

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ КОНТАКТНЫХ НАГРУЗОК1) *Белорусский национальный технический университет*, 2) *ОАО «МЗКТ»*

В статье представлены результаты исследования износостойкости, прочности сцепления разработанных композиционных материалов с применением планирования эксперимента для оптимизации составов композиционных материалов с целью обеспечения требуемого качества покрытий.

Несмотря на интенсивное развитие технологий газотермического напыления покрытий по-прежнему остается актуальной задача снижения себестоимости данных процессов при увеличении качества покрытий. Основным направлением удешевления напыления является разработка новых композиций и материалов, заменяющих дорогостоящие без потери качества. В настоящее время для нанесения покрытий широко применяются самофлюсующиеся порошки на основе никеля, недостатком которых является высокая стоимость. Порошки на железной основе обладают стоимостью 2 – 4 раза меньшей, но вследствие более высокой температуры плавления, низкой пластичности и высокой окисляемости их технологичность ниже. Такие порошки целесообразно применять либо при введении в них большого количества легирующих элементов, пластификаторов, либо как основа для механических смесей.

Создание композиции из самофлюсующихся материалов на основе железа, термореагирующих и медьсодержащих порошковых материалов, позволит получить покрытия с необходимыми физико-механическими, эксплуатационными свойствами при невысокой стоимости относительно материалов на никелевой основе.

Исходя из выше сказанного, целью настоящей работы является повышение эксплуатационных свойств опорных поверхностей деталей, работающих в условиях больших контактных, газотермическим напылением композиционных.

Для исследований, с учетом получения прогнозируемых физико-механических свойств напыленных покрытий, были составлены композиции (таблица 1) из порошков, химический состав которых представлен в таблице 2. Важно определить применимость данных композиций для технологии газотермического напыления без последующего оплавления покрытий и при положительном результате найти соотношения компонентов смеси, обеспечивающих наибольшую прочность сцепления и износостойкость при минимальной себестоимости [1 – 3].

Таблица 1 – Предложенные композиции для газотермического напыления

№ композиции	Состав композиции
1	ПТ-НА-01 + ПГ-19М-01 + ПР-Х4Г2Р4С2Ф
2	ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф + ПТ-НА-01
3	ПТ-ЮНХ16СР3 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)

Таблица 2 – Химический состав порошков

Марка порошка	Химический состав
ПТ-НА-01	основа Ni; 4,0-5,5% Al
ПР-Х4Г2Р4С2Ф	основа Fe; 3,7% Cr; 2,2% Mn; 3,8% B; 2,5% Si; 0,8% V
ПГ-19М-01	основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al
ПР-НД42СР	основа Ni – Cu; 42,5% Cu; 0,2% C; 0,9% Si; 1% B; до 3% Fe
ПТ-ЮНХ16СР2	основа Ni; 0,7% C; 16% Cr; 3,2% Si; 2,6% B; 1,2% Al

Для обоснования выбора составов композиций проводились экспресс-испытания на износостойкость (рис. 1), а также визуальный контроль полученных покрытий на отсутствие их отслоения от основы. Из графика видно, что износостойкость полученных покрытий превышает

износостойкость стали 45 и сравнима с износостойкостью оплавленного покрытия из сплава ПГ-СР4, это свидетельствует о правильности выбора составов композиций. Для проведения дальнейших исследований были выбраны наиболее износостойкие композиции № 1 и 2, кроме того, на некоторых образцах наблюдалось отслоение покрытий, напыленных из композиции № 3, что не гарантирует работоспособность детали с таким покрытием [4].

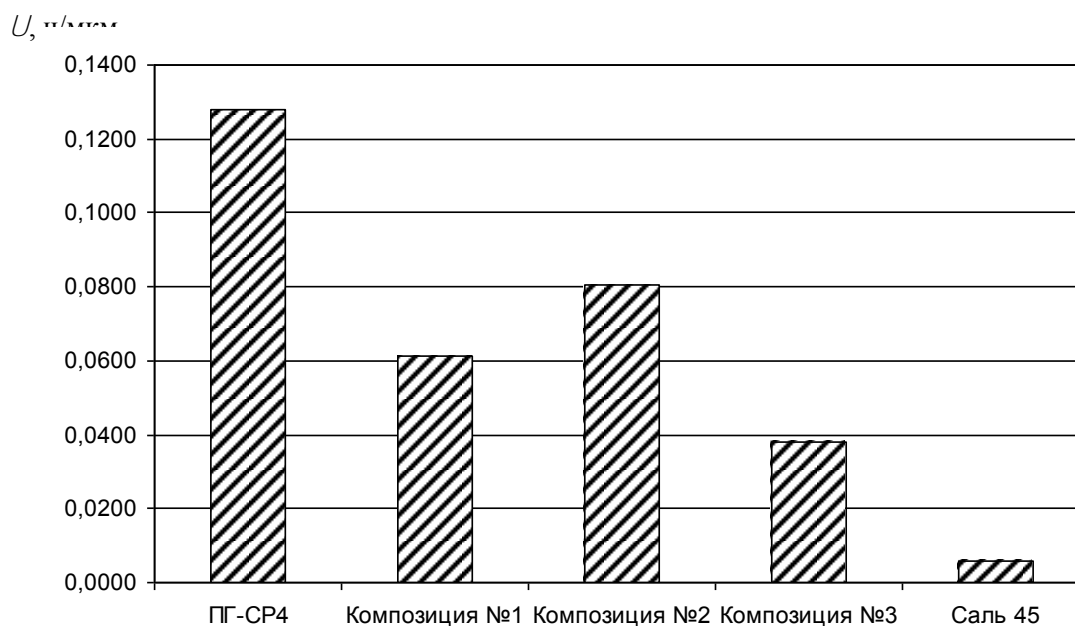


Рис. 1. – Диаграмма износостойкости

Для выявления степени влияния компонентов композиции на прочность сцепления покрытия с основой и его износостойкость проводилось планирование эксперимента. При обработке результатов планирования эксперимента и получения зависимости функции отклика от входящих факторов применялась стандартная программа – Statistica 6.0.

Оптимизация состава композиции ПТ-НА-01 + ПГ-19М-01 + ПР-Х4Г2Р4С2Ф. В качестве независимых переменных факторов принято содержание порошков: ПТ-НА-01 (X1); ПГ-19М-01 (X2); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (X3). Параметром оптимизации являлась прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{сц}$ (Y1), при обеспечении износостойкости U более 0,1 ч/мкм (Y2).

В таблице 3 приведены уровни факторов и их кодированные значения, соответствующие симплекс-центроидному плану, а в таблице 4 – матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 3 – Уровни варьирования компонентов

Обозначения	Исследуемые факторы	Уровни факторов					
		0	1/6	1/3	1/2	2/3	1
X1	ПТ-НА-01	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,4
X2	ПГ-19М-01	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,6
X3	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,4

План эксперимента на основе матрицы планирования трехфакторного эксперимента на пяти уровнях включает 10 опытов.

После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, отражающие степень влияния состава композиции на прочность сцепления покрытия с основой и износостойкость:

$$Y_1 = 44,1205X_1 + 46,0205X_2 + 40,386X_3 + 29,013X_1X_3 + 27,213X_2X_3 + 200,2235X_1X_2X_3;$$

$$Y_2 = 0,0538X_1 + 0,1101X_2 + 0,0849X_3 + 0,1511X_1X_3 + 0,186X_2X_3.$$

Таблица 4 – Матрица планирования эксперимента и функции отклика

№ опыта	Матрица планирования в кодированных значениях			Матрица планирования в натуральных значениях, %			Функции отклика	
	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Y1	Y2
1	1	0	0	0,40	0,40	0,20	44,7	0,057
2	0	1	0	0,20	0,60	0,20	45,8	0,110
3	0	0	1	0,20	0,40	0,40	39,8	0,082
4	1/2	1/2	0	0,30	0,50	0,20	43,2	0,076
5	1/2	0	1/2	0,30	0,40	0,30	49,5	0,108
6	0	1/2	1/2	0,20	0,50	0,30	49,2	0,141
7	1/3	1/3	1/3	0,27	0,47	0,27	55,5	0,122
8	2/3	1/6	1/6	0,33	0,43	0,23	49,0	0,079
9	1/6	2/3	1/6	0,23	0,53	0,23	52,2	0,120
10	1/6	1/6	2/3	0,23	0,43	0,33	53,64	0,132

Графические изображения уравнений регрессии на плоскости и в объеме для выбранных функций отклика – прочность сцепления и износостойкость, а также графики оптимизации – приведены на рис. 2.-4.

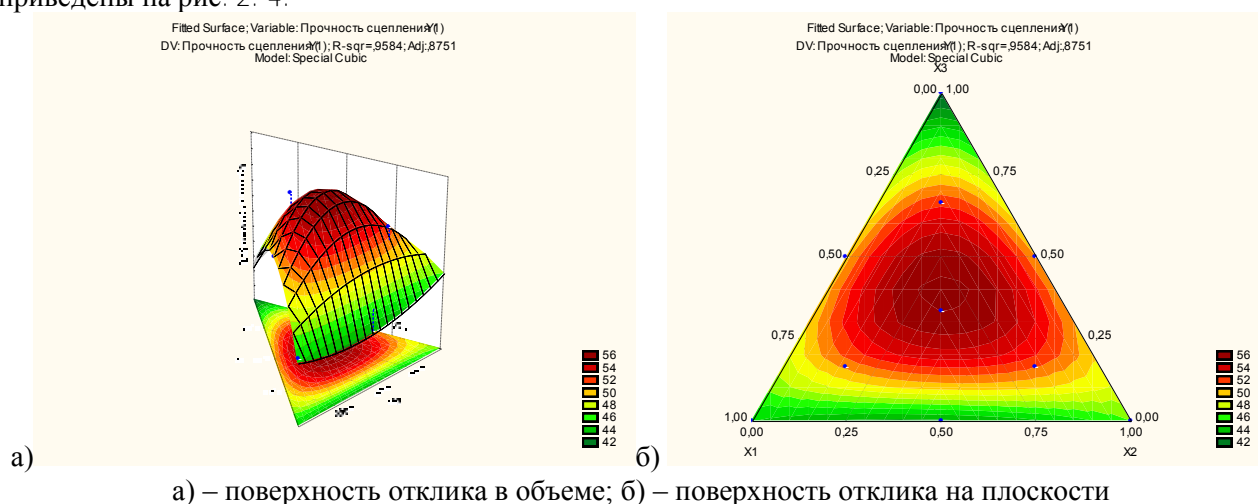


Рис. 2. – График зависимости прочности сцепления покрытия с основой от состава композиционного материала № 1

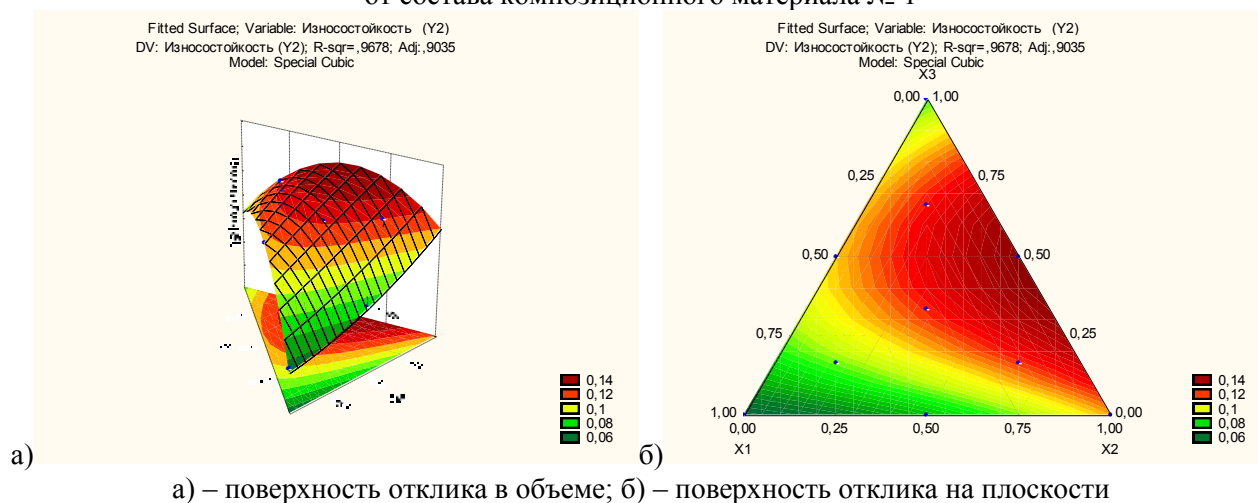


Рис. 3. – График зависимости износостойкости покрытий от состава композиционного материала № 1

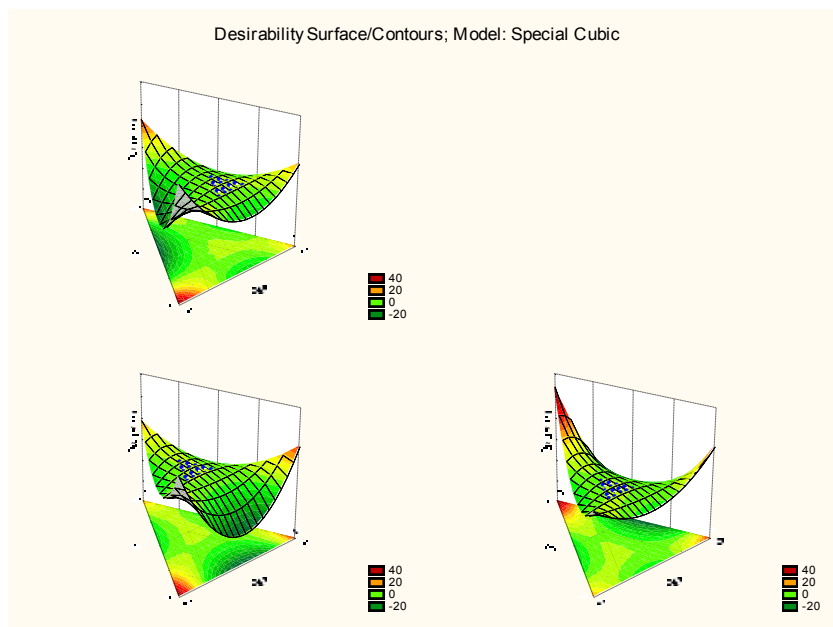


Рис. 4. – Поверхность оптимизации состава композиционного материала №1 для обеспечения максимальной прочности сцепления и износостойкости

Оптимальные соотношения при напылении композиции № 1: $X_1=0,309$; $X_2=0,327$; $X_3=0,364$.

Расчетное значение прочности сцепления при данном соотношении компонентов и при износостойкости U более $0,1$ ч/мкм равно $57,25$ МПа. Установлено, что все модели адекватны при 5%-ом уровне значимости по критерию Фишера.

Оптимизация состава композиции ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф + ПТ-НА-01. В качестве независимых переменных факторов принято содержание порошков: ПТ-НА-01 (X_1); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (X_2); ПР-НД42СР (X_3). Параметром оптимизации являлась прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{сц}$ (Y_1), при обеспечении износостойкости U более $0,1$ ч/мкм (Y_2).

В таблице 5 приведены уровни факторов и их кодированные значения, соответствующие симплекс-центроидному плану, а в таблице 6 – матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 5 – Уровни варьирования компонентов композиции

Обозначения	Исследуемые факторы	Уровни факторов					
		0	1/6	1/3	1/2	2/3	1
X1	ПТ-НА-01	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,4
X2	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,6
X3	ПР-НД42СР	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,4

Таблица 6 – Матрица планирования эксперимента и функции отклика

№ опыта	Матрица планирования в кодированных значениях			Матрица планирования в натуральных значениях, %			Функции отклика	
	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Y1	Y2
1	1	0	0	0,40	0,40	0,20	52	0,090
2	0	1	0	0,20	0,60	0,20	52,21	0,131
3	0	0	1	0,20	0,40	0,40	45,37	0,098
4	1/2	1/2	0	0,30	0,50	0,20	49,3	0,091
5	1/2	0	1/2	0,30	0,40	0,30	56,43	0,138
6	0	1/2	1/2	0,20	0,50	0,30	56,12	0,155
7	1/3	1/3	1/3	0,27	0,47	0,27	61,0	0,120
8	2/3	1/6	1/6	0,33	0,43	0,23	55,86	0,094
9	1/6	2/3	1/6	0,23	0,53	0,23	58,9	0,121
10	1/6	1/6	2/3	0,23	0,43	0,33	55,4	0,130

После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, отражающие степень влияния состава композиции на прочность сцепления покрытия с основой и износостойкость:
 $Y_1 = 51,7617X_1 + 52,8099X_2 + 44,989X_3 + 29,7414X_1X_3 + 29,7578X_2X_3 + 152,3753X_1X_2X_3$;
 $Y_2 = 0,0877X_1 + 0,1308X_2 + 0,0987X_3 + 0,1741X_1X_3 + 0,1644X_2X_3$.

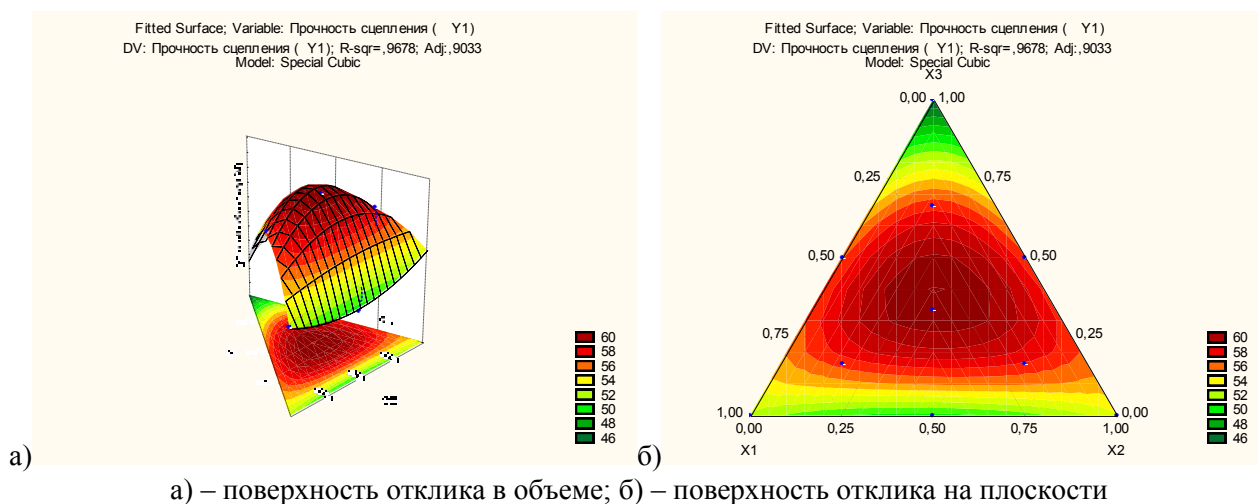
Оптимальные соотношения при напылении композиции № 2

$X_1 = 0,189$; $X_2 = 0,414$; $X_3 = 0,397$.

Расчетное значение прочности сцепления при данном соотношении компонентов и при износостойкости U более $0,15$ ч/мкм равно $61,37$ МПа.

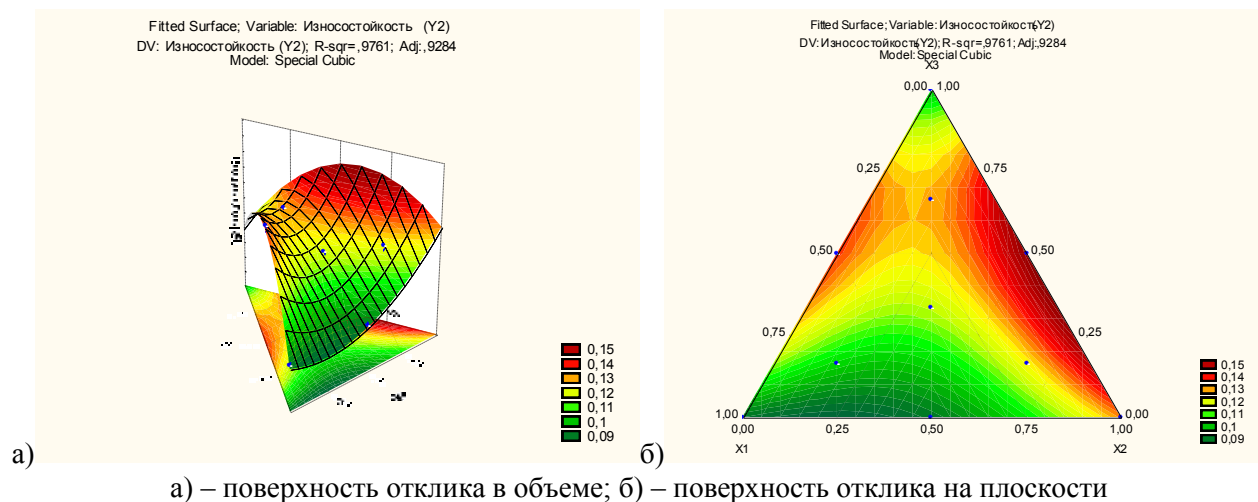
Установлено, что все модели адекватны при 5%-ом уровне значимости по критерию Фишера.

Графические изображения уравнений регрессии на плоскости и в объеме для выбранных функций отклика – прочность сцепления и износостойкость, а также графики оптимизации – приведены на рисунках 5 – 7.



а) – поверхность отклика в объеме; б) – поверхность отклика на плоскости

Рис. 5. – График зависимости прочности сцепления покрытия с основой от состава композиционного материала № 2



а) – поверхность отклика в объеме; б) – поверхность отклика на плоскости

Рис. 6. – График зависимости износостойкости покрытий от состава композиционного материала № 2

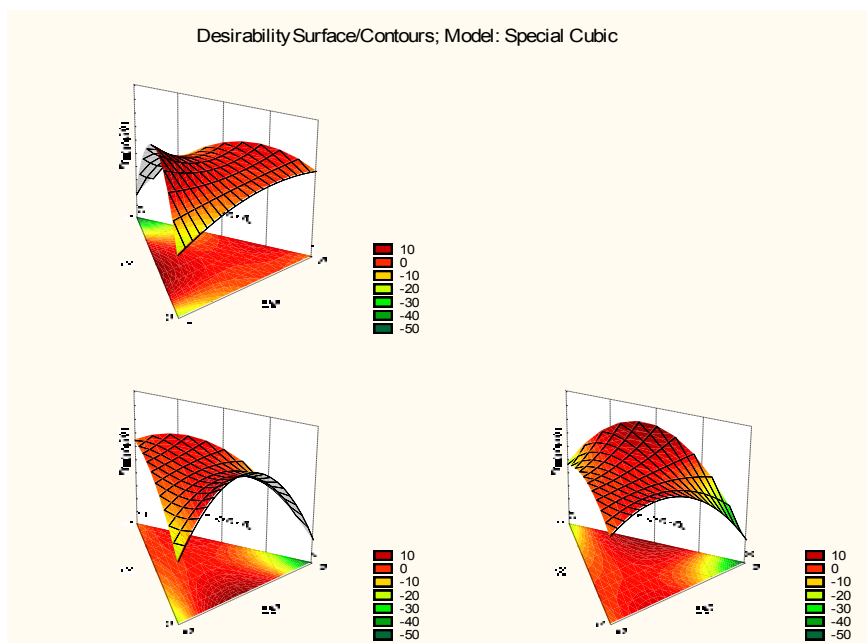


Рис. 7. – Поверхность оптимизации состава композиционного материала №2 для обеспечения максимальной прочности сцепления и износостойкости

Из анализа полученных математических моделей и графиков влияния состава композиций на свойства покрытий можно сделать вывод, что на прочность сцепления покрытия из композиционного материала № 1 наиболее положительное влияние оказывают компонент на основе меди и терморреагирующий компонент, что обусловлено легкоплавкостью первого и экзотермического эффекта второго. На износостойкость наибольшее влияние оказывают компоненты на основе меди и железа, а также их взаимное влияние, что обусловлено образованием структуры покрытия с пластичной матрицей, обладающей антифрикционными свойствами, с твердыми включениями в виде частиц легированного порошка на основе железа. В составе композиционного материала № 2 присутствуют два терморреагирующих компонента, основу одного из них составляет никель-медная матрица, образующая вместе с компонентом на основе железа структуру покрытия соответствующую правилу Шарпи, кроме того, этим можно объяснить более высокую прочность сцепления покрытия из композиционного материала № 2.

В результате проведенных экспериментальных исследований определены оптимальные составы композиций для упрочнения валов бумагоделательного оборудования: композиция № 1: 30,9%ПТ-НА-01 + 32,7%ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 36,4%ПР-НД42СР; композиционный материал № 2: 18,9%ПТ-НА-01+41,4%ПГ-19М-01 + +39,7%ПР-Х4Г2Р4С2Ф [152].

Вывод. Разработаны составы композиций для получения покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. На основе экспресс-испытаний для дальнейших исследований были отобраны две композиции, покрытия из которых обладают наибольшей износостойкостью. Построены математические модели зависимости прочности сцепления покрытий с основой и их износостойкости от состава композиций, позволившие определить оптимальные соотношения компонентов (композиция № 1: 30,9%ПТ-НА-01+ 32,7%ПР-Х4Г2Р4С2Ф+36,4%ПР-НД42СР; композиция № 2: 18,9%ПТ-НА-01+41,4%ПГ-19М-01+39,7%ПР-Х4Г2Р4С2Ф). Покрытия, напыленные из композиций оптимальных составов, обладают прочностью сцепления 55 – 65 МПа при износостойкости не ниже 0,1 ч/км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжов, Э.В. О прочности сцепления покрытия, наносимого напылением, со стальной основой / Э.В. Рыжов, А.Ф. Чистопьян, В.С. Харченков // Вестник машиностроения, 1973. – №12. – С.32 – 35.
2. Рыжов, Э.В. Исследование тангенциальной прочности адгезионных связей покрытий / Э.В. Рыжов, В.С. Харченков [и др.] // Стандартизация и унификация средств и методов испытания на трение и износостойкость: тез докл. на Всесоюзной науч.-техн. конференции. – М., 1975. – т. III. – С. 67 – 69.
3. Uhlig, H.H. – “J. Appl. Mech.”, 1954. – Vol.21. – p.401.
4. Иванова, В.С. Усталость и хрупкость металлических материалов / В.С. Иванова. – М.: Наука, 1968. – 452 с.