

В результате проведенных исследований установлено, что ЭМН с ППД, позволяет обеспечить устойчивость и стабильность процесса упрочнения, повысить относительную износостойкость на 20%, уменьшить шероховатость покрытия на 25% и получить равномерное по толщине покрытие ( $t = 0,5$  мм).

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Мрочек, Ж.А. Исследование параметров качества покрытий, полученных наплавкой паст в электромагнитном поле / Ж.А. Мрочек, Миранович А.В. // Технология-Оборудование-Инструмент-Качество : материалы 33-ей Междунар. науч.-техн. конференции, 11 апреля 2018 г., г. Минск / Бизнесофсет, 2018. – 182 с. – С. 109–111.
2. Обработка заготовок деталей машин : учеб. пособие / Миранович А.В. [и др.] ; под ред. Мрочека Ж.А. – Минск : Выш. школа, 2014. – 172 с.
3. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель : ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
4. Способ нанесения металлических покрытий и устройство для его осуществления : пат. 10307 Респ. Беларусь, МКИ С 23 С 26/00 / П.А. Витязь, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, А.В. Миранович ; заявитель гос. науч. учр. «Институт порошковой металлургии». – № а 20050655 ; заявл. 30.06.05 ; опубл. 28.02.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1 (60). – С. 76–77.

УДК 621.793

### **РАЗРАБОТКА АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

*Газбан Задах Э.Х., Соколов И.О., Аминов Б.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Проблема повышения надежности машин и оборудования в условиях интенсификации производства и энерго- и ресурсосбережения ставит задачу создания новых технологических процессов и применения новых материалов.

Повышение износостойкости и коррозионной стойкости, антифрикционных свойств и сопротивления усталости поверхностей трения актуально для различных отраслей техники. Не менее важной является проблема восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей, на замену которых ежегодно расходуются сотни миллионов рублей.

Требования к покрытиям, наносимым на быстроизнашивающиеся детали машин и механизмов современной техники, определяются условиями их работы. Основными факторами износа являются: трение, воздействие абразива, наличие химически агрессивных сред, вызывающих коррозию.

В реальных условиях детали работают под воздействием комбинации различных факторов. Согласно результатам большого количества работ в области нанесения износостойких покрытий различными методами и из различных материалов, основными характеристиками, влияющими на их работоспособность, являются: твердость и микротвердость, прочность сцепления покрытия с материалом основы, уровень остаточных напряжений, пористость покрытий, ударная вязкость и склонность к образованию трещин, характер структуры покрытий. Важным условием является однородность свойств покрытия по глубине.

Твердость и микротвердость покрытий весьма сильно влияют на эксплуатационные характеристики покрытий. Более твердые покрытия, как правило, являются более износостойкими. Кроме того, высокая микротвердость всех компонентов покрытия необходима при работе в условиях высоких контактных нагрузок, при которых может произойти продавливание покрытия в случае низкой его твердости.

Наиболее распространенными для нанесения износостойких покрытий являются порошковые материалы на основе никеля, легированные бором, кремнием, углеродом и хромом. Они обладают высокими технологическими свойствами – самофлюсуемостью и низкой температурой плавления, – а также обеспечивают высокую износо-, коррозионно- и жаростойкость.

Покрытия из этих материалов имеют оптимальную с точки зрения износостойкости структуру Шарпи: дисперсные высокотвердые включения карбидов, боридов и силицидов равномерно распределены в коррозионностойкой никелевой матрице. Микротвердость матрицы достигает 5200 МПа, а высокотвердых включений – 10000 – 24000 МПа.

Для исследований, с учетом получения прогнозируемых физико-механических свойств напыленных покрытий, были составлены композиции (таблица 1) из порошков.

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)
4	ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф

Для обоснования выбора составов композиций проводились экспресс-испытания на износостойкость (рисунок 1), а также визуальный контроль полученных покрытий на отсутствие их отслоения от основы. Из графика видно, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия, полученные из композиций № 1 и 4.

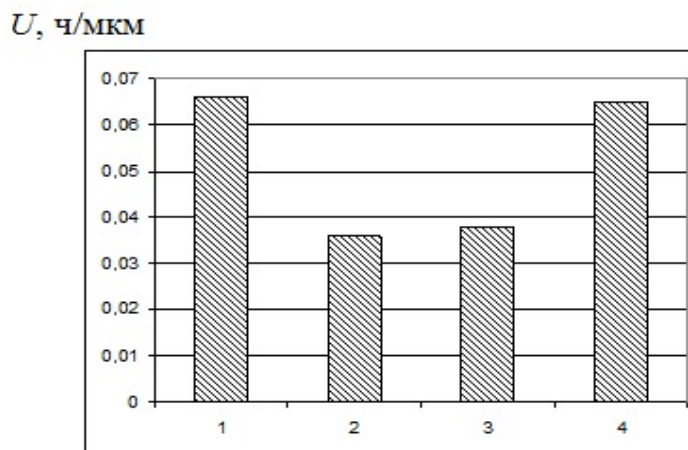
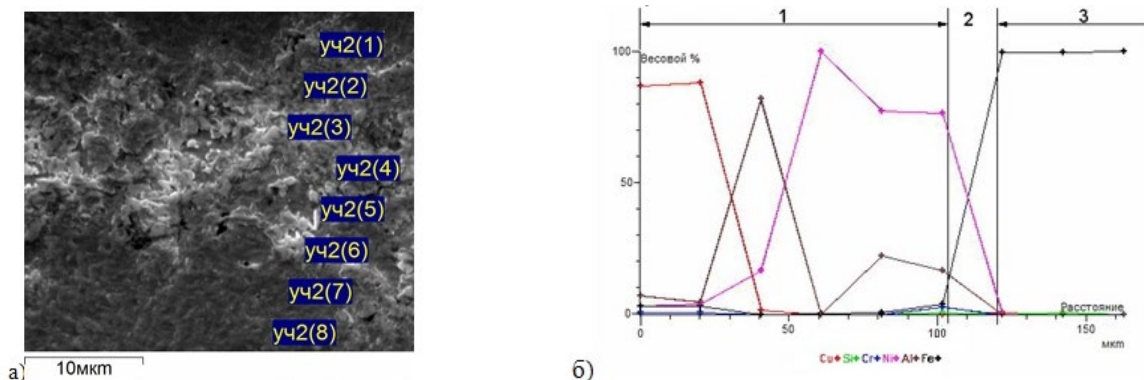


Рисунок 1 – Диаграмма износостойкости

Протекание химического взаимодействия и образование диффузионной зоны между покрытием и основой подтвердил проведенный количественный анализ. Из графика распределения химических элементов (рисунок 2.б, 2.б) видно, что никель диффундирует в основу (сиреневая линия), железо в покрытие (черная линия). Основным физико-механическим свойством упрочненного слоя, определяющим его эксплуатационные характеристики, и в первую очередь износостойкость, является микротвердость.



б)

Спектр	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Cu
уч2(1)	7.10	0.00	0.63	2.84	2.89	86.54
уч2(2)	4.68	0.00	0.51	3.12	3.77	87.92
уч2(3)	82.05	0.00	0.00	0.00	16.54	1.40
уч2(4)	0.00	0.00	0.00	0.36	99.64	0.00
уч2(5)	22.28	0.00	0.00	0.50	77.22	0.00
уч2(6)	16.58	0.66	2.43	3.86	76.48	0.00
уч2(7)	0.00	0.00	0.00	99.28	0.00	0.72
уч2(8)	0.00	0.43	0.00	99.57	0.00	0.00
уч2(9)	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00

в)

1 – покрытие, 2 – переходная зона (диффузионная зона), 3 – деталь (основа)  
 Рисунок 2 – Микроструктура покрытий (а) из композиции № 1,  
 распределение легирующих элементов (б, в)

Исследование микротвердости показало, что отдельные фазы газотермических композиционных покрытий достигают значений 10805 МПа и 10025 Мпа.

Для снижения величины остаточных напряжений производился подогрев основы и напыление промежуточного слоя из терморреагирующего материала NiAl со значением КТР промежуточным между основой и покрытием. Изучено влияние толщины подслоя из терморреагирующего материала на прочность сцепления газотермических покрытий из разработанных композиций. Экспериментально установлены толщины подслоя, при которых прочность сцепления имеет максимальную величину. Для покрытия из композиции № 1 она составляет 15 – 20 мкм, для композиции № 2 10 – 15 мкм. Исследование остаточных напряжений и их распределения по толщине композиции «покрытие – подслоя – основа» позволило определить, что при применении выбранного подслоя и режи-

мов его напыления в сочетании с разработанными композициями позволяет снизить уровень остаточных напряжений в покрытии до 3 раз.

Установлено, что покрытия из разработанных композиций обладают высокой износостойкостью в условиях граничного трения во всем диапазоне удельных нагрузок (10 – 40 МПа) и скоростей скольжения (0,5 – 3,5 м/с).

Для всех испытываемых композиций в широком диапазоне относительных скоростей скольжения и удельных нагрузок коэффициент трения составляет от 0,06 до 0,12, что говорит о хороших антифрикционных параметрах этих покрытий.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Борисов, Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник./ Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.А. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. - Киев.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
2. Тушинский, Л.И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л.И. Тушинский, А.П. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986.
3. Спиридонов, Н.В. Технологические основы формирования поверхностных слоев с повышенными эксплуатационными свойствами: Дисс. ... доктора техн. наук: 05.02.08., 05.02.01. – Минск, 1989.

УДК 621.795

### **ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Соколов И.О., Кришталь С.А., Шавырин А.А.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время наибольшее распространение в промышленности получили следующие способы нанесения полимерных порошковых материалов: нанесение из псевдооживленного слоя; электростатическое нанесение; термоструйное нанесение. Эти методы обладают своими преимуществами и недостатками, определяющими их эффективную область применения исходя из геометрических параметров покрываемых деталей и изделий, их конструктивных и технологических особенностей, условий будущей эксплуатации, а также необходимой толщины функционального полимерного слоя. Единственным фактором, объединяющим все способы, является термообработка (или термическое воздействие в процессе формирования полимерного слоя), необходимая для образования устойчивой адгезионной связи полимера с основой.

Существует три основных способа нанесения порошковой краски: электростатическое распыление, напыление в псевдооживленном слое и напыление в электростатическом кипящем слое.

Процесс окраски в псевдооживленном слое и электростатическом кипящем слое: При данном процессе окраски детали предварительно подогреваются и могут сразу погружаться в резервуар с порошком, либо же проходят через электрически заряженный туман порошковой краски. При этом порошок наносится на детали и запекается.