

УДК 621.791.927

Волков Д. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ

Современное развитие техники и научно-технический прогресс во всех отраслях промышленности, а особенно машиностроения, требует разработки новых материалов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных свойств и технологичностью в процессе производства. При этом следует отметить, что повышение эксплуатационной надежности деталей и узлов современной техники без существенного увеличения их массы и стоимости – весьма сложная, и, в то же время, актуальная задача сегодняшнего дня [1].

Одним из путей решения этой задачи является создание композиционных износостойких покрытий на рабочих поверхностях контактирующих деталей узлов трения. Важное место в упрочнении и восстановлении поверхностей трения занимает технология нанесения покрытий из композиционных материалов на основе металлической матрицы методом электроконтактной наплавки (припекания) [2]. Данный метод позволяет совместить в одном технологическом цикле процессы прессования и спекания без применения восстановительной или защитной атмосферы и, при экономных энергетических режимах и незначительных затратах времени, формировать покрытия из композиций материалов с различными физико-механическими свойствами. К сожалению, детали, подлежащие восстановлению электроконтактной наплавкой металлическими порошками, могут иметь различную величину шероховатости изношенной поверхности, которая образовалась либо в процессе эксплуатации, либо явилась следствием предварительной механической обработки восстанавливаемой поверхности. Кроме этого, исходные порошковые материалы, используемые для восстановительной электроконтактной наплавки, могут иметь различный гранулометрический состав [3].

Целью данной работы является экспериментальное установление характера изменения прочности сцепления спеченного порошкового слоя с поверхностью восстанавливаемой детали, в зависимости от подготовки ее поверхности при электроконтактной наплавке и математическое описание взаимного влияния шероховатости поверхности и фракционного состава порошкового материала на прочность сцепления.

В качестве исследуемого порошкового материала использовался порошок железа марки ПЖ-1С (ГОСТ 9849-74), как наиболее широко используемый в качестве металлической матрицы для получения композиционных износостойких слоев на поверхности восстанавливаемых деталей методом электроконтактной наплавки.

Предварительно определялся гранулометрический состав испытуемого порошка ситовым анализом. Данный анализ проводили сухим просеиванием в соответствии с методикой [4] на специальном устройстве для отсева порошков на фракции HAVER-Test Sieve Shaker EML 200 digital (HAVER and BOECKER, Германия). Образцы для наплавки в виде тел вращения имели различную шероховатость (от $R_a = 50$ до $R_a = 0,05$). При этом чистоту от $R_a = 50$ до $R_a = 1,6$ получали на токарном станке, от $R_a = 0,8$ до $R_a = 0,2$ – шлифованием, от $R_a = 0,1$ до $R_a = 0,05$ – полированием. Измерение шероховатости поверхности производилась портативным профилометром-профилографом SurfTest SJ-400 (MITUTOYO, Япония). Наплавка производилась на универсальной шовной машине МШ-2201 на следующих режимах: давление на электродах $P = 5$ МПа; скорость наплавки $V = 0,0042$ м/сек.; напряжения холостого хода трансформатора – 3,18; 3,58 и 4,05 В. Первоначально наплавляли порошок одной фракции $125 > \dots > 63$ мкм. После наплавки производилась оценка прочности сцепления наплавленного слоя по методике [5–7]. Результаты исследований представлены на рис. 1.

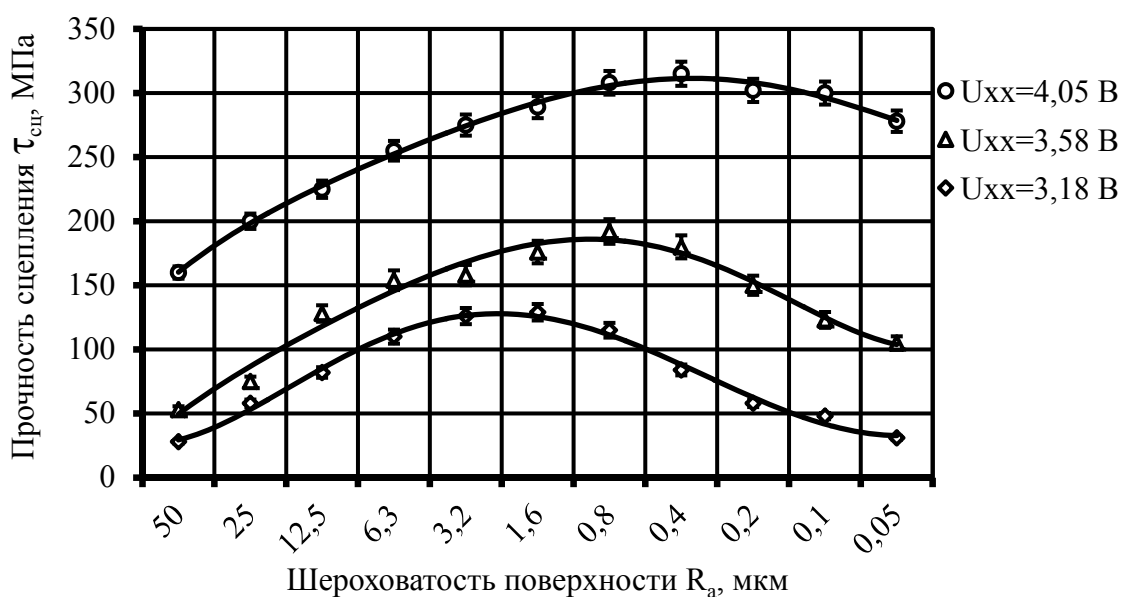


Рис. 1. Изменение прочности сцепления от величины шероховатости поверхности при различных напряжениях холостого хода трансформатора

Из анализа рис. 1 следует, что качество сцепления наплавленного слоя изменяется в зависимости от величины шероховатости поверхности детали. Каждая из кривых, построенных для различных напряжений холостого хода трансформатора, имеет максимум.

Такое изменение прочности сцепления от величины шероховатости поверхности можно объяснить следующим образом. Известно, что тепловой поток, подобно электрическому току, протекает в месте контакта поверхностей. Поэтому при электроконтактной наплавке металлическим порошком припекание частиц порошка в первую очередь будет происходить по вершинам микронеровностей поверхности образцов, как при контактной сварке металлов [2].

При грубой обработке поверхности, таких площадок контакта весьма мало, и поэтому прочность сцепления незначительна. По мере уменьшения величины шероховатости количество микронеровностей на единицу поверхности увеличивается, тем самым увеличивается фактическая площадь контакта частиц порошка с поверхностью детали, что приводит к увеличению прочности. При дальнейшем улучшении качества подготовки поверхности (уменьшение шероховатости) происходит уменьшение суммарной фактической площади контакта между частицами порошка с поверхностью детали – появляются поры между спеченным слоем порошка и гладкой поверхностью детали. Поэтому прочность сцепления снижается.

Следует отметить, что максимумы прочности сцепления у кривых, построенных при различных напряжениях холостого хода трансформатора, не соответствуют одной и той же величине шероховатости поверхности при постоянно дисперсности порошкового материала. Это можно объяснить тем, что при увеличении фактической площади контакта (улучшение чистоты обработки поверхности) происходит увеличение отвода тепла из пограничного слоя в тело детали. Если при более высоком напряжении холостого хода трансформатора, когда мощность тепловыделения наибольшая, тепловое равновесие наступает при $R_a = 0,8 \dots 0,4$ мкм, то по мере его уменьшения (при уменьшении мощности тепловыделения) тепловое равновесие наступает при более грубой обработке поверхности, а, следовательно, и максимум прочности сцепления сдвигается в сторону $R_a = 3,2 \dots 1,6$ мкм.

Таким образом, при давлении на электродах $P = 5$ МПа и скорости наплавки $V = 0,0042$ м/сек. лучшей подготовкой поверхности деталей, подлежащих восстановлению электроконтактной наплавкой металлическими порошками, следует считать обработку поверхности с уровнем шероховатости $R_a = 1,6 \dots 0,2$ мкм.

Проведенные эксперименты позволили установить уровни варьирования величины шероховатости поверхности. Для дальнейшего исследования взаимного влияния величины шероховатости поверхности и гранулометрического состава порошка железа на прочность сцепления поверхность образцов готовилась с $R_a = 1,6; 0,4$ и $0,1$ мкм. Фракции порошка железа были разбиты на три группы: $40 > \dots$, $40 > \dots > 80$ и $80 > \dots > 120$ мкм.

Проведенные предварительные опыты показали, что при напекании мелкой фракции порошка ($40 > \dots$ мкм) под напряжением $4,05$ В поверхность напеченного слоя получается подплавленной. Поэтому в дальнейшем опыты проводили при напряжении холостого хода трансформатора $3,58$ В, давлении 5 МПа и скорости напекания $0,0042$ м/сек.

При исследовании и совершенствовании наплавочных материалов, где имеется несколько компонентов (фракций), от которых зависят наплавочно-технологические свойства материалов и напавленного металла, удобно пользоваться симплексно-решетчатым планированием [8, 9]. Поэтому для установления зависимости прочности сцепления напавленного слоя при различных уровнях чистоты поверхности наплавляемой детали и фракционного состава порошка железа ($X_1 - h_{cp} \leq 40$ мкм; $X_2 - 40 < h_{cp} \leq 80$ мкм; $X_3 - 80 < h_{cp} \leq 120$ мкм) создали математические модели путем симплексно-решетчатого планирования при помощи системы Statistica (StatSoft) [9].

В качестве факторов выступал фракционный состав смеси порошка железа. В качестве отклика – прочность сцепления напавленного слоя с основой. Использовали стандартный план: 3 factors simplex-centroid design (3 фактора симплекс-центроидное планирование). Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 1.

Таблица 1

План-матрица эксперимента и ее реализация

№ п/п	Факторы			Отклики		
	Фракции порошка железа, мкм			Шероховатость поверхности, мкм		
	$h_{cp} \leq 40$	$40 < h_{cp} \leq 80$	$80 < h_{cp} \leq 120$	$R_a = 1,6$	$R_a = 0,4$	$R_a = 0,1$
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
1	1,000	0,000	0,000	175	185	173
2	0,000	1,000	0,000	92	161	141
3	0,000	0,000	1,000	84	155	135
4	0,500	0,500	0,000	129	167	148
5	0,500	0,000	0,500	122	160	125
6	0,000	0,500	0,500	99	155	120
7	0,333	0,333	0,333	136	169	153
8	0,667	0,167	0,167	154	173	148
9	0,167	0,667	0,167	118	166	132
10	0,167	0,167	0,667	105	163	156

Производили анализ плана для трех моделей (линейной, квадратичной и кубической) для трех уровней шероховатости поверхности с использованием системы Statistica (StatSoft) [9]. Основные статистики и результаты дисперсионного анализа для трех уровней шероховатости представлены в табл. 2–10. Было установлено, что для всех трех случаев адекватной является специальная кубическая модель. Этот вывод позволяет сделать следующий анализ. Статистические значимые эффекты наблюдаются, когда уровень $p < 0,05$ – критерий Стьюдента. В нашем случае для каждой из моделей, которая соответствует заданному уровню шероховатости поверхности, имеем:

при $R_a = 1,6$ мкм	$p = 0,021166 < 0,05$	табл. 2;
при $R_a = 0,4$ мкм	$p = 0,013966 < 0,05$	табл. 5;
при $R_a = 0,1$ мкм	$p = 0,041390 < 0,05$	табл. 8.

Таблица 2

Анализ плана для трех моделей (линейной, квадратичной и кубической), построенных при шероховатости поверхности детали $R_a = 1,6$

Модель	ANOVA; Var.:Y (Прочность сцепления_6) 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 10 Запу Sequential fit of models of increasing complexity								
	SS Эффект	df Эффект	MS Эффект	SS Ошибка	df Ошибка	MS Ошибка	F	p	R-Sqr
Линейный	6669,000	2	3334,500	583,4000	7	83,34286	40,00943	0,000148	0,919558
Квадратны	288,275	3	96,092	295,1254	4	73,78136	1,30238	0,389089	0,959307
Специальный к	256,236	1	256,236	38,8890	3	12,96301	19,76673	0,021166	0,994638
Total Adjusted	7252,400	9	805,822						

Таблица 3

Дисперсионный анализ специальной кубической модели, построенной при шероховатости поверхности детали $R_a = 1,6$

Источник	Overall Fit of Model; Var.:Y (Прочность сцепления_6) 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 10 Запу					
	SS	df	MS	F	p	
Модель	7213,511	6	1202,252	92,74479	0,001707	
Всего ошибок	38,889	3	12,963			
Total Adjusted	7252,400	9	805,822			

Таблица 4

Коэффициенты регрессии и статистические характеристики специальной кубической модели, построенной при шероховатости поверхности детали $R_a = 1,6$

Фактор	Coeffs (recoded comps); Var.Y; R-sqr=,9946; Adj:,9839 (Прочность сцепления_6) 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 10 Запу DV: Y; MS Residual=12,96301						
	Коэффиц	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
(A)X1	175,7848	3,4805	50,50571	0,000017	164,7083	186,8612	
(B)X2	92,6029	3,4805	26,60627	0,000116	81,5265	103,6794	
(C)X3	82,4211	3,4805	23,68088	0,000165	71,3446	93,4976	
AB	-15,2246	17,5201	-0,86898	0,448797	-70,9813	40,5321	
AC	-31,5882	17,5201	-1,80297	0,169176	-87,3449	24,1685	
BC	42,0481	17,5201	2,40000	0,095875	-13,7086	97,8048	
ABC	513,5294	115,5042	4,44598	0,021166	145,9434	881,1154	

Остаточная сумма квадратов (SS Residual) для наших моделей составляет:

при $R_a = 1,6$ мкм SS Effect = 256,236 табл. 2;

при $R_a = 0,4$ мкм SS Effect = 90,3529 табл. 5;

при $R_a = 0,1$ мкм SS Effect = 406,019 табл. 8.

Для выборки объемом n ($n = 10$) выборочная дисперсия как сумма квадратов отклонений от выборочного среднего, деленная на $n-1$, SS (Error) для наших моделей составляет:

при $R_a = 1,6$ мкм SS (Error) = 38,889 табл. 3;

при $R_a = 0,4$ мкм SS (Error) = 10,1016 табл. 6;

при $R_a = 0,1$ мкм SS (Error) = 102,238 табл. 9.

Средний квадрат эффекта (MS Effect) и компоненты дисперсии, обусловленной внутригрупповым разбросом, называемой средним квадратом ошибки (MS Error) для наших моделей составляют:

при $R_a = 1,6$ мкм MS (Effect) = 256,236 MS (Error) = 12,96301 табл. 2;
 при $R_a = 0,4$ мкм MS (Effect) = 90,3529 MS (Error) = 3,36720 табл. 5;
 при $R_a = 0,1$ мкм MS (Effect) = 406,019 MS (Error) = 34,4127 табл. 8.

Таблица 5

Анализ плана для трех моделей (линейной, квадратичной и кубической), построенных при шероховатости поверхности детали $R_a = 0,4$

Модель	ANOVA; Var.: Y (Прочность сцепления) 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 10 Запу Sequential fit of models of increasing complexity								
	SS Эффект	df Эффект	MS Эффект	SS Ошибка	df Ошибка	MS Ошибка	F	p	R-Sqr
Линейный	600,4444	2	300,2222	127,9556	7	18,27937	16,42411	0,002272	0,824333
Квадратны	27,5010	3	9,1670	100,4545	4	25,11364	0,36502	0,783023	0,862089
Специальный к	90,3529	1	90,3529	10,1016	3	3,36720	26,83325	0,013966	0,986132
Total Adjusted	728,4000	9	80,9333						

Таблица 6

Дисперсионный анализ специальной кубической модели, построенной при шероховатости поверхности детали $R_a = 0,4$

Источник	Overall Fit of Model; Var.: Y (Прочность сцепления) 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 10 Запу				
	SS	df	MS	F	p
Модель	718,2984	6	119,7164	35,55368	0,007027
Всего ошибок	10,1016	3	3,3672		
Total Adjusted	728,4000	9	80,9333		

Таблица 7

Коэффициенты регрессии и статистические характеристики специальной кубической модели, построенной при шероховатости поверхности детали $R_a = 0,4$

Фактор	Coeffs (recoded comps); Var.: Y; R-sqr=,9861; Adj:,9584 (Прочность сцепления) 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 10 Запу DV: Y; MS Residual=3,367201						
	Коэффиц	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
(A)X1	184,5214	1,77387	104,0218	0,000002	178,8761	190,1666	
(B)X2	161,2487	1,77387	90,9021	0,000003	155,6034	166,8939	
(C)X3	155,6123	1,77387	87,7246	0,000003	149,9670	161,2576	
AB	-24,4599	8,92930	-2,7393	0,071381	-52,8769	3,9571	
AC	-39,7326	8,92930	-4,4497	0,021118	-68,1496	-11,3156	
BC	-10,2781	8,92930	-1,1511	0,333130	-38,6951	18,1390	
ABC	304,9412	58,86803	5,1801	0,013966	117,5968	492,2855	

Критерий Фишера F служит для проверки действительно ли отношение дисперсий значимо больше 1. С помощью этого критерия сравнивают полученные внутригрупповые дисперсии. Для наших моделей он составляет:

при $R_a = 1,6$ мкм F = 19,76673 табл. 2;
 при $R_a = 0,4$ мкм F = 26,83325 табл. 5;
 при $R_a = 0,1$ мкм F = 11,79852 табл. 8.

Качество регрессионной модели оценивают с помощью коэффициента детерминации R-Sqr (R-квадрат). Для наших моделей он составляет:

при $R_a = 1,6$ мкм R-Sqr = 0,994638 \approx 1,0 табл. 2;
 при $R_a = 0,4$ мкм R-Sqr = 0,986132 \approx 1,0 табл. 5;
 при $R_a = 0,1$ мкм R-Sqr = 0,954338 \approx 1,0 табл. 8.

Из дисперсионного анализа видно, что критерий Фишера, критерий Стьюдента, остаточная сумма квадратов соответствуют достаточно высокому уровню значимости, и можно определять коэффициенты регрессионного уравнения. Коэффициенты регрессионного уравнения для трех моделей, полученные в системы Statistica [9] представлены в табл. 4, 7 и 10.

Таблица 8

Анализ плана для трех моделей (линейной, квадратичной и кубической), построенных при шероховатости поверхности детали Ra = 0,1

Модель	ANOVA; Var.:Y (Прочность сцепления_10) 3 Factor mixture design; Mixture total=1., 10 Запу Sequential fit of models of increasing complexity								
	SS Эффект	df Эффект	MS Эффект	SS Ошибка	df Ошибка	MS Ошибка	F	p	R-Sqr
Линейный	1634,800	2	817,4000	626,1000	7	89,4429	9,13880	0,011176	0,723075
Квадратны	116,843	3	38,9476	509,2571	4	127,3143	0,30592	0,821020	0,774755
Специальный к	406,019	1	406,0190	103,2381	3	34,4127	11,79852	0,041390	0,954338
Total Adjusted	2260,900	9	251,2111						

Таблица 9

Дисперсионный анализ специальной кубической модели, построенной при шероховатости поверхности детали Ra = 0,1

Источник	Overall Fit of Model; Var.:Y (Прочность сцепления_10) 3 Factor mixture design; Mixture total=1., 10 Запу					
	SS	df	MS	F	p	
Модель	2157,662	6	359,6103	10,44993	0,040388	
Всего ошибок	103,238	3	34,4127			
Total Adjusted	2260,900	9	251,2111			

Таблица 10

Коэффициенты регрессии и статистические характеристики специальной кубической модели, построенной при шероховатости поверхности детали Ra = 0,1

Фактор	Coeffs (recoded comps); Var.:Y; R-sqr=.9543; Adj.:.863 (Прочность сцепления_10) 3 Factor mixture design; Mixture total=1., 10 Запу DV: Y; MS Residual=34,4127						
	Коеффиц	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
(A)X1	173,6667	5,5799	31,12361	0,000073	155,909	191,424	
(B)X2	143,2381	5,5799	25,67036	0,000130	125,480	160,996	
(C)X3	132,0952	5,5799	23,67340	0,000165	114,338	149,853	
AB	-35,7857	26,0819	-1,37205	0,263643	-118,790	47,219	
AC	-73,7143	26,0819	-2,82626	0,066394	-156,719	9,290	
BC	-52,5000	26,0819	-2,01289	0,137598	-135,504	30,504	
ABC	657,0000	191,2721	3,43490	0,041390	48,287	1265,713	

В табл. 4, 7 и 10 первый столбик – это коэффициенты регрессионного уравнения; $t(3)$ – наблюдаемые значения критерия Стьюдента; p – значимость коэффициентов по критерию Стьюдента. Коэффициенты можно считать значимыми, если $p < 0,05$. Для того чтобы проиллюстрировать полученные результаты, были построены контурные графики полученных моделей (рис. 2). Математическое описание поверхностей отклика построенных моделей имеет вид:

при $R_a = 1,6$ мкм:

$$Y_{\tau_{cc}} = 175,78 \cdot X_1 + 92,6 \cdot X_2 + 82,42 \cdot X_3 - 15,22 \cdot X_1 \cdot X_2 - 31,588 \cdot X_1 \cdot X_3 + 42,048 \cdot X_2 \cdot X_3 + 513,53 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \tag{1}$$

при $R_a = 0,4$ мкм:

$$Y_{\tau_{\text{сц}}} = 184,5 \cdot X_1 + 161,25 \cdot X_2 + 155,61 \cdot X_3 - 24,46 \cdot X_1 \cdot X_2 - 39,73 \cdot X_1 \cdot X_3 - 10,278 \cdot X_2 \cdot X_3 + 304,94 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (2)$$

при $R_a = 0,1$ мкм:

$$Y_{\tau_{\text{сц}}} = 173,67 \cdot X_1 + 143,2 \cdot X_2 + 132,09 \cdot X_3 - 35,79 \cdot X_1 \cdot X_2 - 73,71 \cdot X_1 \cdot X_3 - 52,5 \cdot X_2 \cdot X_3 + 657 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (3)$$

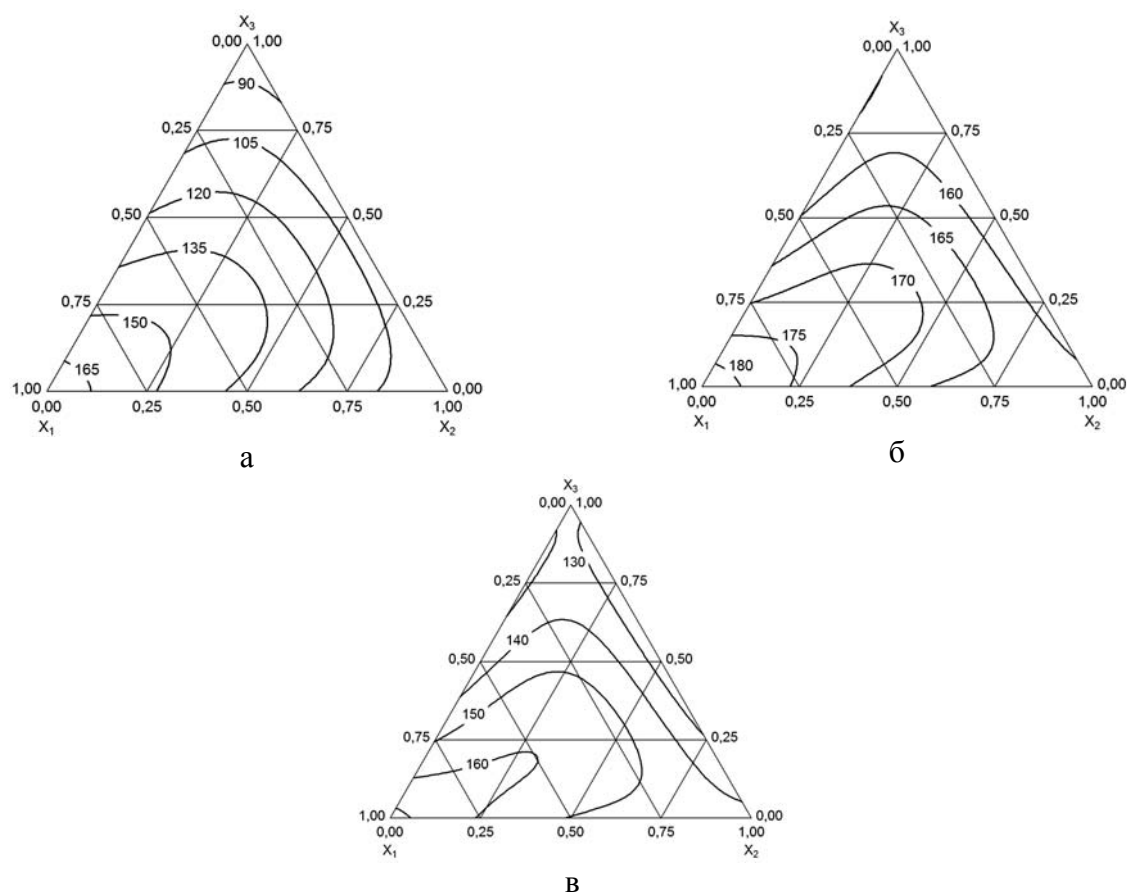


Рис. 2. Контурные графики зависимости прочности сцепления наплавленного слоя с основой от фракционного состава порошковой композиции и чистоты обработки восстанавливаемой поверхности:

а – $R_a = 1,6$; б – $R_a = 0,4$; в – $R_a = 0,1$

Из анализа полученных уравнений регрессии (1–3), а так же контурных графиков (рис. 2, а, б, в) зависимости прочности сцепления наплавленного слоя с основой от фракционного состава порошковой композиции и чистоты обработки восстанавливаемой поверхности можно сказать, что максимальная прочность сцепления при различных классах чистоты подготовки поверхности получается при использовании мелкой фракции порошка ($h_{cp} \leq 40$ мкм).

Это можно объяснить следующими причинами:

1. Мелкая фракция присадочного порошкового материала имеет большее омическое сопротивление, что увеличивает мощность тепловыделения в слое, а это увеличивает прочность сцепления.

2. Порошок данной фракции более полно заполняет впадины микронеровностей, тем самым увеличивает фактическую площадь контакта напеченного слоя с поверхностью восстанавливаемой детали.

Разница в показаниях по прочности для этой фракции порошка незначительна, всего 12 МПа. Значительное различие в качестве прочности сцепления при напекании крупной фракции порошка ($80 < h_{cp} \leq 120$ мкм) – 20...75 МПа.

Такое явление можно объяснить тем, что наиболее оптимальное соотношение между частицами порошка крупной фракции и расположением микронеровностей поверхности наблюдается при шероховатости поверхности восстанавливаемой детали $R_a = 0,4$ мкм. При шероховатости поверхности $R_a = 1,6$ мкм частицы порошка располагаются по выступам, а при $R_a = 0,1$ мкм крупные частицы образуют поры с ровной поверхностью, что приводит к уменьшению фактической площади контакта, а, следовательно, и к уменьшению прочности сцепления.

Следует отметить, что данный вопрос требует более детального исследования, так как изменение гранулометрического состава присадочного порошкового материала влияет не только на прочность сцепления, но и должно оказывать влияние на физико-механические свойства покрытия в целом: на его твердость, пористость, а, следовательно, и на износостойкость.

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлен характер изменения прочности сцепления спеченного порошкового слоя с поверхностью восстанавливаемой детали в зависимости от чистоты обработки последней и напряжения холостого хода трансформатора наплавочной установки. Доказано, что во избежание подплавления напеченного слоя наплавку следует производить при напряжении холостого хода трансформатора 3,58 В.

Разработана математическая модель с использованием симплексно-решетчатого планирования, а так же получены уравнения регрессии, описывающие влияние прочности сцепления наплавленного слоя с основой от фракционного состава порошковой композиции и чистоты обработки восстанавливаемой поверхности.

Установлено, что для получения более высоких показателей по прочности сцепления наплавленного слоя с поверхностью детали, подлежащей восстановлению электроконтактной наплавкой, ее следует подвергать механической обработке точением или шлифованием до выведения следов износа на уровень $R_a = 1,6...0,2$ мкм. При этом следует использовать присадочные порошковые материалы мелких фракций $40 < h_{cp} \leq 80$ мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепція державної промислової політики України / [М. Г. Чумаченко, О. І. Амоша, М. І. Іванов та ін.] – Донецьк : Інститут економіки промисловості НАН України, 2000. – 424 с.
2. Ярошевич В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещажин. – Минск : Наука и техника, 1982. – 256 с.
3. Волков Д. А. Особенности формирования начального электрического сопротивления при электроконтактной наплавке фрикционных порошковых материалов / Д. А. Волков, В. Т. Катренко, В. А. Пресняков // Машинознавство. – 2004. – № 3 (81). – С. 47–49.
4. ГОСТ 18318-94. Межгосударственный стандарт. Порошки металлические. Определение размера частиц сухим просеиванием. Взамен ГОСТ 18318-73; введ. 1997–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1996. – 12 с.
5. Волков Д. А. Методы оценки прочности сцепления покрытий, полученных электроконтактной наплавкой порошковых материалов в металлической оболочке / Д. А. Волков, В. Т. Катренко // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 2 (19) – С. 57–64.
6. Products & Services/Coating Services Coating Services Overview [Электронный режим]. – Режим доступа: <http://www.stellite.com>.
7. А. с. 278182 СССР, МПК G01n 19/04. Приспособление для определения прочности сцепления покрытий с основным металлом / Н. Н. Дорожкин, И. М. Зуев (СССР). – № 1142072/25-28 ; заявл. 28.11.1967 ; опубл. 05.08.1970 , Бюл. № 25.
8. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 167 с.
9. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с. : ил.