  $y_1(x_1, x_2, x_3)$  сечение (поверхность  $y_1(x_1, x_3)$ ) выбрано в точке центра  $x_2 = -1.093$ , а для

функции  $y_2(x_1, x_2, x_3)$  сечение (поверхность  $y_1(x_1, x_2)$ ) – в точке центра  $x_3 = -0.096$ . Как видно, в точке центра поверхности  $y_2(x_1, x_2, x_3)$  пористость покрытия достигает максимального значения. При этом координаты частных экстремумов зависимости электрического сопротивления от исследуемых факторов по переменным  $x_1, x_3$  близки соответствующим координатам частных экстремумов для зависимости пористости. Однако если для  $x_1$  (зависимость от силы тока) зависимости  $y_1(x_1)$  и  $y_2(x_1)$  в точках  $x_1^*$  имеют максимум, то зависимость  $y_1(x_3)$  в точке  $x_3^*$  имеет минимум, в отличие от  $y_2(x_3)$  в соответствующей точке. Что касается сечений  $y_1(x_2)$  и  $y_2(x_2)$ , то для них не совпадают как координаты частных экстремумов, так и их вид (знаки вторых производных в соответствующих точках). Сечение  $y_1(x_2)$  в точке  $x_2^*$  имеет минимум, а сечение  $y_2(x_2)$  в соответствующей особой точке – максимум. Следует отметить, что экстремум кривой сечения  $y_1(x_2)$  находится за пределами области варьирования факторов (табл. 6), а абсолютное значение квадратичного эффекта  $b_{222}$  (табл. 4) существенно меньше соответствующих абсолютных значений других факторов  $b_{221}$  и  $b_{223}$ . Так что можно утверждать, что в исследованном диапазоне варьирования параметра  $x_2$  зависимость  $y_1(x_2)$  является монотонно возрастающей.

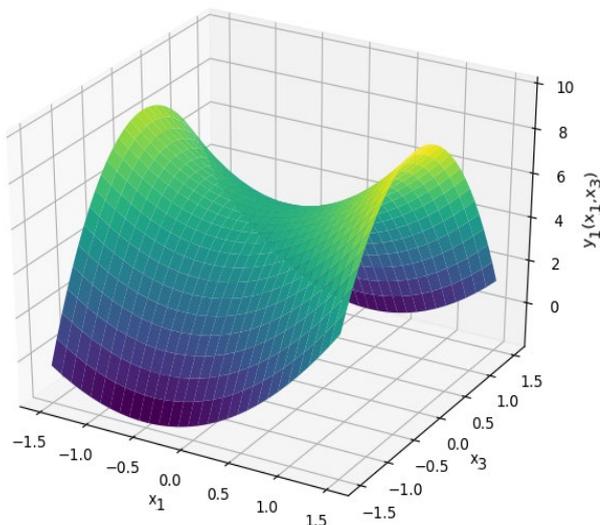


Рис. 3. График сечения поверхности  $y_1(x_1, x_2, x_3)$  в точке  $x_2 = -1.093$

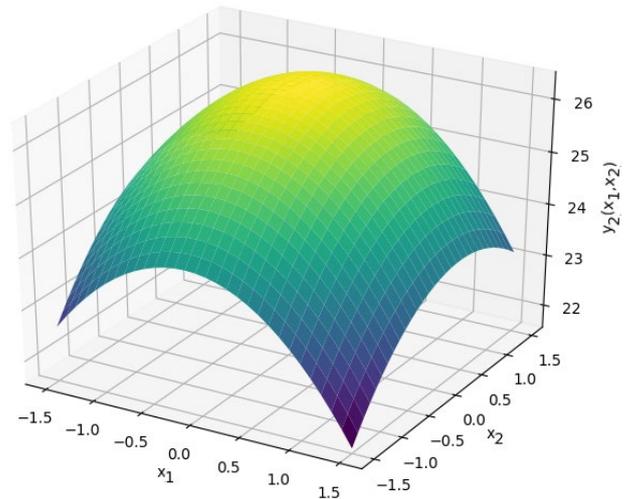


Рис. 4. График сечения поверхности  $y_2(x_1, x_2, x_3)$  в точке  $x_3 = -0.096$

Таким образом, как показывает проведенный анализ, между пористостью покрытий и их электрическим сопротивлением нет однозначной зависимости, как этого можно было бы первоначально ожидать. Это подтверждается также расчетом коэффициента корреляции между этими показателями по данным табл. 3. Вычисленная его оценка составила значение  $0.46 \pm 0.26$  (с доверительной вероятностью 0.95), что является сравнительно невысоким значением.

### Заключение

В настоящей работе с использованием метода математического планирования эксперимента исследована зависимость электрического сопротивления и пористости плазменных порошковых покрытий оксидом алюминия на металлическую подложку от следующих технологических факторов: ток плазмотрона, дистанция до подложки и расход водорода. Установлено, что зависимость пористости покрытия от всех трех изученных факторов проходит через максимум, тогда как зависимость электрического сопротивления имеет максимум по расходу водорода и минимум по току плазмотрона. При этом электрическое сопротивление в исследованном диапазоне варьирования дистанции до подложки монотонно возрастает с увеличением ее значения. Наблюдается положительная, хотя и невысокая, корреляция между пористостью покрытия и его электрическим сопротивлением.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А.** Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов. Минск: БНТУ, 2019. 231 с.
2. **Газотермическое напыление** / под общей ред. Л. Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
3. **Davis J. R.** Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338
4. **Кудинов В. В., Бобров Г. В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Metallurgiya, 1992. 432 с.
5. **Dolmaire A., Hartikainen E., Goutier S. et al.** Benefits of Hydrogen in a Segmented-Anode Plasma Torch in Suspension Plasma Spraying // J Therm Spray Tech. 2021. V. 30. P. 236–250; <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01134-2>
6. **Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громько Г.Ф.** Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус навука, 2011. 357 с.
7. **Kuzmin V., Gulyaev I., Sergachev D., et al.** Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). 2017. V. 129. ID 01052; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901052>
8. **Aruna S.T., Balaji N., Shedthi J., Grips V.K.** Effect of critical plasma spray parameters on the microstructure, microhardness and wear and corrosion resistance of plasma sprayed alumina coatings // Surface & Coatings Technology. 2012. V. 208. P. 92–100; <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.016>
9. **Sahab A.R.M, Saad N.H., Kasolang S., Saedon J.** Impact of Plasma Spray Variables Parameters on Mechanical and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3%wt TiO<sub>2</sub> Coating in Abrasion and Erosion Application // Procedia Engineering. 2012. V.41 P. 1689–1695; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.369>.
10. **Sarikaya O.** Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process // Surface and Coatings Technology. 2005. V. 190. № 2–3. P. 388–393; <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.007>.
11. **Swindeman C. J., Seals R. D., White R.L. et al.** An investigation of the electrical behavior of thermally-sprayed aluminum oxide // Proc. of the National Spray Conf. Cincinnati, OH (United States), 7-11 Oct 1996. 1996. ID 378860; <https://doi.org/10.2172/378860>.
12. **Odhiambo J.G., WenGe Li W., Zhao Y., Li C.** Porosity and Its Significance in Plasma-Sprayed Coatings // Coatings. 2019. V. 9 (7). P. 460; <https://doi.org/10.3390/coatings9070460>

13. **Curran J.A., Clyne T.W.** Porosity in plasma electrolytic oxide coatings // Acta Materialia. 2006. V. 54. P. 1985–1993; <https://doi:10.1016/j.actamat.2005.12.029>
14. **Gonzalez R.C., Woods R.E.** Digital image processing, 4 ed. N.Y.: Pearson. 2018. 1009 p.
15. **Ермаков С.М., Бродский В.З., Жиглявский А.А. и др.** Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С.М. Ермакова. М.: Наука. 1983. 392 с.
16. **Учеб. пособие.** 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 327 с.

## REFERENCES

1. Panteleenko F.I., Okovity V.A. Formation of multi-functional plasma coatings based on ceramic materials. Minsk. BNTU Publ., 2019, 231 p. (in Russian).
2. Gas thermal spraying / under the general editorship of L.H. Baldaev. Moscow: Market DS, 2007, 344 p.
3. Davis J. R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338
4. Kudinov V. V., Bobrov G. V. Spray coating. The theory, technology and equipment. Moscow: Metallurgiya, 1992, 432 p. (in Russian).
5. Dolmaire A., Hartikainen E., Goutier S. et al. Benefits of Hydrogen in a Segmented-Anode Plasma Torch in Suspension Plasma Spraying // J Therm Spray Tech. 2021. V. 30. P. 236–250 <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01134-2>
6. Ilyushenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.A., Gromyko G.F. Processes of formation of gas-thermal coatings and their modeling. Minsk: Belarus navuka, 2011, 357 p. (in Russian).
7. Kuzmin V., Gulyaev I., Sergachev D., et al. Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). 2017. V. 129. ID 01052; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901052>
8. Aruna S.T., Balaji N., Shedthi J., Grips V.K. Effect of critical plasma spray parameters on the microstructure, microhardness and wear and corrosion resistance of plasma sprayed alumina coatings // Surface & Coatings Technology. 2012. V. 208. P. 92–100; <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.016>
9. Sahab A.R.M, Saad N.H., Kasolang S., Saedon J. Impact of Plasma Spray Variables Parameters on Mechanical and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3%wt TiO<sub>2</sub> Coating in Abrasion and Erosion Application // Procedia Engineering. 2012. V.41 P. 1689–1695; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.369>.
10. Sarikaya O. Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process // Surface and Coatings Technology. 2005. V. 190. № 2–3. P. 388–393; <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.007>.

11. Swindeman C. J., Seals R. D., White R.L. et al. An investigation of the electrical behavior of thermally-sprayed aluminum oxide // Proc. of the National Spray Conf. Cincinnati, OH (United States), 7-11 Oct 1996. 1996. ID 378860; <https://doi.org/10.2172/378860>.

12. Odhiambo J.G., WenGe Li W., Zhao Y., Li C. Porosity and Its Significance in Plasma-Sprayed Coatings // Coatings. 2019. V. 9 (7). P. 460; <https://doi.org/10.3390/coatings9070460>

13. Curran J.A., Clyne T.W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings // Acta Materialia. 2006. V. 54. P. 1985–1993; <https://doi:10.1016/j.actamat.2005.12.029>

14. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. 4-th ed. N.Y.: Pearson. 2018. 1009 p.

15. Ermakov S.M., Brodsky V.Z., Zhiglyavsky A.A., et.al. Mathematical theory of experiment planning / Edited by S.M. Ermakov. Moscow: Nauka, 1983, 392 p. (in Russian).

16. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Methods of experiment optimization in chemical technology. Study guide. 2-nd ed., updated and revised. Moscow: Higher School, 1985, 327 p. (in Russian)

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.03.2023; одобрена после рецензирования 17.03.2023; принята к публикации 22.03.2023

The article was submitted 09.03.2023; approved after reviewing 17.03.2023; assepted for publication 22.03.2023

