

характеристик трехмерных изделий, но и как тесты для оценки погрешности приближенных и численных методов [3, 4].

Одним из эффективных методов исследования поведения конструкций в условиях разнообразных воздействий является метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время используются разнообразные комплексы МКЭ, такие как ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS и др. Эти программные продукты относятся к категории CAE программного обеспечения, применяемого при проектировании машиностроительных, строительных и других конструкций. Список категорий программных продуктов может быть дополнен следующими CAD/CAM/CAE/GIS/PDM. На кафедре сопротивления материалов БНТУ метод конечных элементов ANSYS используется при решении задач динамики и прочности. Средствами МКЭ ANSYS производятся расчеты статического и динамического напряженно-деформированного состояния, включая геометрически и физически нелинейные задачи механики деформируемого твердого тела, форм и частот колебаний, устойчивости конструкций, нелинейных переходных процессов и др.

К широко используемому на практике комплексу CAD относится AutoCAD, позволяющий осуществлять моделирование деталей, поверхностей, сборок как в двумерном, так и в трехмерном пространствах. Следует отметить эффективное совместное функционирование двух комплексов AutoCAD и МКЭ при решении задач технической генетики и прогностики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Машиностроение. Энциклопедия. - М.: Машиностроение. Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7.1996.-464с; 2. Прусов И.А. Метод сопряжения в теории плит. – Мн.: Изд-во БГУ, 1975.-256 с; 3. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с; 4. Василевич Ю.В., Акимова С.В. Представление общих решений трехмерной задачи термоупругости анизотропного тела через квазигармонические функции.// Теория и практика машиностроения. 2004. - № 1. С. 58 – 60.

УДК 621.793

**Н.В. Спиридонов, И.О. Соколов, Л.И. Пилецкая**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

*Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь*

В данной работе исследовались композиции следующих составов:

Композиция №1 – порошок ПР-Х4Г2Р4С2Ф;

Композиция №2 – порошок ПР-Х18Н9;

Композиция №3 – смесь 1 объем ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 1 объем ПР-Х18Н9;

Композиция №4 – смесь 1 объем ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 1 объем ПР-10Р6М5.

Следует отметить, что порошки, содержащие бор и кремний, являются самофлюсующимися. В данных композициях таким является порошок ПР-Х4Г2Р4С2Ф.

В качестве методов нанесения покрытий использовались газопламенное и плазменное напыление с последующим оплавлением газовой горелкой.

Результаты испытания прочности сцепления покрытия с основным металлом приведены в табл.1.

Таблица 1

## Прочность сцепления композиционных покрытий

Материал покрытия	Метод нанесения	$\sigma$ , МПа
композиция 1	ПН+ГПО	145
	ГПН+ГПО	118
композиция 2	ПН+ГПО	112
	ГПН+ГПО	104
композиция 3	ПН+ГПО	115
	ГПН+ГПО	106
композиция 4	ПН+ГПО	158
	ГПН+ГПО	109

ПН- плазменное напыление, ГПН – газопламенное напыление, ГПО – газопламенное оплавление.

Следует отметить, что газопламенное напыление композиций давало нестабильные результаты, случалось отслоение покрытий, а разброс измеренных значений адгезии достигал 70%, заметно превышая аналогичный при плазменном напылении.

В целом, полученные результаты подтверждают теоретические прогнозы. Сцепление покрытий, напыленных плазменным методом, заметно выше, чем газопламенным, т.к. этот метод характеризуется большим энерговыделением, большей тепловой и кинетической энергией потока частиц, что существенно влияет на адгезию.

Анализ зависимости прочности сцепления покрытий от их химического состава показывает, что наибольшей адгезией обладает композиция 1 – чистый самофлюсующийся порошок, содержащий бор и кремний, а наименьшей – композиция 2, не являющийся самофлюсующимся. Это объясняется тем, что В и Si в процессе химических реакций связывают и удаляют с поверхности металла окисные пленки, повышая энергию активации поверхности. Кроме того, борирование порошков на железной основе позволяет получить эквивалентные или превосходящие по абразивной износостойкости никелевые, но менее дорогие по стоимости порошковые материалы [1].

Таким образом, максимальная прочность сцепления достигается при нанесении покрытий из порошков, обладающих самофлюсующимися свойствами, применяя технологии с наибольшим энергетическим вкладом.

Испытания на износостойкость проводились методом трения по абразивному бруску. Варьируемые параметры – скорость скольжения и давление. Величина износа измерялась весовым (г) и линейным (мкм) методами. Для ускорения испытаний увеличены скорости скольжения. Для получения значимых результатов число циклов испытаний установлено  $1 \cdot 10^6$  оборотов. Результаты испытаний сведены в табл.2.

Однозначной зависимости абразивной износостойкости от способа нанесения покрытия не выявлено. В табл.2 приведены средние арифметические значения по испытаниям образцов одинакового состава, часть из которых напылена плазменным, а часть – газопламенным методами. Разница данных по износостойкости для данных двух методов не превышала 5%.

Результаты испытаний абразивной износостойкости композиций

Ном ер п/п	Условия опыта	Композиция №1		Композиция №2		Композиция №3		Композиция №4	
		г	мкм	г	мкм	г	мкм	г	мкм
1	$V_{ск}=2$ м/с $P=0,1$ МПа	2,1	120	3,2	190	2,8	170	2,0	110
2	$V_{ск}=2,6$ м/с $P=0,1$ МПа	2,1	130	3,3	200	2,9	180	2,0	110
3	$V_{ск}=3,2$ м/с $P=0,1$ МПа	2,2	140	3,4	200	2,9	180	2,0	110
4	$V_{ск}=2,6$ м/с $P=0,2$ МПа	2,5	160	3,6	220	3,3	210	2,3	140
5	$V_{ск}=2,6$ м/с $P=0,3$ МПа	2,9	180	3,8	250	3,5	230	2,7	170

Из приведенных данных видно, что выбранные композиционные материалы ведут себя при изнашивании в среде мягкого абразива в целом так же, как и стали. Зависимости износа  $I$  от скорости скольжения  $V$  и давления  $P$  аналогичны образцам из стали 45. С повышением скорости износ практически не увеличивается, а с ростом давления интенсивность изнашивания возрастает, подчиняясь линейной зависимости (Рис.1 и 2). Зависимость износа от числа циклов испытаний  $n$  также имеет линейный характер (Рис.3).

Такие результаты, по-видимому, можно объяснить тем, что с повышением давления усиливается роль механического и теплового факторов износа, а рост скорости скольжения, если и увеличивает тепловыделение, то довольно незначительно. Линейность зависимости износа от числа циклов нагружения объясняется отсутствием сколь либо заметного влияния явления наклепа на изменение твердости покрытия, которая достигает 60 HRC для композиций 1, 3, 4, содержащих бор и кремний и 57 HRC для композиции 2, хотя сам наклеп имеет место, и картина износа практически не отличается от аналогичной для стали. Также для данных покрытий характерно наличие следов вторичных структур, которые крайне трудно идентифицировать ввиду сложного химического состава композиций.

Таким образом, факторами абразивного износа покрытий, как и в случае со сталями, являются механический, тепловой и механо-химический, причем роль последнего представляется наиболее значимой, т.е. изнашивание происходит, в основном, за счет образования на поверхности вторичных структур и их истирания. Тепловой фактор влияет за счет высокого разогрева поверхностных микрообъемов, возможного их размягчения и интенсификации химических процессов. Роль механического фактора состоит в приводящем к усталостному износу передеформировании наиболее мягких элементов структуры и возможном выкрашивании наиболее твердых частиц из менее твердой матрицы покрытия под воздействием частиц абразива.

Сопротивляемость покрытия износу зависит от химического состава покрытия, который определяет твердость и теплостойкость, а также свойства образующихся в процессе трения вторичных структур. Наибольшей износостойкостью обладает композиционная смесь порошков ПР-Х4Г2Р4С2Ф (Cr, Mn, B, Si, C, V, Fe-основа) и ПР-10Р6М5 (Fe-основа, W, Mo, C). Структура покрытия состоит из мелкодисперсных

боридов и карбидов, равномерно распределенных в насыщенной легированными элементами матрице, что определяет его повышенную твердость и теплостойкость.

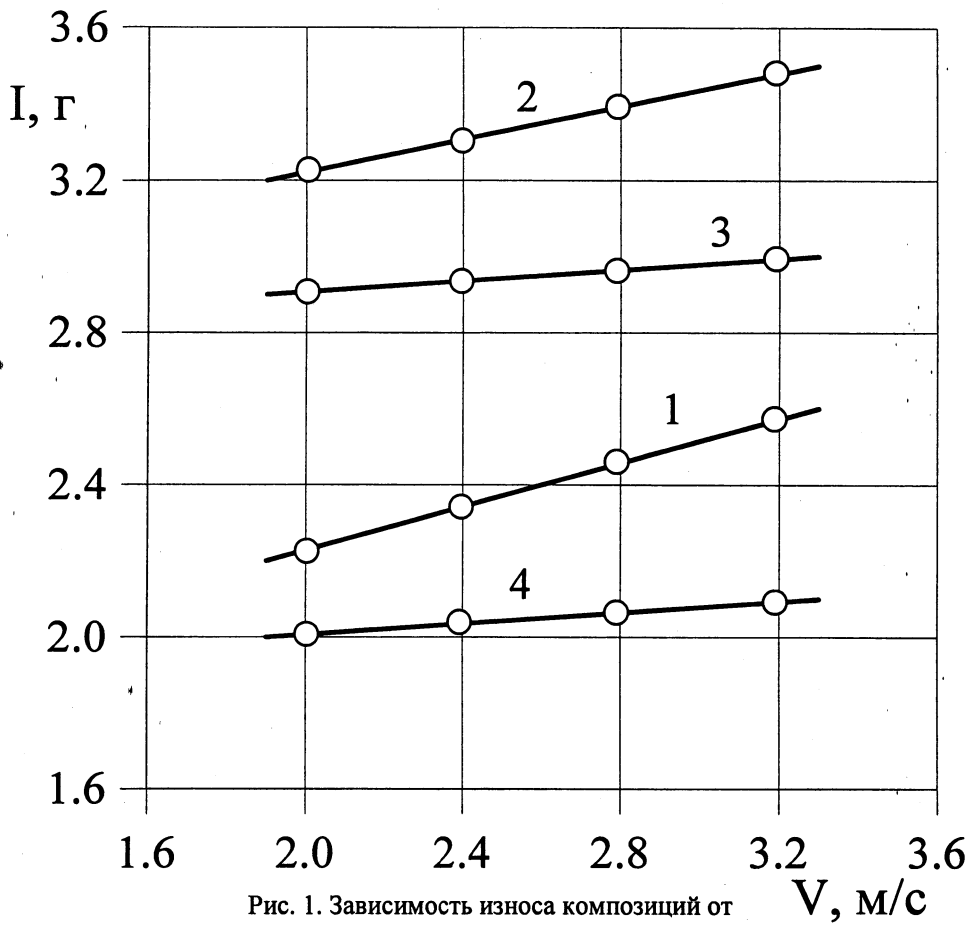


Рис. 1. Зависимость износа композиций от скорости скольжения: 1,2,3,4 – номера композиций

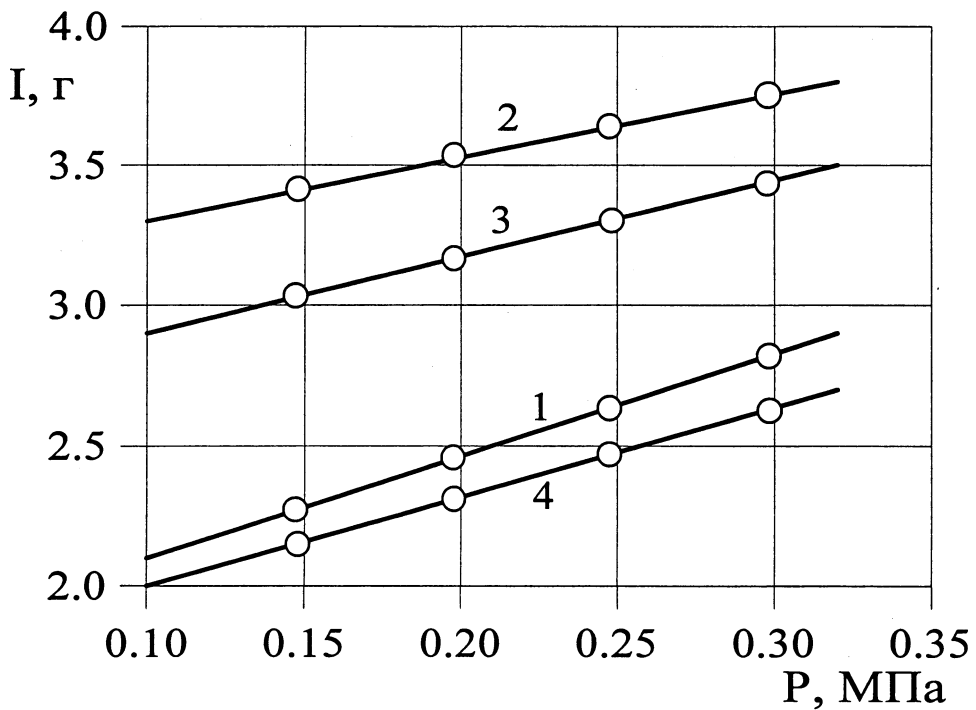


Рис. 2. Зависимость износа композиций от давления: 1,2,3,4 – номера композиций

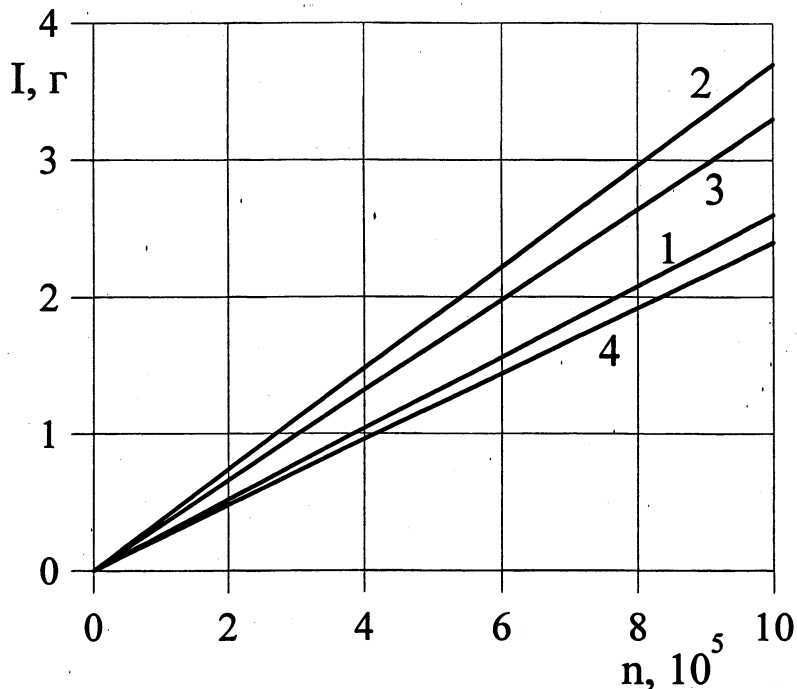


Рис. 3. Зависимость износа композиций от числа циклов нагружения:  
1,2,3,4 – номера композиций

При газопламенном напылении отмечались отскоки частиц, образование большого слоя окалины после оплавления, у 12% образцов при данной технологии наблюдалось отслоение покрытия, тогда как для плазменного напыления эта цифра составляет 3%. При плазменном методе указанные недостатки отсутствовали.

Грануляция порошков в пределах 100-160 мкм, т.е. разброс частиц весьма значителен. Очевидно, наиболее крупные из них в менее энергетической газопламенной струе не могут в достаточной мере пластифицироваться, что и определяет явление отскока. Наличие большого количества окалины, окисляемость покрытий во время оплавления определяется большим содержанием кислорода в струе при газопламенном методе, что ведет и к повышенному его содержанию в напыленном слое. Все перечисленные недостатки газопламенного напыления по сравнению с плазменным определяют и больший процент отслоенных покрытий.

Процентное содержание кислорода, влияющее на химические процессы при оплавлении, является и главным фактором, определяющим пористость.

Таким образом, только плазменный метод для исследованных композиций является эффективным при нанесении покрытий. Для повышения качества напыления и обеспечения возможности применения газопламенного метода необходимо повысить самофлюсующиеся свойства порошков, уменьшить и сделать более однородной их грануляцию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них – Мн.: Технопринт, 2001. – 299с.