

Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. - 2005. - № 1. - С. 67-72. 4. Леванцевич М.А. Повышение износостойкости деталей машин деформационным плакированием гибким инструментом / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: Технопринт, 2004. – Вып. 2, Т. 4. – С. 192-197. 5. Батаев, А. А. Композиционные материалы. Строение, получение, применение: учеб. / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 383 с. 6. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко [и др.]. – М.; Гомель: Энергоатомиздат БелГУТ, 2004. – 519 с. 7. Жарский, И.М. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие для вузов / И.М. Жарский, Б.А. Коледин, И.Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2003. – 178 с. 8. Инютин, В.И. Основы научных исследований: учеб.-метод. пособие / В.И. Инютин. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 43 с. 9. Леванцевич, М.А. Выбор рациональных режимов плакирования направляющих скольжения металлорежущих станков / Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Лукашик А.А. // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – № 2. – С. 80-82. 10. Исследование работоспособности направляющих скольжения с покрытием из порошковых материалов / Леванцевич М.А. [и др.] // Порошковая металлургия: Сб. науч. тр. / Ин-т порошковой металлургии НАН Беларуси. – Мн., 2008. – № 31. – С. 93-97.

УДК 621.793

*Сокоров И.О., Спиридонов Н.В., Володько А.С., Пилецкая Л.И.*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОПОРНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ВАЛОВ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

На начальном этапе исследований ставилась задача экспериментально изучить свойства газотермических покрытий из композиционных материалов, составленных исходя из поставленной цели исследований – обеспечить работоспособность покрытий в условиях высокой удельных нагрузок. Поэтому разрабатывались композиционные материалы на основе износостойких, антифрикционных и терморегулирующих материалов. Выбор исходных порошковых материалов для создания композиций с целью последующего получения газотермических покрытий производился исходя из соответствия их следующим условиям:

- высокого уровня физико-механических свойств покрытий, обеспечивающих защиту от различных видов износа (абразивного, фреттинг-коррозии) и прочности сцепления, гарантирующей работоспособность деталей с покрытиями;

- минимальной себестоимости композиционного материала.

Первому условию соответствуют материалы на основе никеля, железа, медесодержащие (бронзы, баббиты). Повышенный уровень свойств в покрытии прогнозируется в случаях наличия в исходном материале значительного количества легирующих элементов, способствующих повышению износостойкости, стойкости к фреттинг-коррозии, антифрикционных свойств и прочности сцепления. Это характерно для самофлюсующихся материалов на основе никеля и железа, а также для бронз. Терморегулирующие материалы за счет экзотермической реакции повышают температуру в зоне контакта напыляемого материала и основы, что способствует их проплавлению и повышению температуры в контакте «покрытие – основа», увеличивая тем самым прочность сцепления.

Второму условию удовлетворяют самофлюсующиеся сплавы на основе железа и материалы на основе меди. Кроме того, согласно [1] сопротивлением изнашиванию при фреттинг-коррозии обладают материалы на основе никеля, железа, алюминия, меди и содержащие карбиды хрома, титана, ванадия. Известна [2] композиция ПС-85Н70Х17С4Р4+15Ю10Н стойкая к износу и фреттинг-коррозии.

На технологичность порошковых материалов и на свойства покрытий влияет форма исходных частиц, а также особенности ее структуры и фазового состава. С точки зрения технологичности важным положительным фактором является сферичность частиц порошка. Максимально приближенная к сфере форма частиц обеспечивает их хорошую текучесть, равномерность расхода и прогрева и, как следствие, высокую производительность напыления, а также способствует получению покрытий с меньшей пористостью и более высокой прочностью сцепления.

В проводимых исследованиях, учитывая выше сказанное, целесообразным было признано изучить эффективность газотермического напыления композиционных покрытий на основе следующих материалов: самофлюсующихся материалов на основе железа, терморрагирующих – NiAl и медьсодержащих. Для составления композиций и проведения исследований были выбраны следующие компоненты: ПР-НД42СР (ТУ 14-127-309-01); ПГ-19М-01 (ТУ 48-206-156-82); ПТ-НА-01 (ТУУ-322-19-004-96); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (ТУ 14-22-18-88).

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 композиционных материалов 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.

**Таблица 1 – Предложенные композиции для газотермического напыления**

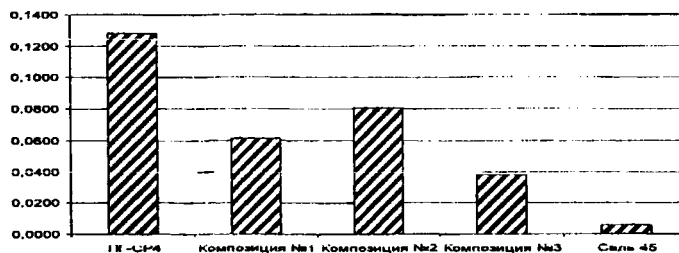
№ композиции	Состав композиции
1	ПТ-НА-01 + ПГ-19М-01 + ПР-Х4Г2Р4С2Ф
2	ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф + ПТ-НА-01
3	ПТ-ЮНХ16СР3 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)

**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 [3].

$U$ , ч/мкм



*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 (X<sub>1</sub>); ПГ-19М-01 (X<sub>2</sub>); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (X<sub>3</sub>). Параметром оптимизации являлась прочность сцепления покрытия с основой σсц (Y<sub>1</sub>), при обеспечении износостойкости U более 0,1 ч/мкм (Y<sub>2</sub>).

В таблице 3 приведены уровни факторов и их кодированные значения, соответствующие симплекс-центроидному плану.

**Таблица 3 – Уровни варьирования компонентов**

Обозначения	Исследуемые факторы	Уровни факторов					
		0	1/6	1/3	1/2	2/3	1
X <sub>1</sub>	ПТ-НА-01	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,4
X <sub>2</sub>	ПГ-19М-01	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,6
X <sub>3</sub>	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:

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

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

Графические изображения уравнений регрессии на плоскости и в объеме для выбранных функций отклика – прочность сцепления и износостойкость – приведены на рисунках 2–3.

Оптимальные соотношения при напылении композиции № 1: X<sub>1</sub>=0,309; X<sub>2</sub>=0,322; X<sub>3</sub>=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<sub>1</sub>); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (X<sub>2</sub>); ПР-НД42СР (X<sub>3</sub>). Параметром оптимизации являлась прочность сцепления покрытия с основой σсц (Y<sub>1</sub>), при обеспечении износостойкости U более 0,1 ч/мкм (Y<sub>2</sub>).

В таблице 4 приведены уровни факторов и их кодированные значения, соответствующие симплекс-центроидному плану.

**Таблица 4 – Уровни варьирования компонентов композиции**

Обозначения	Исследуемые факторы	Уровни факторов					
		0	1/6	1/3	1/2	2/3	1
X <sub>1</sub>	ПТ НА-01	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,4
X <sub>2</sub>	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,6
X <sub>3</sub>	ПР-НД42СР	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,4

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

$$Y_1 = 51,7617X_1 + 52,8099X_2 + 44,989X_3 + 29,7414X_1X_3 + 29,7578X_2X_3 + 152,3753X_1X_2X_3;$$

$$Y_2 = 0,0877X_1 + 0,1308X_2 + 0,0987X_3 + 0,1741X_1 X_3 + 0,1644X_2 X_3.$$

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 – приведены на рисунках 4 – 5.

Fitted Surface; Variable: Износостойкость(Y2)  
 DV: Износостойкость(Y2); R-sqr=.9678; Adj. .9035  
 Model: Special Cubic

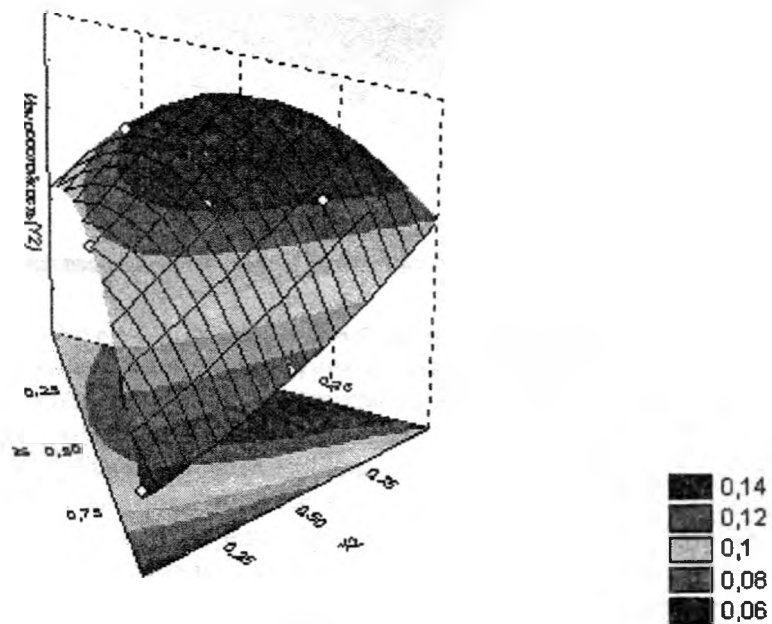


Рис. 2. График зависимости прочности сцепления покрытия с основой от состава композиции № 1

Fitted Surface; Variable: Прочность сцепления (Y1)  
 DV: Прочность сцепления (Y1); R-sqr=,9584; Adj: ,8751  
 Model: Special Cubic

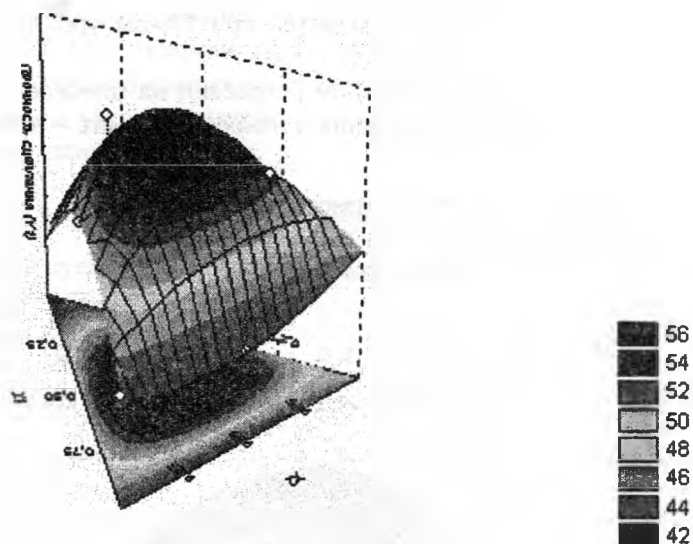


Рис. 3. График зависимости износостойкости покрытий от состава композиции № 1

Fitted Surface; Variable: Прочность сцепления (Y1)  
 DV: Прочность сцепления (Y1); R-sqr=,9678; Adj: ,9033  
 Model: Special Cubic

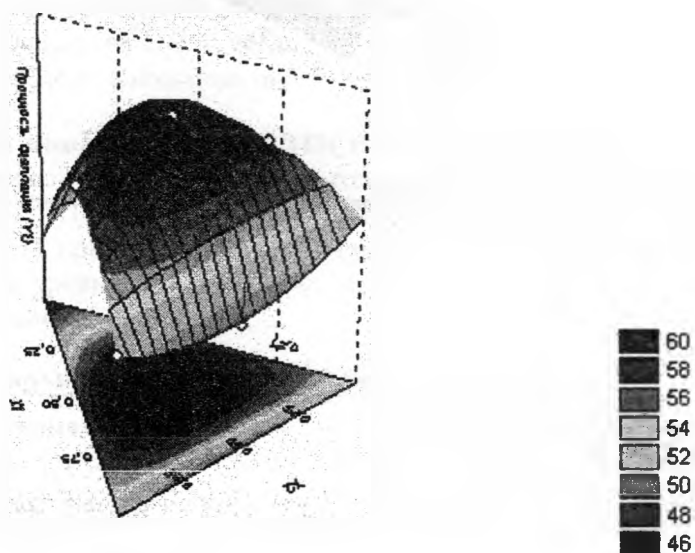


Рис. 4. График зависимости прочности сцепления покрытия с основой от состава композиции № 2

Fitted Surface; Variable: Износостойкость(Y2)  
 DV: Износостойкость(Y2); R-sqr=.9761; Adj: .9284  
 Model: Special Cubic

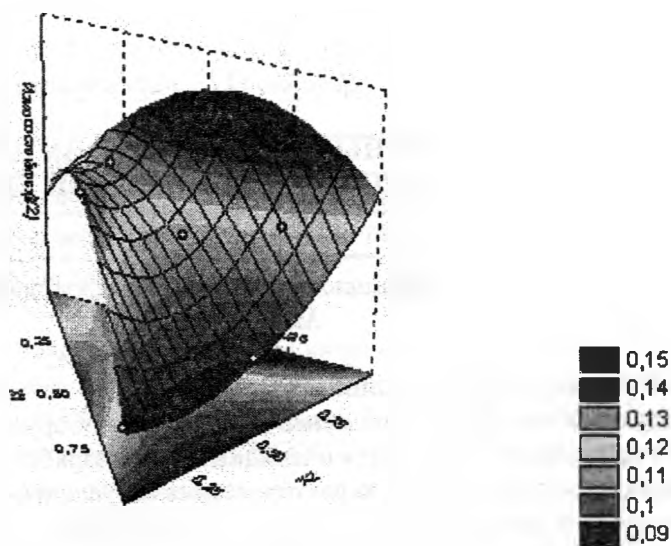


Рис. 5. График зависимости износостойкости покрытий от состава композиции № 2

Из анализа полученных математических моделей и графиков влияния состава композиций на свойства покрытий можно сделать вывод, что на прочность сцепления покрытия из композиции № 1 наиболее положительное влияние оказывают компонент на основе меди и термореагирующий 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 состав композиции № 2 присутствуют два термореагирующих 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 композиции № 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; композиция № 2: 18,9%ПТ-НА-01+41,4%ПГ-19М-01 + +39,7%ПР-Х4Г2Р4С2Ф [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 28377-89 «Порошки для газотермического напыления и наплавки. Типы». – Введ. 01.01.91. 2. Лабораторные работы по дисциплине «Основы повышения эксплуатационных свойств поверхностей» для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технология высокоэффективных процессов обработки материалов: в 2-х частях. / Н.В.Спиридонов, С.Э. Крайко, А.С. Володько. – Минск: БНТУ, 2003. – Ч.1 – 90 с. 3. Коробейников, В.В. Исследование износостойкости оплавленных и неоплавленных газотермических покрытий из композиций на основе самофлюсующихся материалов / В.В. Коробейников, И.О. Соколов, А.С. Володько // Машиностроение: Республиканский межведомственный сборник научных трудов / под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 95 – 100. 4. Спиридонов, Н.В. Исследование и

разработка износостойких композиционных материалов для упрочнения крупногабаритных высоконагруженных валов бумагоделательных машин / Н.В. Спиридонов, И.О. Соколов, Л.И. Пилецкая, А.С. Володько // Сборник научных трудов 6 международной научно-технической конференции «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин», 24 – 26 апреля 2007 г.: в 3 т. – Новополоцк, 2007. – Т. 1. – С. 70 – 73.

УДК 621.793

*Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К., Луцко Н.И.*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Эффективность работы машин и оборудования во многом определяются эксплуатационными затратами. Учитывая, что не менее 50 % отказов оборудования, происходит по причине преждевременного износа, становится очевидным, что разработки материалов с высокими триботехническими характеристиками являются весьма актуальными.

Таким образом, разрабатываемая технология позволяет на базе стандартного оксида алюминия получать недорогие керамические покрытия, имеющие высокие физико-механические и эксплуатационные характеристики. Кроме того, предлагаемая технология позволяет полностью реализовать весь ресурс свойств, заложенный в данном составе исходного материала.

Проведенные исследования показали, что оксид алюминия обладает высокой твердостью, износостойкостью, доступностью и дешевизной. Недостатком покрытий из оксида алюминия является хрупкость и низкая адгезия покрытия. Целью работы является повышение эксплуатационных свойств керамических оксидных покрытий химико-термической обработкой исходных материалов.

После анализа имеющихся литературных данных, объектом исследования были выбраны плазменные покрытия из оксида алюминия, диффузионно-легированного молибденом и бором. Молибден и бор были выбраны в качестве пластичной фазы с хорошими фрикционными свойствами.

Технология получения диффузионно-легированного порошка включает в себя следующие стадии:

1. сушка и рассев исходных материалов;
2. смешивание материалов в определенном соотношении;
3. герметизация и размещение контейнера с порошками в лабораторной установке;
4. изотермическая выдержка в печи с вращением контейнера (50 - 100 мин-1, 900 - 960°C, 2...3 часа).

На следующем этапе были проведены экспериментальные работы по нанесению покрытий из диффузионно-легированного оксида алюминия плазменным напылением. На подложку из стали 45 были нанесены покрытия из чистого оксида алюминия и легированного молибденом и бором.

Составы напыляемых покрытий приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Составы напыляемых покрытий**

Обозначение состава	состав порошковой смеси, %		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mo	B
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Mo (2%)	98	2	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Mo (4%)	96	4	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + B	95	-	5