

УДК 621.91

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ  
ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРИПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ****В.Я. НИКОЛАЙЧУК***(Винницкий национальный аграрный университет, Украина);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет, Беларусь);***Е.Е. КОЖЕВНИКОВА***(Одесская национальная морская академия, Украина);**канд. техн. наук Л.А. ЛОПАТА**(Институт проблем прочности НАН Украины, Киев)*

*На основе экспериментальных исследований и с использованием методов математического моделирования представлена комплексная оценка влияния основных технологических параметров (давления, силы тока, скорости припекания) процесса электроконтактного припекания порошков на физико-механические свойства полученных покрытий (прочность сцепления и износостойкость). Многофакторный эксперимент с определенным варьированием этих параметров позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий и выявить эффекты взаимодействия. Сделан вывод о том, что с целью улучшения физико-механических свойств получаемых покрытий целесообразно комплексно использовать все три технологические параметры рассматриваемого процесса.*

**Состояние проблемы.** С развитием технологий поверхностного упрочнения и нанесения покрытий возможности эмпирически-интуитивных подходов в выборе способов нанесения покрытий и их технологических режимов исчерпаны. Ввиду сложности физико-химических процессов, происходящих при нанесении покрытий, в настоящее время не существует аналитических зависимостей, которые дали бы возможность описать и всесторонне изучить технологию создания композиции «покрытие – деталь». Без определения механических свойств системы «деталь – покрытие», анализа напряженно-деформированного состояния, расчетов на прочность на стадии проектирования и ведения технологического процесса невозможно создание прочной и долговечной детали с покрытием. Это приводит к тому, что эксперимент становится одним из основных средств получения информации об исследуемом процессе нанесения покрытия. Без применения статистических методов сложно решить задачу получения максимально достоверной информации о способах нанесения покрытий. Экспериментально-статистические методы позволяют существенно сократить период технологических и конструкторских разработок. При обработке технологии нанесения покрытий экспериментальные исследования проводят на образцах, так как непосредственное нанесение покрытий на детали и испытание их на реальных объектах – трудоемкий и дорогостоящий процесс.

Разработка технологического процесса неизбежно связана с решением оптимизационных задач. Это объясняется тем, что большое количество способов нанесения в сочетании с обширной номенклатурой материалов, из которых формируют покрытие, а также большое количество влияющих факторов предоставляет технологам широкий ряд альтернативных вариантов. В такой ситуации эффективность принимаемых решений зависит от наличия критерия оценки работоспособности покрытий в заданных условиях эксплуатации. Выбор покрытий и оптимизация технологий их получения весьма сложны, так как структура, толщина покрытия, его состав зависят от многих факторов. Для оптимизации технологии получения покрытий, грамотного их применения необходимо глубокое знание механизмов разупрочнения и разрушения покрытий, их влияния на прочность защищаемых деталей и долговечность в различных температурно-силовых условиях.

Характерной особенностью методов поверхностного упрочнения является то, что не удается получить одновременного повышения всех эксплуатационных свойств детали для всех режимов эксплуатации. Даже один и тот же материал покрытия, но нанесенный разными способами, показывает различные эксплуатационные свойства. Высокая чувствительность механических характеристик покрытия к режимам их нанесения требует оптимизации технологического процесса (ТП) электроконтактного припекания порошков (ЭКПП).

Цель данного исследования – определение оптимальных технологических параметров процесса электроконтактного припекания порошковых покрытий и их влияния на толщину слоя порошка и на прочность сцепления его с основой.

**Результаты исследования.** Основными параметрами, определяющими режим припекания, являются давление и сила тока. Как известно [1], минимальная величина удельного давления при ЭКПП со-

ставляет 10 МПа. При давлениях менее 10 МПа и при пропуске электрического тока между частицами возникают слабые контактные связи, которые не позволяют получать качественные покрытия. Значения давления, превышающие 60 МПа, вызывают разрушение электродов контактных сварочных машин. В результате экспериментальных исследований была установлена зависимость от давления основных свойств покрытий, таких как прочность сцепления, пористость, износостойкость. Из графиков (рис. 1) видно, что оптимальное значение давления, при котором достигается максимальная износостойкость, прочность сцепления при необходимой пористости до 3 % составляет 35...45 МПа. Кроме давления, не менее важным технологическим параметром при ЭКПП является сила тока. Ток, необходимый для нанесения качественных покрытий, должен иметь такую величину, которая обеспечит нагрев порошкового слоя до температуры  $(0,9...0,95) T_{пл}$ .

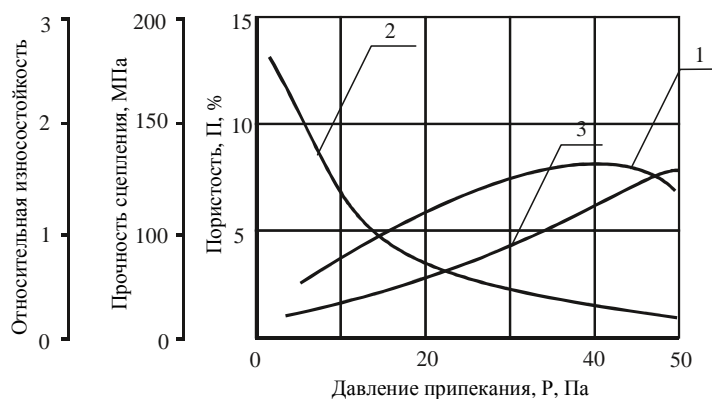


Рис. 1. Зависимость относительной износостойкости, прочности сцепления и пористости от давления припекания: 1 – прочность сцепления; 2 – пористость; 3 – относительная износостойкость

Размеры частиц порошка в значительной степени влияют на удельное электросопротивление порошкового слоя, а следовательно и на силу тока припекания. Основной составляющей общего электрического сопротивления является сопротивление порошкового материала, который состоит из сопротивления межчастичных контактов (окислительных пленок) и, собственно, сопротивления материала порошка. Частицы порошка меньшего размера имеют более высокое электросопротивление из-за большей общей площади поверхности контакта, которая, как правило, покрыта окислительными пленками, следовательно, для нагрева до необходимой температуры требуются высокие значения силы тока. Однако покрытия из порошков крупной фракции (рис. 2) имеют низкую прочность сцепления из-за высокой пористости (малой площади контакта с основанием).

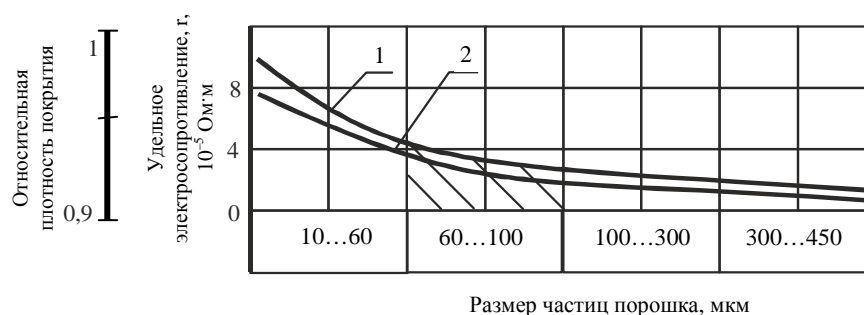


Рис. 2. Влияние размера фракции порошка на удельное электросопротивление формовки (1) и относительную плотность покрытия (2); – оптимальный размер фракции

Нагрев композиционных порошков (карбидов, боридов, алмаза) с никелевой или кобальтовой связкой, диффузионно-легированных (железо, легированное бором), происходит по оболочкам, которые имеют значительно более высокое электросопротивление. Толщина диффузионной оболочки влияет на износостойкость покрытия, а также существенно сказывается на общем электросопротивлении порошкового слоя. Оптимальная толщина диффузионной оболочки (рис. 3) составляет 10...15 мкм. Дальнейшее увеличение толщины оболочки не приводит к повышению износостойкости покрытия. Технологические

параметры разрабатываемого процесса должны обеспечивать заданные свойства покрытия и работоспособность изделия в целом. Для определения оптимальных режимов процесса электроконтактного припекания порошков исследовалось влияние технологических параметров на прочность сцепления покрытия с основой и относительную износостойкость.

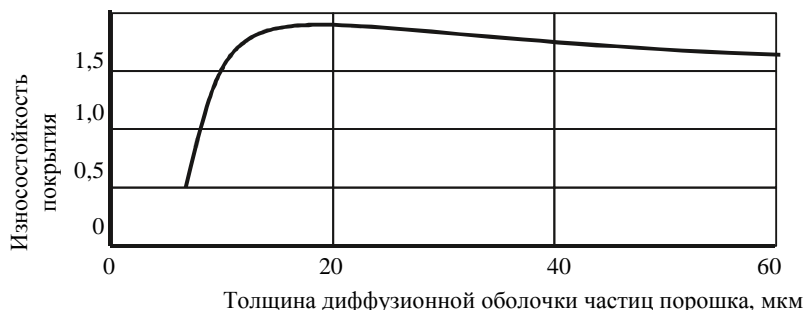


Рис. 3. Зависимость износостойкости покрытия от толщины диффузионной оболочки частиц порошка

**Оптимизация технологии электроконтактного припекания порошковых материалов.** В результате экспериментальных исследований ЭКПП в качестве основных факторов, определяющих качество получаемого покрытия, были определены управляемые технологические параметры: давление на порошковый слой; действующее значение силы тока и скорости припекания.

С целью комплексной оценки влияния основных технологических параметров (давления, тока припекания, скорости) процесса ЭКПП на физико-механические свойства покрытий (прочность сцепления и износостойкость) проводились эксперименты с использованием методов математического моделирования [2; 3].

Параметрами оптимизации являлись относительная износостойкость ( $\epsilon$ ) и прочность сцепления ( $\sigma_{сц}$ ). Был реализован полнофакторный эксперимент  $2^3$  с варьированием на 2-х уровнях технологических факторов давления  $P$ , силы тока  $I$  и скорости  $v$ . Количество опытов  $N_j = 8$ . Количество измерений в каждом опыте при измерении износостойкости и прочности сцепления  $\sigma_{сц}$  равна 3. Под количеством измерений понимается количество образцов, на которых определялось значение параметра оптимизации в каждом опыте  $j$ . Значение прочности сцепления определялось как среднее арифметическое измерений на каждом образце. Факторы и их уровни приведены в таблице 1, матрица планирования показана в таблице 2.

Таблица 1

Значение варьируемых факторов и их уровни

Уровни	Факторы			Кодированное значение факторов
	$P$ , МПа	$I$ , кА	$v$ , м/с	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
Нижний	10	1	0,001	-1
Верхний	40	15	0,01	+1
Нулевой	30	8	0,0055	0
Интервал варьирования	20	7	0,0045	

Таблица 2

Матрица планирования полнофакторного эксперимента плана  $2^3$

№ эксперимента	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

В таблице 3 приведен порядок математической обработки результатов экспериментов. Коэффициенты регрессии определяли, пользуясь методом наименьших квадратов. Численные значения коэффициентов подсчитывались на основе данных таблиц 3–5.

Таблица 3

Обработка результатов многофакторного эксперимента

Наименование определяемого параметра	Обозначение (условно)	Расчетная формула
Среднее значение параметра оптимизации в эксперименте	$\bar{Y}_q$	$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n Y_q$
Дисперсия эксперимента	$S^2\{\bar{Y}_j\}$	$S^2\{\bar{Y}_j\} = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (Y_q - \bar{Y}_j)^2$
Дисперсия параметра оптимизации	$S^2\{Y_j\}$	$S^2\{Y_j\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (S^2\{\bar{Y}_j\})$
Проверка однородности дисперсии	$G \leq G_{N,\nu,\alpha}$	$G = \frac{S^2\{\bar{Y}_j\}_{\max}}{\sum_{j=1}^N S^2\{\bar{Y}_j\}}; \nu = n-1$
Определение коэффициента уравнения регрессии	$B_0, b_i$	$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{Y}_j; b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji} Y_q$
Проверка значимости коэффициента уравнения регрессии	$b_i > \Delta b_i$	$\Delta b_i = S\{b_i\} t_{\nu,\alpha} = \sqrt{\frac{S^2\{Y_j\}}{Nn}} t_{\nu,\alpha};$ $\nu = N(n-1)$
Дисперсия адекватности	$S_{ад}^2$	$S_{ад}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - Y_j^p)^2$
Проверка адекватности уравнения регрессии	$F \leq F_{\nu_1,\nu_2,\alpha}$	$F = \frac{nS_{ад}^2}{S^2\{Y\}};$ $\nu_{1(ад)} = N - B;$ $\nu_2(Y) = N(n-1)$
<p>Обозначения величин в таблицах следующие: <math>Y</math> – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии; <math>j</math> – номер опыта в столбце матрицы (<math>j = 1, 2 \dots N</math>); <math>G, G_{N,\nu,\alpha}</math> – экспериментальные значения критерия Кохрена; <math>t_{\nu,\alpha}</math> – критерий Стьюдента при числе степеней свободы <math>\nu</math> и уровне значимости <math>\alpha</math>; <math>F_{\nu_1}, F_{\nu_2,\alpha}</math> – экспериментальные и табличные значения критерия Фишера соответственно; <math>y_j^p</math> – значение параметра оптимизации <math>bj</math>-м опыте, предусмотрено уравнением регрессии.</p>		

В результате определения коэффициентов регрессии получены уравнения регрессии:  
- по прочности сцепления

$$Y = 133 + 10,53X_1 + 5,5X_2 - 3,71X_3 - 2,71X_1X_2 + 4,54X_2X_3 - 6,03X_1X_2X_3; \quad (1)$$

- по относительной износостойкости

$$Y = 1,43 + 0,185X_1 + 0,115X_2 - 0,195X_3 - 0,03X_1X_2 + 0,085X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Анализируя уравнение (1), приходим к выводу, что на прочность сцепления главным образом влияет давление и сила тока, а также в несколько меньшей степени скорость припекания. Кроме того, оказались значительными эффекты взаимодействия давления и силы тока припекания, давления и скорости припекания.

При анализе уравнения (2) выясняется, что на относительную износостойкость в значительной степени влияют все три параметра: давление, ток и скорость. Следовательно, с целью получения качественных покрытий с высокой прочностью сцепления необходимо использовать все 3 указанные технологические параметры процесса:  $P, I, v$ . Почти в равной степени на прочность сцепления влияют давление и сила тока, а на износостойкость – величина силы тока и эффект взаимодействия силы тока и давления.

Таблица 4

Результаты многофакторного эксперимента по исследованию прочности сцепления

№ п/п	$Y_{\text{срч}} = (Y_q)$ , МПа	$\bar{Y}_j$ , МПа	$S^2\{Y_j^P\}$ , МПа	$Y_j^P$	Статическая проверка гипотез
1	142 140 140	141,6	2,64	142,81	Дисперсия параметра оптимизации $S^2\{Y\} = 1,208$ . Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена: $G = 0,208$ ; $G_{\text{табл}} = 0,5157$ при $\alpha = 0,05$ и $\nu = 2$ . Дисперсии однородны. Доверительный интервал коэффициента регрессии $\Delta b_i$ , $\Delta b_i = \pm 0,48$ при критерии Стьюдента $t = \pm 2,12$ . Коэффициенты $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{23}, b_{123}$ – значимы. Проверка адекватности при помощи критерия Фишера: дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2 = 1,3$ $F_{\text{табл}} = 2,2$ при $\nu_1 = 17$ ; $\nu_2 = 16$ ; $F = 1,01$ ; $F < F_{\text{табл}}$ , т.е. уравнение адекватно описывает результаты эксперимента
2	138 138 137	137,6	0,34	137,54	
3	138 140 139	139	1	138,52	
4	101 99 100	100	1	99,8	
5	153 150 152	151,6	2,34	151,52	
6	125 124 124	124,3	0,34	123,82	
7	143 144 142	143	1	142,96	
8	128 129 130	129	1	128,54	

Таблица 5

Результаты многофакторного эксперимента по исследованию относительной износостойкости

№ п/п	$Y_e = (Y_q)$	$\bar{Y}_j$	$S^2\{Y_j^P\}$	$Y_j^P$	Статическая проверка гипотез
1	1,6 1,65 1,62	1,62	0,00065	1,59	Дисперсия параметра оптимизации $S^2\{Y\} = 0,0024$ . Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена: $G = 0,206$ ; $G_{\text{табл}} = 0,5157$ при $\alpha = 0,05$ и $\nu = 5$ . Дисперсии однородны. Доверительный интервал коэффициента регрессии $\Delta b_i$ , $\Delta b_i = \pm 0,0212$ по критерию Стьюдента $t = \pm 2,02$ . Коэффициенты $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{123}$ – значимы
2	1,1 1,1 1	1,1	0,005	1,11	
3	1,2 1,24 1,3	1,25	0,00255	1,25	
4	0,95 1 0,9	0,95	0,0025	0,99	
5	1,74 1,8 1,78	1,77	0,00255	1,81	
6	1,7 1,64 1,68	1,67	0,00095	1,67	
7	1,81 1,82 1,78	1,8	0,00345	1,81	Проверка адекватности при помощи критерия Фишера: дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2 = 0,017$ ; $F_{\text{табл}} = 1,8$ при $\nu_1 = 19$ ; $\nu_2 = 40$ ; $F = 0,053$ ; $F < F_{\text{табл}}$ , т.е. уравнение адекватно описывает результаты эксперимента
8	1,2 1,25 1,28	1,24	0,00165	1,21	

Зависимости параметров оптимизации от технологических факторов (рис. 4), полученные в ходе экспериментальных исследований, подтверждают достоверность данных, полученных в результате проведения многофакторного эксперимента.

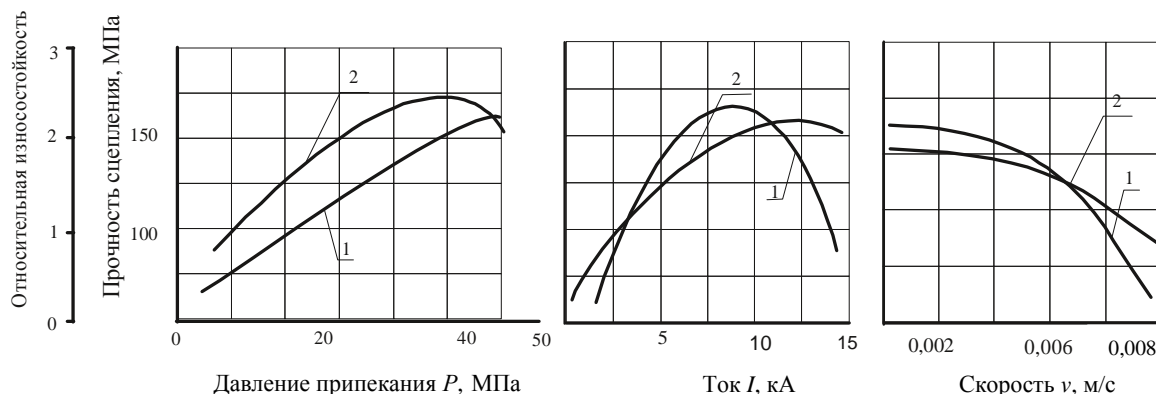


Рис. 4. Зависимость свойств покрытия от технологических режимов припекания:  
1 – относительная износостойкость; 2 – прочность сцепления

Таким образом, многофакторный эксперимент с определенным варьированием основных технологических факторов позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий.

**Заключение.** Решение задач математического моделирования и многокритериальной оптимизации процесса формирования покрытий методом ЭКПП дает возможность получить комплексную оценку влияния входных (оптимизирующих) переменных исследуемого процесса на выходные показатели и конструировать оптимальные свойства покрытий с учетом технологии их изготовления и условий эксплуатации.

Многофакторный эксперимент с определенным варьированием основных технологических факторов позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий, соотношение влияния, а также выявить эффекты взаимодействия. При этом с целью улучшения физико-механических свойств получаемых покрытий целесообразно комплексно использовать все три технологические параметры процесса ЭКПП: давление, силу тока и скорость припекания.

Оптимизация технологии ЭКПП позволила определить его оптимальные параметры: давление – 20...40 МПа; сила тока припекания – 8...16 кА. Благодаря оптимизации технологии электроконтактного припекания возможно: 1) установить влияние параметров процесса на свойства и структуру получаемых покрытий; 2) вести процесс в режиме спекания, а не наплавки, обеспечивая тем самым на границе «основа – деталь» отсутствие зоны перемешивания материала покрытия с материалом детали.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Предпосылки управления качеством формируемого покрытия и соединения его с деталью при электроконтактном припекании / В.Н. Корж [и др.] // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеви машинобудування, автоматизація: зб. наукових праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Вип. 23, Кіровоград, 2010. – С. 339–344.
2. Радченко, С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / С.Г. Радченко // Навчальний посібник. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. – 88 с.
3. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: метод. вказівки до лаборатор.-комп'ютер. практикуму для студ. спец. «Технологія машинобудування» усіх форм навчання / уклад.: С.М. Лапач, С.Г. Радченко, Р.В. Галайда. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 116 с.

Поступила 23.01.2015

#### DETERMINING THE OPTIMAL TIMING OF THE ELECTROCONTACT SINTERING PROCESS FOR POWDER COATINGS

V. NICOLAICHUK, A. DUDAN, E. KOZHEVNIKOVA, L. LOPATA

*On the basis of experimental studies and using mathematical modeling comprehensive assessment of the impact of major technological parameters (pressure, current, speed of sintering) of the electrocontact sintering process of powders on physical and mechanical properties of the coatings (adhesion strength and durability) is given. Multivariate experiment with a certain variation of these parameters allowed us to estimate the impact of each of them on the properties of the coatings and to identify the effects of the interaction. It is concluded that in order to improve the physical and mechanical properties of the resulting coatings is advisable to use all three complex technological parameters of the process.*