

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКИ ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Волков Д. А.

Рассматривается влияние совокупности управляемых параметров режима электроконтактной наплавки порошковыми материалами: давления на электродах, напряжения холостого хода трансформатора и скорости наплавки на прочность сцепления покрытия с основой. Доказано, что именно эти параметры определяют температуру в зоне контакта, величину и интенсивность пластической деформации детали и присадочного металла в зоне соединения, а, следовательно, оказывают существенное влияние на прочность сцепления покрытия с основой. В результате математического моделирования было получено уравнение второй степени. Статистическая обработка и исследование полученного уравнения на экстремум позволили установить оптимальные параметры режима электроконтактной наплавки, обеспечивающие высокую прочность сцепления покрытия с основой.

Розглядається вплив сукупності керуваних параметрів режиму електроконтактного наплавлення порошковими матеріалами: тиску на електродах, напруги холостого ходу трансформатора і швидкості наплавлення на міцність зчеплення покриття з основою. Доведено, що саме ці параметри визначають температуру в зоні контакту, величину та інтенсивність пластичної деформації деталі і присаджувального металу в зоні з'єднання, а отже істотно впливають на міцність зчеплення покриття з основою. В результаті математичного моделювання було отримано рівняння другого ступеня. Статистична обробка та дослідження отриманого рівняння на екстремум дозволили встановити оптимальні параметри режиму електроконтактного наплавлення, що забезпечують високу міцність зчеплення покриття з основою.

The article examines the impact of population-driven mode settings electrocontact surfacing powder materials: pressure on the electrodes, the open circuit voltage of the transformer and the deposition rate on the strength of adhesion of the coating to the substrate. We prove that these parameters determine the temperature in the contact zone, the magnitude and intensity of the plastic deformation of the details and the filler metal in the joint area, and therefore have a significant impact on the strength of adhesion of the coating to the substrate. As a result of mathematical modeling was to obtain an equation of second degree. Statistical processing and study of the resulting equation for the extremum it possible to establish the optimum settings for the electric-welding, providing high strength adhesion of the coating to the substrate.

Волков Д. А.

канд. техн. наук, доц ДГМА,  
[sp@dgma.donetsk.ua](mailto:sp@dgma.donetsk.ua)

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.791.927

Волков Д. А.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКИ ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из перспективных присадочных материалов для электроконтактной наплавки, кроме компактных материалов (провода, прутки, ленты), являются металлические порошки. Они позволяют получать покрытия с самыми различными свойствами: износостойкие, антифрикционные, фрикционные, коррозионно- и жаростойкие [1]. В работах [2, 3] отмечается, что процесс формирования покрытия и соединения его с основой осуществляется без расплавления соединяемых материалов, то есть в твердой фазе. Таким образом, электроконтактная наплавка осуществляется не за счёт расплавления основного и привариваемого металлов, а в результате их пластической деформации, происходящей при прохождении импульса тока  $I$  в течение длительности  $t_n$  и действия усилия  $P$  сжатия электродов. При этом металл детали деформируется в тонком поверхностном слое, а присадочный металл деформируется в объёме на значительную величину.

Совокупность управляемых параметров: давление на электродах  $P$ , напряжение холостого хода трансформатора  $U_{xx}$ , величина тока  $I$  и длительность его импульса  $t_n$ , а так же скорость наплавки  $V$  в процессе нанесения покрытия определяют температуру, величину и интенсивность пластической деформации детали и присадочного металла в зоне соединения, а следовательно влияют на процессы активации контактных поверхностей и объёмного взаимодействия присадочного и основного материала, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на прочность сцепления покрытия с основой. Прочности сцепления покрытия с основой уделяется столь большое внимание в связи с тем, что она характеризует несущую способность покрытия, а определение ее истинной величины представляет собой весьма сложную задачу с точки зрения методики и техники эксперимента. Это объясняется специфическими условиями и многофакторностью процесса формирования покрытия при его нанесении [3].

Если установление, экспериментальным путем, степени влияния каждого отдельного фактора на прочность сцепления покрытия с основой при электроконтактной наплавке порошковыми материалами, не вызывает существенных затруднений, то выявление совокупного воздействия факторов и установления функциональной связи между ними, а так же определение оптимальных значений этих параметров, вызывает определённые трудности [4].

Целью данной работы является определение оптимальных режимов электроконтактной наплавки порошковыми материалами, обеспечивающих удовлетворительную прочность сцепления покрытия с основой.

Для решения поставленной задачи по определению оптимальных значений основных технологических факторов ( $U_{xx}$ ,  $P$ ,  $V$ ), при которых возможно вести процесс электроконтактного припекания металлических порошков, использовался метод планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных. За главный оценочный показатель процесса принималась прочность сцепления напеченного слоя с поверхностью детали, так как именно этот показатель является одним из основных, влияющих на долговечность и работоспособность поверхности восстановленной детали [1, 4].

В качестве исследуемого порошкового материала использовалась смесь порошка железа, марки ПЖ-1С (ГОСТ 9849-86), как наиболее широко используемого в качестве металлической матрицы для получения композиционных износостойких слоев и порошка феррохрома ФХ-800 (ГОСТ 4757-91), как функционального наполнителя, повышающего износостойкость. Смесь готовилась сухим смешиванием в двухконусном смесителе в соотношении 50 % ПЖ-1С+50 % ФХ-800 в течении двух часов.

Основные параметры режима наплавки варьировались в соответствии с план-матрицей эксперимента (табл. 1). Наплавка экспериментальных образцов производилась на универсальной шовной машине МШ-2201, а измерение прочности сцепления осуществлялось по методике [5]. Для сокращения числа экспериментов был принят центрально-композиционный, рототабельный план второго порядка типа  $2^3$ . Реализация плана-матрицы осуществлялась с использованием системы Statistica V6.0.437.0 (StatSoft. Inc. 2001) [6].

Таблица 1

План-матрица эксперимента

№ п/п	Интервал варьирования и уровень факторов	$U_{xx}$ , В	$P$ , Н/см <sup>2</sup>	$V$ , м/мин
1	Кодовое обозначение переменных	$x_1$	$x_2$	$x_3$
2	Нулевой уровень $X_i = 0$	3,45	11,2	0,312
3	Интервал варьирования $\delta_i$	0,35	5,2	0,11
4	Верхний уровень $X_i = +1$	3,80	16,4	0,422
5	Нижний уровень $X_i = -1$	3,10	6,0	0,202

Для определения оптимальных условий протекания исследуемого процесса электроконтактной наплавки порошковых материалов было получено уравнение второй степени (1), а так же были проведены расчеты по определению статистической значимости влияния факторов, участвующих в эксперименте (табл. 2). Кроме того, были рассчитаны коэффициенты регрессии модели (табл. 3) с использованием системы Statistica V6.0.437.0 (StatSoft. Inc. 2001).

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

Таблица 2

Результаты расчета основных статистик модели

ANOVA; Var.: $Y_{CЦ}$ ; R-sqr=,99225; Adj: ,98527 (Прочность сцепления)							
3 factors, 1 Блоки; MS Residual=41,68021							
DV: $Y_{CЦ}$							
Фактор	SS	df	MS	F	p		
(1) $U_{xx}$ (L)	14500,45	1	14500,45	347,8977	0,000000		
$U_{xx}$ (Q)	426,33	1	426,33	10,2287	0,009520		
(2) $P$ (L)	19638,72	1	19638,72	471,1761	0,000000		
$P$ (Q)	2665,43	1	2665,43	63,9496	0,000012		
(3) $V$ (L)	13940,20	1	13940,20	334,4561	0,000000		
$V$ (Q)	1295,39	1	1295,39	31,0794	0,000236		
1L by 2L	162,00	1	162,00	3,8867	0,076955		
1L by 3L	163,80	1	163,80	3,9300	0,075566		
2L by 3L	486,72	1	486,72	11,6775	0,006578		
Ошибка	416,80	10	41,68				
Total SS	53766,97	19					

Из табл. 2 следует, что статистически значимые эффекты (уровень  $p < 0,05$ ) имеют все члены модели, кроме (1L by 2L) (1L by 3L). Это подтверждается вероятностным графиком (рис. 2) на котором члены модели с меткой L и Q находятся в стороне от линии нормального распределения, что указывает на статистическую значимость их влияния на отклик. Анализируя диаграмму Парето (рис. 3), видим, что все члены математической модели дают значимые эффекты, кроме (1L by 2L) (1L by 3L). Соответствующие значимым факторам колонки пересекает вертикальная линия, которая представляет 95 % доверительную вероятность. Кроме того, в табл. 2 и 3 приводится величина достоверной аппроксимации ( $R\text{-sqr} = 0,99225$ ), что говорит о хорошем общем качестве полученной модели.

Таблица 3

Коэффициенты регрессии (уравнения математической модели)

Regr. Coefficients; Var.: Y <sub>сц</sub> ; R-sqr=,99225; Adj:,98527 (Прочность сцепления)								
3 factors, 1 Блоки; MS Residual=41,68021								
DV: Y <sub>сц</sub>								
Фактор	b <sub>i</sub> , b <sub>ij</sub> , b <sub>ii</sub>	Regressn Коэффиц	Std.Err.	t(10)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
Mean/Interc.	b <sub>0</sub>	205,247	186,3345	1,10150	0,296486	-209,93	620,426	
(1)Uxx (L)	b <sub>1</sub>	-148,901	98,6933	-1,50872	0,162297	-368,80	71,001	
Uxx (Q)	b <sub>11</sub>	44,400	13,8828	3,19823	0,009520	13,47	75,333	
(2)P (L)	b <sub>2</sub>	8,249	4,7296	1,74418	0,111727	-2,29	18,787	
P (Q)	b <sub>22</sub>	-0,503	0,0629	-7,99685	0,000012	-0,64	-0,363	
(3)V (L)	b <sub>3</sub>	451,245	227,5480	1,98308	0,075485	-55,76	958,254	
V (Q)	b <sub>33</sub>	-783,546	140,5491	-5,57489	0,000236	-1096,71	-470,383	
1L by 2L	b <sub>12</sub>	-2,473	1,2541	-1,97148	0,076955	-5,27	0,322	
1L by 3L	b <sub>13</sub>	-117,532	59,2870	-1,98243	0,075566	-249,63	14,567	
2L by 3L	b <sub>23</sub>	13,636	3,9905	3,41723	0,006578	4,75	22,528	

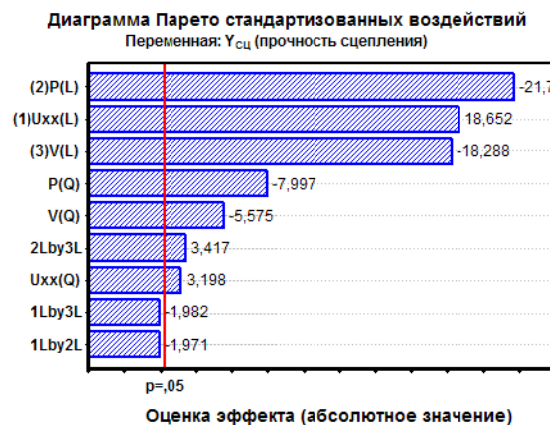


Рис. 1. Вероятностный график определения статистической значимости влияния исследуемых факторов

Рис. 2. Диаграмма Парето для определения значимости эффектов, которую дают исследуемые факторы

Таким образом, статистическая обработка модели показала, что все полученные коэффициенты оказались значимы, кроме (1L by 2L) (1L by 3L). При количестве факторов k = 3 уравнение (1) принимает вид:

$$y = 205,247 - 148,901x_1 + 8,249x_2 + 451,245x_3 - 2,473x_1x_2 - 114,532x_1x_3 + 13,636x_2x_3 + 44,4x_1^2 - 0,503x_2^2 - 783,546x_3^2 \tag{2}$$

Для исследования этого уравнения на экстремум его необходимо привести к каноническому виду:

$$y - y_c = \sum_{i=1}^k \theta_i z_i^2 \tag{3}$$

Каноническое преобразование содержит две процедуры: перенос начала координат в экстремальную точку С; замену старых координатных осей новыми, повернутыми на некоторый угол относительно старых осей.

Условие экстремума имеет вид:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial y}{\partial x_2} = \frac{\partial y}{\partial x_3} = 0.$$

Дифференцируя уравнение (2) по  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  получаем систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = 0 = -148,901 - 2,473x_2 - 117,532x_3 + 2 \cdot 44,4x_1; \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0 = 8,249 - 2,473x_1 + 13,636x_3 - 2 \cdot 0,503x_2; \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = 0 = 451,245 - 117,532x_1 + 13,636x_2 - 2 \cdot 783,546x_3. \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений дает координаты экстремальной точки:

$$x_{1c} = 2,0787; x_{2c} = 5,5321; x_{3c} = 0,18018.$$

Выход в этой точке (прочность сцепления) составляет:

$$\begin{aligned} y_c = & 205,247 - 148,901 \cdot 2,0787 + 8,249 \cdot 5,5321 + 451,245 \cdot 0,18018 - 2,473 \cdot 2,0787 \cdot 5,5321 - \\ & - 117,53 \cdot 2,0787 \cdot 0,18018 + 13,636 \cdot 5,5321 \cdot 0,18018 + 44,4 \cdot 2,0787^2 - \\ & - 0,503 \cdot 5,5321^2 - 783,546 \cdot 0,18018^2 = 114,82. \end{aligned}$$

При  $k = 3$  каноническое уравнение имеет вид

$$y - y_c = \theta_1 z_1^2 + \theta_2 z_2^2 + \theta_3 z_3^2, \quad (4)$$

где  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – корни характеристического уравнения (5).

$$\theta^3 + \alpha\theta^2 + \beta\theta + \gamma = 0. \quad (5)$$

Здесь

$$\alpha = -(b_{11} + b_{22} + b_{33}); \quad (6)$$

$$\beta = b_{11}b_{22} + b_{11}b_{33} + b_{22}b_{33} - 0,25(b_{12}^2 + b_{13}^2 + b_{23}^2); \quad (7)$$

$$\gamma = 0,25(b_{11}b_{23}^2 + b_{22}b_{13}^2 + b_{33}b_{12}^2 - b_{12}b_{13}b_{23}) - b_{11}b_{22}b_{33}; \quad (8)$$

$$\begin{cases} z_1 = l_1(x_1 - x_{1c}) + m_1(x_2 - x_{2c}) + n_1(x_3 - x_{3c}); \\ z_2 = l_2(x_1 - x_{1c}) + m_2(x_2 - x_{2c}) + n_2(x_3 - x_{3c}); \\ z_3 = l_3(x_1 - x_{1c}) + m_3(x_2 - x_{2c}) + n_3(x_3 - x_{3c}). \end{cases} \quad (9)$$

где  $l_i, m_i, n_i$  – косинусы угла поворота новых координатных осей относительно старых.

Старые координаты  $x_1, x_2$  и  $x_3$  выражаются через новые следующими зависимостями:

$$\begin{cases} x_1 = l_1 z_1 + l_2 z_2 + l_3 z_3 + x_{1c}; \\ x_2 = m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3 + x_{2c}; \\ x_3 = n_1 z_1 + n_2 z_2 + n_3 z_3 + x_{3c}. \end{cases} \quad (10)$$

Подставляя в уравнения (6) – (8) значения коэффициентов регрессии из уравнения (2) получаем:  $\alpha = 739,65$ ;  $\beta = -37919,109$ ;  $\gamma = -17379,37$ .

Тогда характеристическое уравнение (5) примет вид:

$$\theta^3 + 739,65\theta^2 - 37913,109\theta - 17379,37 = 0.$$

Решение характеристического уравнения дает следующие корни:  $\theta_1 = 48,599$ ;  $\theta_2 = -787,145$ ;  $\theta_3 = -0,454$ .

Направляющие косинусов  $l_i$ ,  $m_i$ ,  $n_i$  определяются при решении системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{m_i}{l_i} = \frac{b_{23}(b_{11} - \theta_i) - 0,5b_{12}b_{13}}{b_{13}(b_{22} - \theta_i) - 0,5b_{12}b_{13}}, \\ \frac{n_i}{l_i} = \frac{0,5b_{12}^2 - 2(b_{11} - \theta_i)(b_{22} - \theta_i)}{b_{13}(b_{22} - \theta_i) - 0,5b_{12}b_{23}}, \\ l_i = \frac{1}{\sqrt{1 + (m_i/l_i)^2 + (n_i/l_i)^2}}. \end{cases} \quad (11)$$

Подставляя в уравнение (11) значения коэффициентов регрессии из уравнения (2) и полученные  $\theta_i$ , находим:  $l_1 = 0,9969$ ;  $l_2 = 0,0705$ ;  $l_3 = 0,0484$ ,  $m_1 = -0,0349$ ;  $m_2 = -0,0085$ ;  $m_3 = 0,9987$ ;  $n_1 = -0,0705$ ;  $n_2 = 0,9975$ ;  $n_3 = 0,0160$ .

Подставляя значения  $\theta_i$  и  $y_c$  в уравнение (4), а значения  $x_{ic}$ ,  $l_i$ ,  $m_i$ ,  $n_i$  в систему уравнений (9), получаем:

$$y - 114,82 = 48,599z_1^2 - 787,145z_2^2 - 0,454z_3^2, \quad (12)$$

где

$$z_1 = 0,9969(x_1 - 2,0787) - 0,0349(x_2 - 5,5321) - 0,0705(x_3 - 0,18018);$$

$$z_2 = 0,0705(x_1 - 2,0787) - 0,0085(x_2 - 5,5321) - 0,9975(x_3 - 0,18018);$$

$$z_3 = 0,0484(x_1 - 2,0787) - 0,9987(x_2 - 5,5321) - 0,0160(x_3 - 0,18018).$$

Старые координаты  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  выражаются через новые, согласно (10)

$$\begin{cases} x_1 = 0,9969z_1 + 0,0705z_2 + 0,0484z_3 + 2,0787; \\ x_2 = -0,0349z_1 - 0,0085z_2 + 0,9987z_3 + 5,5321; \\ x_3 = -0,0705z_1 + 0,9975z_2 + 0,016z_3 + 0,18018. \end{cases}$$

Таким образом, в результате канонического преобразования получили новое начало координат, которое лежит в точке  $x_{1c} = 2,0787$ ;  $x_{2c} = 5,5321$ ;  $x_{3c} = 0,18018$ , т. е.  $U_{xx} = 2,08$  В;  $P = 5,53$  Н/с/  $^2$ ;  $V = 0,18$  м/мин. Здесь прочность сцепления составляет  $y_c = 114,82$  МПа в точке  $z_1 = z_2 = z_3 = 0$ .

Уравнение (12) описывает поверхность типа минимакса, так как коэффициенты  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  имеют разные знаки. Так как коэффициент  $\theta_1$  положителен, а  $\theta_2$  и  $\theta_3$  отрицательны, то выход  $y - y_c$  увеличивается при движении по оси  $z_1$ , а по осям  $z_2$  и  $z_3$  — уменьшается. По фактору  $z_1$  поверхность отклика в точке С имеет минимум, а по  $z_2$  и  $z_3$  — максимум.

Следовательно, для достижения высокой прочности сцепления покрытия с основой при электроконтактной наплавке порошковой смеси, содержащей 50 % ПЖ-1С + 50 % ФХ-800, процесс необходимо вести при усилии на электродах  $P = 5,53 \text{ Н/см}^2$ , скорости наплавки  $V = 0,18 \text{ м/мин}$ . Напряжение холостого хода трансформатора  $U_{xx}$  можно повышать до 3,5–4,05 В соблюдая условие стабильности процесса наплавки – отсутствие выплесков и пор в нанесенном покрытии. Соответствующая поверхность отклика и контурный график представлены на рис. 3.

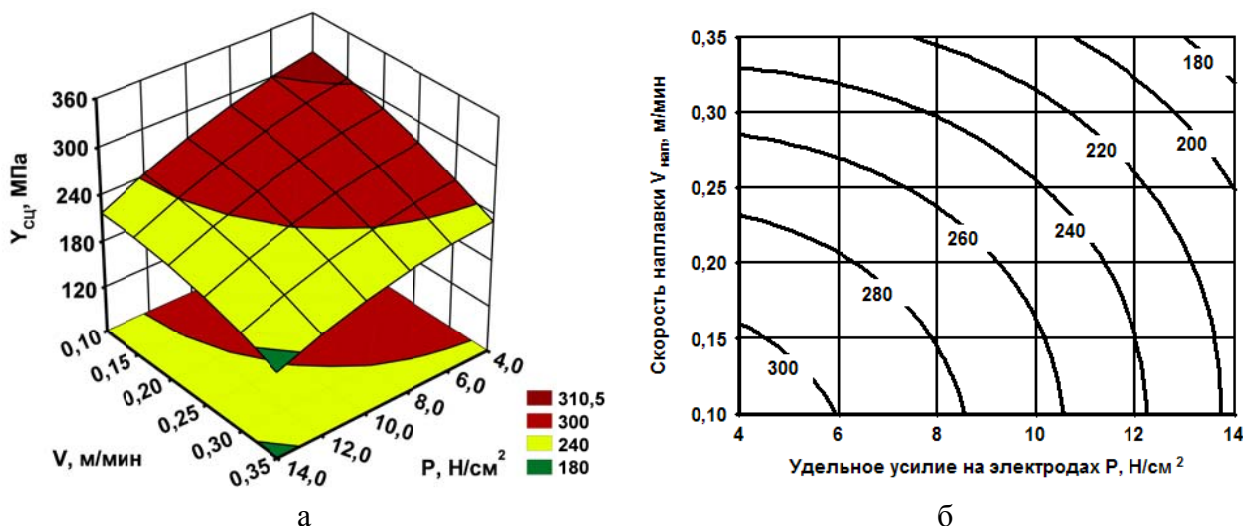


Рис. 3. Поверхность отклика (а) и контурный график (б) зависимости прочности сцепления наплавленного слоя от удельного усилия на электродах и скорости наплавки (при напряжении холостого хода трансформатора  $U_{xx}=4,05 \text{ В}$ )

### ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель влияния основных параметров режима электроконтактной наплавки порошковых материалов ( $U_{xx}$ ,  $P$ ,  $V$ ) на прочность сцепления покрытия с основой.

2. Установлены оптимальные параметры режима наплавки: усилие на электродах  $P = 5,53 \text{ Н/см}^2$ , скорость наплавки  $V = 0,18 \text{ м/мин}$ , напряжение холостого хода трансформатора  $U_{xx} = 4,05 \text{ В}$ .

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латыпов Р. А. Выбор компактных и порошковых металлических материалов и управление качеством покрытий при упрочнении и восстановлении деталей электроконтактной приваркой : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Р. А. Латыпов ; Государственное образовательное учреждение Московский государственный вечерний металлургический институт (ГОУ МГВМИ) – Москва, 2007. – 48 с.
2. Ярошевич В. К. Классификация методов активирования процессов получения покрытий припеканием металлических порошков / В. К. Ярошевич, Т. М. Абрамович – Математические модели физических процессов : материалы 11-й междунар. науч. конф. – Таганрог : Изд-во ТГПИ, 2005. – С. 44–50.
3. Дорожкин Н. Н. Технологические основы получения порошковых покрытий с использованием импульсных методов / Н. Н. Дорожкин, В. К. Ярошевич, А. С. Гурский – Математические модели физических процессов : материалы 11-й междунар. науч. конф. – Таганрог : Изд-во ТГПИ, 2005. – С. 51–56.
4. Волков Д. А. Исследование комплексного воздействия технологических факторов процесса электроконтактного припекания порошков на прочность сцепления покрытия с основой / Д. А. Волков – Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – № 1 (32) – С. 180–187. – ISSN 1993-8322.
5. Волков Д. А. Методы оценки прочности сцепления покрытий, полученных электроконтактной наплавкой порошковых материалов в металлической оболочке / Д. А. Волков, В. Т. Катренко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 2 (19) – С. 57–64. – ISSN 1993-8322.
6. Боровиков В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA: методология и технология современного анализа данных : учеб. пособие / В. П. Боровиков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2013. – ISBN 978-5-9912-0326-5.

Статья поступила в редакцию 05.04.2014 г.