

УДК 621.791.927

Волков Д. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРИПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ

Одной из перспективных ресурсосберегающих технологий восстановления деталей машин различного назначения (сельскохозяйственной техники, городского и железнодорожного транспорта, технологического оборудования и т. д.) для незначительных объемов производства, характерных для единичного и мелкосерийного типов, является электроконтактное припекание (ЭКП) порошковых материалов [1, 2].

Припекание, в соответствии с [3] – это технологический процесс получения покрытий, заключающийся в нанесении на поверхность детали порошковой формовки или слоя порошка, а также в нагреве их до температуры, обеспечивающей спекание порошкового материала и образование прочной диффузионной связи с деталью. Процесс образования этой связи обеспечивается совместным действием на порошковый слой высокой температуры (0,9–0,95 температуры плавления порошка) и давления (30–60 МПа). Нагрев металлического порошка, засыпаемого между деталью и роликом–электродом, осуществляется за счет тепловой энергии, выделяемой электрическим током на активном сопротивлении [2]. Поэтому ЭКП металлических порошков относится к числу процессов, основную роль в которых играют силовые и температурные факторы активирования. Интенсивное силовое воздействие и высокая скорость нагрева порошкового слоя, позволяют отказаться от химических активаторов процесса, снизить время для его осуществления и повысить прочность сцепления наносимого слоя с основой.

Прочность сцепления покрытия с основным материалом является одним из важнейших параметров долговечности восстановленной или изготовленной детали с использованием покрытий. При ЭКП на прочность сцепления напеченного слоя с основой детали оказывает влияние большое количество факторов. Так авторами работ [4–6] было установлено, что на процесс электроконтактного припекания металлических порошков наибольшее влияние оказывают рабочие параметры процесса, активно воздействующие на само спекание и припекание порошка к основе (давление – P , напряжение холостого хода трансформатора – U_{xx} , величина тока – I , скорость припекания – V). Если установление, экспериментальным путем, степени влияния каждого отдельного фактора на прочность сцепления покрытия с основой не вызывает существенных затруднений, то выявление совокупного воздействия факторов и установления функциональной связи с другими параметрами, вызывает определённые трудности.

Целью данной работы является экспериментальное установление характера изменения прочности сцепления напеченного порошкового слоя с поверхностью восстанавливаемой детали. В зависимости от основных технологических параметров процесса, а так же выявление функциональной взаимосвязи между ними с использованием аппарата математической статистики.

Для решения поставленной задачи по определению оптимальных значений технологических факторов (U_{xx} , P , V), при которых можно 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 [5].

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 двух конусном смесителе в соотношении 50 % ПЖ-1С + 50 % ФХ-800 в течение двух часов.

Первоначально определялись максимальные и минимальные значения действующих независимых переменных, в качестве которых выступали основные технологические факторы U_{xx} , P и V , т. е. устанавливались уровни их варьирования. Наплавка экспериментальных образцов производилась на универсальной шовной машине МШ-2201 по методике [6]. После наплавки определялась прочность сцепления напеченного слоя с поверхностью образца по методике [7]. Результаты экспериментальных исследований прочности сцепления покрытия с основой в зависимости от технологических факторов процесса припекания представлены на рис. 1, 2.

Анализируя характер кривых, отражающих зависимость прочности сцепления от напряжения холостого хода трансформатора и прилагаемого к ролику-электроду давления, можно отметить, что все они имеют максимум (рис. 1). При увеличении напряжения холостого хода трансформатора прочность сцепления увеличивается, причем ее максимум смещается в сторону увеличения давления.

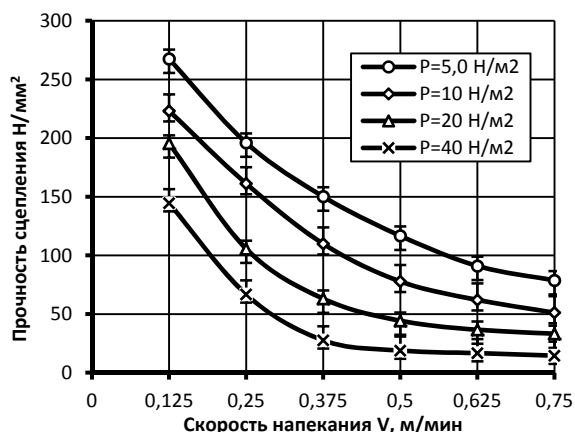
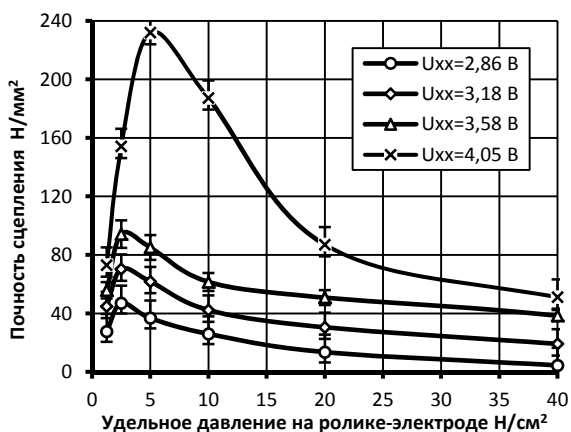


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления от удельного давления на электроде и напряжения холостого хода трансформатора

Рис. 2. Зависимость прочности сцепления от скорости припекания и удельного давления на электроде

Как показывают наблюдения, при малых значениях напряжения (2,28–2,60 В) процесс идет стабильно. Однако при малых давлениях (1,25–2,5 Н/см²) прочность сцепления напеченного слоя с основой незначительна, а иногда напеченный слой даже сходит с поверхности детали в виде плохо спеченной ленты. При увеличении напряжения холостого хода трансформатора до 4,52 В прочность сцепления несколько увеличивается, но процесс идет нестабильно, слой получается подплавленным уже при давлении 5,0 Н/см², а при более низких давлениях происходит даже расплавление слоя порошка и он приплавляется как к детали, так и к поверхности ролика-электрода. Таким образом, в дальнейших исследованиях за верхний предел по напряжению на клеммах трансформатора было принято напряжение 4,05 В.

Прилагаемое давление на ролике-электроде так же существенно влияет на прочность сцепления. При заданном постоянном напряжении холостого хода трансформатора с увеличением усилия на ролике-электроде прочность сцепления вначале увеличивается, достигает максимального значения, а затем довольно резко снижается. Следует отметить, что при малых

давлениях (1,25–2,5 Н/см²) и при напряжении свыше 2,86 В напеченный слой получается подплавленным, рваным, с большим количеством поперечных трещин, подобно тому, как и при напряжении 4,52 В и давлении на ролике–электроде 2,5–5,0 Н/см².

По мере увеличения давления слой получается плотным, с пониженным содержанием пор. При увеличении давления до 20–40 Н/см² прочность сцепления на напряжениях в диапазоне 3,18–4,52 В значительно уменьшается, хотя слой получается ровный, без трещин. На малых же напряжениях слой сходит с детали в виде спеченной спрессованной ленты.

Большое влияние на прочность сцепления напеченного слоя с металлом детали оказывает так же скорость припекания: чем меньше скорость, тем выше показатель прочности сцепления (рис. 2). Увеличение скорости припекания выше 0,5 м/мин приводит не только к резкому снижению прочности сцепления (в 2,5–3 раза), но и к ухудшению качественных показателей слоя. Процесс протекает неустойчиво, а при увеличении скорости свыше 0,75 м/мин становится неуправляемым даже при давлении 20 Н/см², так как порошок на поверхности детали и в зоне контакта не успевает спрессоваться, имеет большое омическое сопротивление и почти весь расплавляется, покрывая неровным слоем поверхность детали и ролика–электрода.

Как следует из представленного материала, удовлетворительное качество сцепления напеченного слоя порошка с основным металлом обеспечивается при следующих уровнях варьирования технологических параметров процесса: напряжения холостого хода трансформатора от 2,86 до 4,05 В, давлении на ролике электроде от 2,5 до 20 Н/см² и скорости припекания от 0,125 до 0,5 м/мин.

На дальнейшем этапе исследований использовали метод математического планирования эксперимента, с целью получения более полной характеристики отклика и установления оптимальных значений технологических факторов, при которых прочность сцепления напеченного слоя с основой достигает максимального значения. Для сокращения числа экспериментов был принят центрально-композиционный, рототабельный план второго порядка типа 2³. Для составления плана-матрицы (табл. 1), ее реализации, построении модели и ее статистической обработки использовали систему Statistica V6.0.437.0 (StatSoft.Inc. 2001) [8, 9].

Таблица 1

План-матрица эксперимента и ее реализация

Факторы	U _{xx}	P	V	Отклик	Y _{сц}		
Размерность	В	Н/см ²	м/мин	Размерность	МПа		
1	2	3	4	5	6		
Интервал варьирования	0,35	5,2	0,11	Экспериментальные значения прочности сцепления напеченного слоя с основой			Среднее значение
Звездные точки (X _i = -1,682)	2,86	2,5	0,125				
Нижний уровень (X _i = -1,0)	3,10	6,0	0,202				
Нулевой уровень (X _i = 0)	3,45	11,2	0,312				
Верхний уровень (X _i = +1,0)	3,80	16,4	0,422				
Звездные точки (X _i = +1,682)	4,05	20,0	0,5	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3	Y _{ср}
Кодированное обозначение	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	
1	2	3	4	5	6	7	8

Продолжение табл. 1.

1	2	3	4	5	6	7	8
1	3,80	16,4	0,422	72,7	81,5	75,4	76,5
2	3,10	16,4	0,422	41,6	38,2	36,5	38,8
3	3,80	6,0	0,422	153,6	155,3	156,4	155,1
4	3,10	6,0	0,422	89,2	81,6	84,5	85,1
5	3,80	16,4	0,202	146,5	141,2	143,6	143,8
6	3,10	16,4	0,202	74,4	69,2	77,4	73,7
7	3,80	6,0	0,202	241,2	238,8	237,8	239,3
8	3,10	6,0	0,202	167,6	167,2	161,6	165,5
9	2,86	11,2	0,312	101,2	96,4	92,5	96,7
10	4,05	11,2	0,312	212,2	208,6	214,3	211,7
11	3,45	2,5	0,312	157,5	161,4	165,6	161,5
12	3,45	20,0	0,312	36,7	42,5	38,4	39,2
13	3,45	11,2	0,125	161,4	166,6	159,2	162,4
14	3,45	11,2	0,500	57,6	65,8	61,4	61,6
15	3,45	11,2	0,312	146,3	148,8	144,5	146,5
16	3,45	11,2	0,312	126,4	128,0	131,5	128,63
17	3,45	11,2	0,312	133,6	136,5	136,5	135,53
18	3,45	11,2	0,312	144,3	144,2	140,2	142,90
19	3,45	11,2	0,312	143,5	143,8	147,2	144,83
20	3,45	11,2	0,312	136,5	140,6	138,4	138,50

Результаты анализа плана эксперимента представлены в табл. 2, из которой видно, что статистически значимые эффекты, когда уровень $p < 0,05$ – критерий Стьюдента, имеют все члены модели. Здесь же приведена величина достоверности аппроксимации $R\text{-sq} = 0,97914$ – общее качество модели хорошее. Расчет коэффициентов регрессии представлен в табл. 3, в которой $t(3)$ – наблюдаемые значения критерия Стьюдента, p – значимость коэффициентов по критерию Стьюдента, два последних столбца – интервалы для коэффициентов. Все коэффициенты модели для всех факторов значимые, рассчитанные статистические критерии подтверждают это. Уравнения регрессии для соответствующих пар факторов имеют вид:

рис. 3, а $Y_{\text{сц}} = 396,77 + 5,03 \cdot P - 0,56 \cdot P^2 + 332,47 \cdot V - 1053,15 \cdot V^2 - 247,8$ (1)

рис. 3, б $Y_{\text{сц}} = 396,77 - 242,28 \cdot U_{xx} + 49,61 \cdot U_{xx}^2 + 332,47 \cdot V - 1053,15 \cdot V^2 - 4,7$ (2)

рис. 3, в $Y_{\text{сц}} = 396,77 - 242,28 \cdot U_{xx} + 49,61 \cdot U_{xx}^2 + 5,03 \cdot P - 0,56 \cdot P^2 - 3,72$ (3)

Таблица 2

Анализ плана эксперимента

	ANOVA; Var.: $Y_{\text{сц}}$; $R\text{-sq}=,97714$; Adj: ,96658 (Прочность сцепления)								
	3 factors, 1 Блоки; MS Pure Error=44,89067								
	DV: $Y_{\text{сц}}$								
Фактор	SS	df	MS	F	p				
(1) U_{xx} (L)	14500,45	1	14500,45	323,0170	0,000010				
U_{xx} (Q)	426,33	1	426,33	9,4972	0,027415				
(2) P (L)	19638,72	1	19638,72	437,4788	0,000005				
P (Q)	2665,43	1	2665,43	59,3761	0,000587				
(3) V (L)	13940,20	1	13940,20	310,5367	0,000011				
V (Q)	1295,39	1	1295,39	28,8567	0,003010				
Недостаток подбора	1004,87	8	125,61	2,7981	0,136050				
Чистая погрешность	224,45	5	44,89						
Total SS	53766,97	19							

Анализируя полученные данные и уравнения регрессии, следует отметить, что при увеличении напряжения холостого хода трансформатора контактной сварочной машины – прочность сцепления увеличивается. Но увеличение напряжения должно быть в определенных пределах согласовано с давлением на ролик-электрод и скоростью припекания: увеличение напряжения при низких давлениях и малой скорости припекания, как уже отмечалось ранее, приводит к подплавлению слоя порошка и снижению прочности сцепления.

Таблица 3

Кoeffициенты модели и ее статистические характеристики

Regr. Coefficients; Var.:Y _{сц} ; R-sqr=,97914; Adj.,93741 (Прочность сцепления) 3 factors, 1 Блоки; MS Residual=63,43583 DV: Y _{сц}							
Фактор	Regressn Коэффиц	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
Mean/Interс.	396,77	406,3227	0,97650	0,400836	-896,33	1689,873	
(1)U _{хх} (L)	-242,28	247,4149	-0,97926	0,399666	-1029,67	545,100	
U _{хх} (Q)	49,61	37,5207	1,32211	0,277899	-69,80	169,014	
(2)P (L)	5,03	3,1083	1,61740	0,204218	-4,86	14,919	
P (Q)	-0,56	0,1700	-3,30528	0,045553	-1,10	-0,021	
(3)V (L)	332,47	164,4496	2,02171	0,136431	-190,88	855,821	
V (Q)	-1053,15	298,3202	-3,53027	0,038632	-2002,54	-103,763	

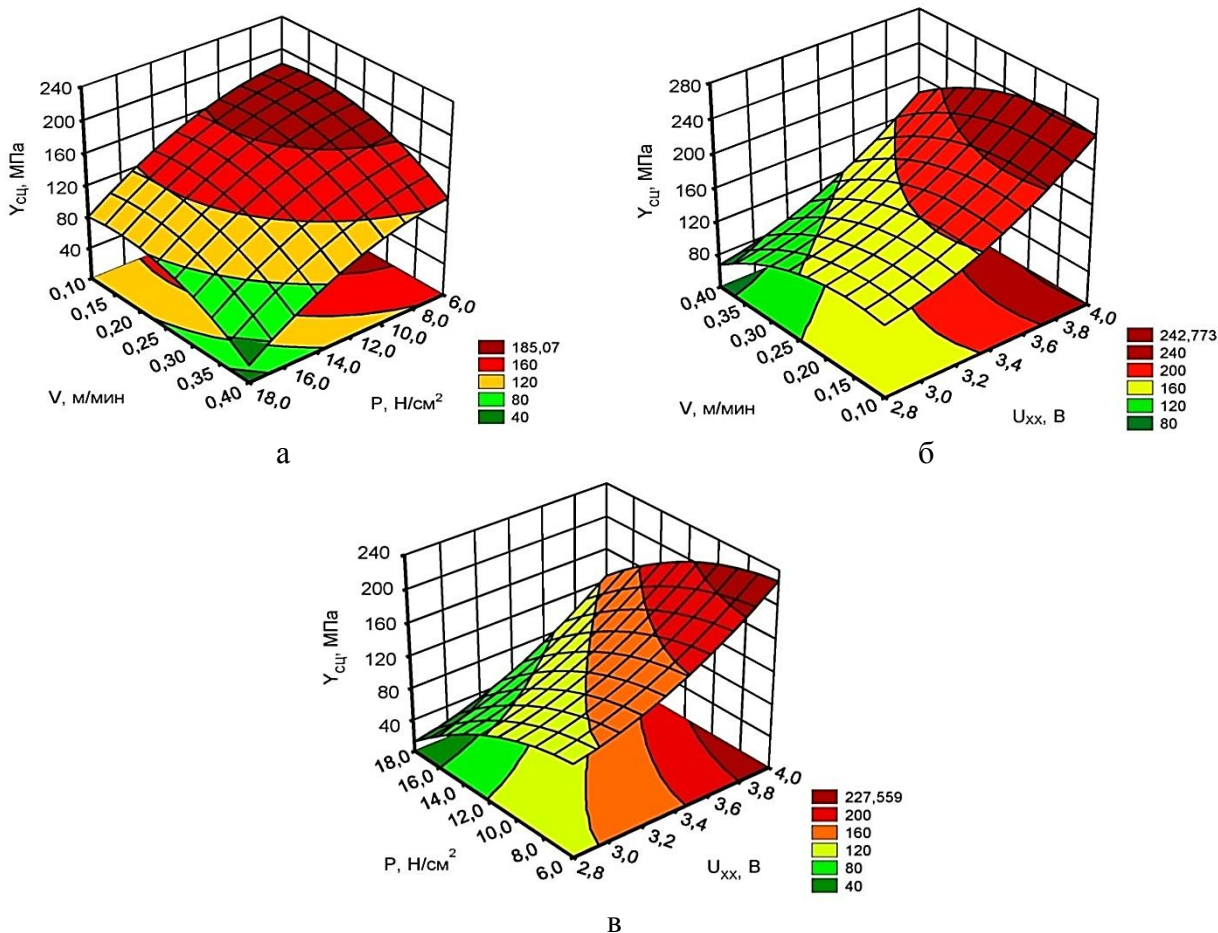


Рис. 3. Поверхности отклика прочности сцепления напеченого порошкового слоя от основных параметров процесса:

а – U_{хх} = 3,45 В (X₁ = 0); б – P = 11,2 Н/см² (X₂ = 0); в – V = 0,312 м/мин (X₃ = 0)

При напряжениях холостого хода трансформатора ниже 3,45 В прочность сцепления напеченного слоя с поверхностью детали во всех случаях не превышает 160 МПа, хотя твердость покрытий изменяется незначительно. Малую прочность сцепления можно объяснить тем, что при данных напряжениях, выделяемой в порошковом слое тепловой мощности недостаточно для протекания диффузионных процессов между частицами порошка и поверхностью детали.

С увеличением напряжения, повышается величина и плотность тока, т. е. увеличивается выделяемая тепловая мощность в порошковом слое, что влечет за собой увеличение температуры пограничной зоны порошка и детали. Повышение же температуры способствует ускорению протекания диффузионных процессов, образованию металлических связей между частицами порошка и поверхностью детали, а это в свою очередь приводит к увеличению прочности сцепления. При напряжении 4,05 В, низких давлениях и малой скорости припекания (менее 0,25 м/мин) прочность сцепления хотя и увеличивается, но нанесенный слой получается достаточно низкого качества. Ухудшение качества связано с тем, что при данном напряжении, происходит интенсивный разогрев порошковой формовки до температур 1300–1400°C. Спекаемый слой становится пластичным и выдавливается из-под ролика-электрода. Кроме того, интенсивно начинают протекать процессы окисления порошкового материала разогретого до высокой температуры.

Для установления оптимальных значений параметров режима припекания, исследовали полученные уравнения регрессии на экстремум, используя функцию maximize в программной среде PTCMathCAD [10]. Окно программы и результаты расчетов представлены на рис. 4.

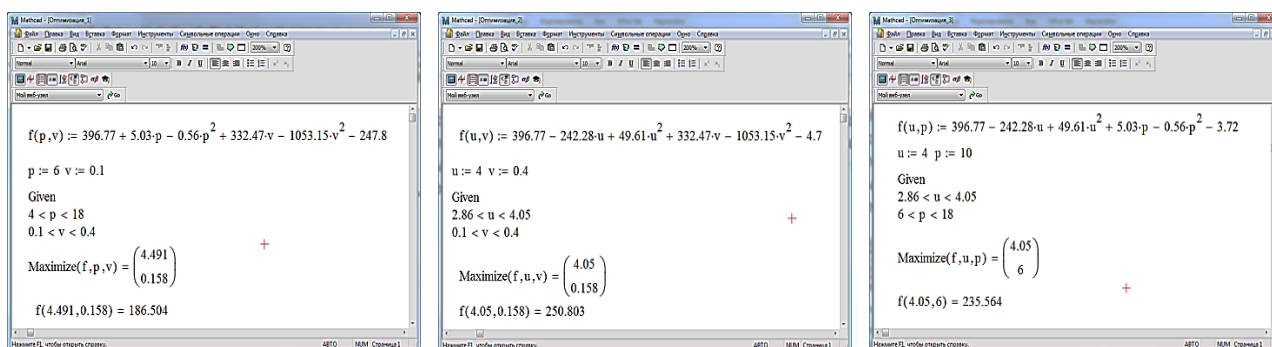


Рис. 4. Окно программы PTCMathCAD с результатами исследования, полученных уравнений регрессии на экстремум

Проведенные эксперименты первого и второго этапов, проверка полученных уравнений регрессии на экстремум (рис. 4) и построение поверхностей отклика (рис. 3) показывают, что прочность сцепления при увеличении давления на ролике-электроде от 2,5 до 20,0 Н/см² вначале увеличивается, достигает максимальной величины, а затем резко снижается (рис. 3, а, в). Такой характер изменения прочности сцепления при увеличении давления можно объяснить следующим образом. При малых давлениях прессования, находящийся между роликом-электродом и деталью порошковый слой имеет достаточно большое омическое сопротивление. Поэтому при прохождении тока в зоне наибольшего уплотнения могут образовываться отдельные, так называемые, токопроводящие «мостики». В этих отдельных местах ток может достигать весьма большой удельной плотности, что будет приводить к расплавлению порошкового материала, находящегося непосредственно в зоне наибольшего уплотнения. На остальных участках порошкового слоя ток не проходит, и его спекание осуществляется только за счет тепла, выделяющегося на соседних участках. Все это приводит к тому, что при малых давлениях наплавленный слой получается «рваный», подплавленный, с большим количеством сквозных трещин и пор.

По мере увеличения давления на ролике–электроде слой порошка уплотняется по всей зоне контакта равномерно, и ток проходит по всей площади. Уменьшается пористость порошковой формовки. Это приводит к увеличению фактической площади контактирования и к равномерному нагреву всей поверхности детали.

Таким образом, проявляется двойственная роль давления при электроконтактном припекании. При увеличении давления увеличивается фактическая площадь контакта, уменьшается пористость, увеличивается доля компактного материала, что приводит к увеличению прочности сцепления. Но в то же время, при увеличении давления уменьшается омическое сопротивление порошка, что приводит к уменьшению мощности тепловыделения в слое, к снижению температуры на поверхности детали, а, следовательно, и к снижению прочности сцепления (рис. 3, а, в). Кроме этого, при увеличении фактической площади контакта, согласно законам термодинамики, увеличивается и ускоряется теплоотвод от поверхности детали в ее массу, а это, уменьшает температуру в пограничном слое детали и приводит к снижению прочности сцепления. Максимальная прочность сцепления получается при равенстве мощности тепловыделения и скорости теплоотвода. Когда скорость тепловыделения превышает теплоотвод, то прочность сцепления снижается, если даже количество тепла будет постоянным. Но в данном случае, при увеличении давления, уменьшается и мощность тепловыделения, в связи с уменьшением омического сопротивления порошкового слоя. Поэтому вполне закономерно довольно резкое снижение прочности сцепления при увеличении давления свыше $10,0 \text{ Н/см}^2$ (рис. 3, б). Максимальная прочность сцепления получается при давлении $6,0 \text{ Н/см}^2$ при всех значениях напряжения холостого хода трансформатора шовной контактной сварочной машины.

Анализируя комплексное влияние напряжения холостого хода трансформатора, давления на ролике–электроде и скорости припекания на прочность сцепления напеченного слоя порошкового материала с поверхностью детали, необходимо отметить, что скорость припекания оказывает так же существенное влияние (рис. 3, а, б). В общем случае, чем меньше скорость припекания, тем выше прочность сцепления. Такое явление можно объяснить тем, что при уменьшении скорости припекания слой порошкового материала и деталь находятся более длительное время под воздействием высоких температур, что способствует лучшему, более полному, протеканию процессов диффузии и образования металлических связей между частицами порошка и поверхностью детали.

Это наглядно видно на макрошлифах полученных экспериментальных наплавов (рис. 5). При малых скоростях припекания ($0,125 \text{ м/мин}$) почти отсутствует граница между напеченным слоем порошка и поверхностью детали (рис. 5, а) и резко обозначена при скорости припекания $0,5 \text{ м/мин}$ (рис. 5, б).

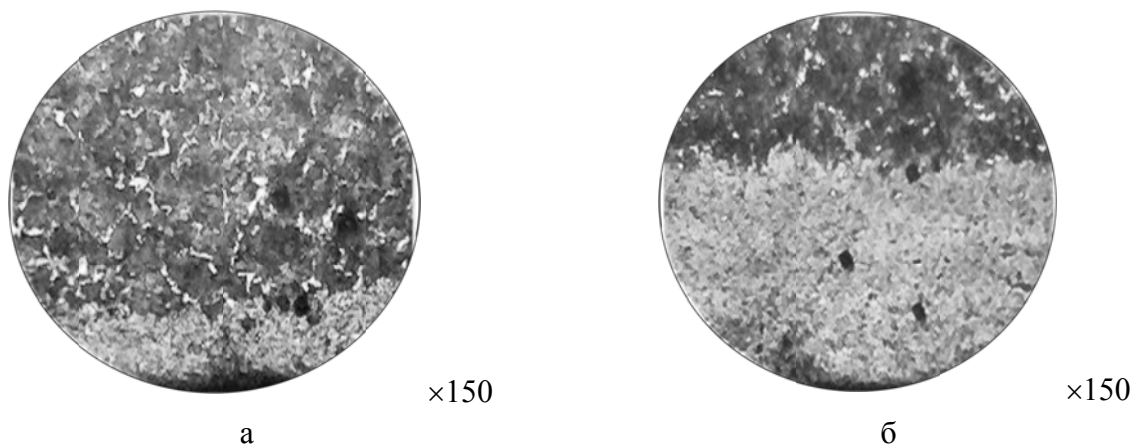


Рис. 5. Макрошлифы зоны сплавления напеченного слоя порошкового материала:
а – при $U_{xx} = 3,58 \text{ В}$, $P = 5,0 \text{ Н/см}^2$, $V = 0,125 \text{ м/мин}$; б – при $U_{xx} = 3,58 \text{ В}$, $P = 5,0 \text{ Н/см}^2$, $V = 0,5 \text{ м/мин}$

Таким образом, при электроконтактном припекании смеси металлических порошков ПЖ-1С + ФХ-800, оптимальным режимом процесса следует считать: напряжение холостого хода трансформатора $U_{xx} = 3,5-4,0$ В, давление на ролике-электроде $P = 5,0-12,0$ Н/см², скорость припекания 0,2–0,3 м/мин. Причем, следует учитывать, что большему напряжению холостого хода должно соответствовать большее значение давления на ролике-электроде и меньшая скорость припекания.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлен характер изменения прочности сцепления спеченного порошкового слоя с поверхностью восстанавливаемой детали в зависимости от основных технологических параметров процесса: давления на электродах – P , напряжения холостого хода трансформатора – U_{xx} и скорости припекания – V .

2. Разработана математическая модель с использованием центрально-композиционного, рототабельного плана второго порядка типа 2^3 , а так же получены уравнения регрессии, описывающие влияние прочности сцепления наплавленного слоя с основой от параметров режима припекания.

3. Установлено, что для получения более высоких показателей по прочности сцепления наплавленного слоя с поверхностью детали, подлежащей восстановлению электроконтактным припеканием оптимальными параметрами режима являются: напряжение холостого хода трансформатора $U_{xx} = 3,5-4,0$ В, давление на ролике-электроде $P = 5,0-12,0$ Н/см², скорость припекания 0,2–0,3 м/мин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. ГОСТ 17359-82. Порошковая металлургия. Термины и определения. Взамен ГОСТ 17359-71; введ. 1983–01–07. М. : Изд-во стандартов, 1983. – 20 с.
4. Сайфуллин Р. Н. Прочность сцепления и пористость покрытий, полученных электроконтактной приваркой порошковых композиций / Р. Н. Сайфуллин // Сварочное производство. – 2007. – № 9. – С. 14–16. – ISSN 0491-6441.
5. Левин Э. Л. Оценка прочности сцепления ленты с основным металлом при восстановлении деталей электроконтактной приваркой / Э. Л. Левин, Р. Н. Сайфуллин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 10. – С. 48–49. – ISSN 1813-1336.
6. Волков Д. А. Исследование влияния шероховатости поверхности детали и гранулометрического состава порошкового материала на прочность сцепления при электроконтактной наплавке / Д. А. Волков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – № 3 (28) – С. 86–93. – ISSN 1993-8322.
7. 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 : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 2 (19) – С. 57–64. – ISSN 1993-8322.
8. STATISTICABase / Продукты компании StatSoftInc. / Электронный ресурс : режим доступа – http://www.statsoft.ru/products/STATISTICA_Base.
9. 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.
10. Оптимизация функций одной и нескольких переменных в PTCMathCAD / Электронный ресурс : режим доступа – <http://cadregion.ru>.