

## РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ТВЕРДОЙ СМАЗКИ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

*Член-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И.,  
канд. техн. наук ОКОВИТЫЙ В. А., докт. техн. наук, проф. ДЕВОЙНО О. Г.,  
инж. ПАНТЕЛЕЕНКО А. Ф., студ. ОКОВИТЫЙ В. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Применение СВС-порошков, содержащих твердые смазки для нанесения на изнашиваемые поверхности деталей путем плазменного напыления и последующей обработки высококонцентрированными потоками энергии, должно обеспечить регулирование структурообразования и получение износостойких поверхностных слоев покрытий в сочетании с повышенной когезионной и адгезионной прочностью напыленного материала. Для этого при разработке научных основ и технологических принципов нанесения таких покрытий должны учитываться процессы и механизм синтеза исходных композиционных порошков, процессы и механизм формирования покрытий при плазменном напылении композиций и последующем воздействии на них высококонцентрированными потоками энергии [1–3].

Механизм упрочнения напыленных и обработанных высококонцентрированными потоками энергии покрытий должен учитывать возможности регулирования тонкой структуры нанесенных композиций, в том числе для получения аморфных фаз. По результатам проведенных исследований необходимо оптимизировать технологические параметры нанесения разрабатываемых покрытий. При исследовании процессов трения и изнашивания полученных по оптимальной технологии покрытий должны быть изучены их антифрикционные свойства и износостойкость в условиях трения при граничной (несовершенной) смазке или в отсутствие смазочного материала, при повышенных контактных нагрузках и температурах.

Упомянутые условия трения соответствуют режимам эксплуатации широкой номенклатуры трибосопряжений (тяжелонагруженные пары трения ДВС, насосов, металлургического и другого оборудования). Успешные предварительные эксперименты по синтезу композиционных порошков с включениями твердой смазки показывают, что имеется принципиальная возможность получения таких порошков при соответствующей отработке технологии СВС [4–6]. Как отмечалось, это открывает перспективы эффективного модифицирования поверхностей трения компонентами твердой смазки при газотермическом распылении упомянутых порошковых материалов. Увеличению эффективности модифицирования и дополнительному улучшению триботехнических свойств поверхностей трения способствуют импульсно-плазменные воздействия на самосмазывающиеся распыленные покрытия. Данное утверждение базируется на имеющихся предпосылках упрочнения покрытий при воздействии на них высококонцентрированными потоками энергии.

**Технология получения композиционного материала на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки.** Для проверки возможности получения СВС-порошков с компонентами твердой смазки осуществлен синтез композиций, содержащих  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ . Проведены исследования порошков следующего состава:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiO}_2 + 12,5\% \text{MoS}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiO}_2 + 12,5\% \text{CaF}_2$ . Для получения указанных композиций использовались следующие дисперсные материалы: титан марки ПТМ, оксид алюминия марки ЭБМ-40, дисульфид

молибдена  $\text{MoS}_2$  или фтористый кальций  $\text{CaF}_2$ , взятые в соотношении 57,5:30,0:12,5. Смешивание исходных компонентов выполняли в шаровой мельнице при соотношении шаров и шихты 25:1 и времени мехактивации 2–4 ч.

Синтез композиций осуществлялся в реакторе в режиме самораспространения без подвода энергии от внешнего источника, в азотно-кислородной среде при содержании кислорода от 10 до 25 мас. % и давлении 0,1–0,9 МПа, которая необходима для проведения реакции окисления порошка титана. Реактор был оснащен токоподводами с вольфрамовой спиралью для инициирования процесса. Использование при синтезе азотно-кислородной среды при содержании кислорода от 10 до 25 мас. % необходимо для проведения реакции окисления порошка титана. При содержании кислорода менее 10,0 мас. % и давлении менее 0,1 МПа не происходит полное окисление порошка и достаточное проникновение газа-реагента в слой шихты. При содержании кислорода более 25,0 мас. % и давлении более 0,9 МПа температура горения поднимается настолько, что происходит плавление частиц с образованием барьерного слоя, препятствующего проникновению газа-реагента в слой шихты.

Измельчение продуктов синтеза производили в щековой дробилке до получения фракции 0,050–0,063 мм, обеспечивающей напыление покрытий из оксидной керамики с максимальным коэффициентом использования материала. Операцию термохимической обработки в воздушной среде при температуре 500–800 °С в течение 4–6 ч проводят с целью доокисления частиц композиционного порошка. При температуре термохимической обработки ниже 500 °С и времени менее 4 ч полного доокисления частиц не происходит, а проведение операции при температуре выше 800 °С и времени более 5 ч приводит к увеличению энергозатрат и частичному спеканию частиц между собой [7].

Для сфероидизации частицы полученного композиционного порошка вводили в плазменную струю и производили их распыление в стальной цилиндр длиной 1 м, заполненный аргоном. Степень сфероидизации определяли по форм-фактору частиц (степень несферичности, значение 1 соответствует сфере) методом

оптической металлографии. Мощность плазменной струи изменяли от 30 до 40 кВт. При мощности плазменной струи менее 30 кВт более 50 % частиц имели форм-фактор менее 0,7, при мощности плазменной струи 40 кВт более 90 % частиц имели форм-фактор 0,9–1,0. При повышении мощности плазменной струи более 40 кВт увеличение значения форм-фактора частиц незначительное.

Нанесение тонкопленочной оболочки из металла на частицы порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30 \% \text{TiO}_2 + 12,5 \% \text{MoS}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30 \% \text{TiO}_2 + 12,5 \% \text{CaF}_2$  осуществляли химическим никелированием. При выполнении основной операции использовался раствор следующего состава: никель хлористый – 28 г/л; гипофосфит натрия – 30; натрий лимоннокислый – 10; кислота уксусная – 10 мл/л. Температуру раствора поддерживали в пределах 363–368 К, рН составляла 9,0–9,5. Для получения равномерного покрытия частиц раствор с порошком в ванне подвергался принудительному перемешиванию, оптимальная продолжительность никелирования составляла 10–12 ч. За это время на частицах формировалась тонкопленочная оболочка из Ni толщиной 6–7 мкм, которая является необходимой и достаточной по принятому критерию оптимизации плакирования порошков для плазменного напыления покрытий. Анализ размеров частиц, формы и рельефа поверхности синтезированных композиционных порошков осуществляли с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Изучали структуру частиц композиционных порошков путем металлофизического анализа шлифов их поперечного сечения. Для этого использовали микроскопы Unimet (Япония) и MeF-3 (Австрия).

**Нанесение износостойких покрытий.** Покрытия наносили на установке плазменного напыления на воздухе APS фирмы «Плазма-Техник АГ» на режимах, приведенных в табл. 1. Испытания на трение и износ проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме: колодочки с покрытием – чугунный ролик (СЧ24-44), колодочки с покрытием – азотированная сталь (38ХЮА). Триботехнические испытания проводили в условиях трения со смазкой и в отсутствие смазочного материала при нагрузке в паре трения 5 МПа в течение 10 ч. Данные пара-

метров трения и износа покрытий из порошков, полученных по технологии [8], а также по разработанной, приведены в табл. 2.

Результаты металлографического анализа также учитывали при изучении размеров и формы частиц. Согласно данным металлографического анализа, основными составляющими композиционных частиц являются оксидные фазы и включения твердой смазки в виде дисульфида молибдена или фтористого кальция (рис. 1а). Наличие упомянутых составляющих частиц порошков создает предпосылки получения из них износостойких покрытий, которые эффективны при молекулярно-механическом и абразивном изнашивании в неблагоприятных условиях трения (граничная смазка или отсутствие смазочного материала, повышенные температурные воздействия) [8, 9].

Рассматриваемые порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц. Склонность к

образованию комков снижает «текучесть» порошковых материалов и их технологичность при плазменном напылении покрытий. Поэтому для улучшения технологических параметров порошков была осуществлена их сфероидизация [10] посредством введения частиц порошка в плазменную струю мощностью 30–40 кВт и распылением в среде аргона (рис. 1б) с последующим плакированием (рис. 1в). Согласно рис. 1в на поверхностях частиц при плакировании порошков формируется сплошное покрытие (отдельные его микроучастки выкрошились при подготовке шлифов). Массовое содержание Ni–P в виде плакирующей оболочки составляет 30–40 %. Плазменные покрытия из разработанных композиционных порошков  $Al_2O_3 + 30\% TiO_2 + 12,5\% MoS_2$ ;  $Al_2O_3 + 30\% TiO_2 + 12,5\% CaF_2$  перспективны для восстановления и упрочнения деталей, эксплуатирующихся при неблагоприятных условиях трения, что подтверждают результаты, приведенные в табл. 2.

Таблица 1

Режимы плазменного напыления

Распыляемый материал	Режим напыления				
	Ток дуги плазмотрона, А	Напряжение дуги, В	Дистанция напыления, мм	Расход плазмообразующего газа (водорода), л/мин	Расход распыляемого порошка, кг/ч
Ni80Cr20 + 12,5 % MoS <sub>2</sub> + 55 % TiC	400	75	120	10	3,0
Ni80Cr20 + 12,5 % CaF <sub>2</sub> + 55 % TiC	400	75	120	10	3,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 % TiO <sub>2</sub> + 12,5 % MoS <sub>2</sub>	450	80	110	12	3,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 % TiO <sub>2</sub> + 12,5 % CaF <sub>2</sub>	450	80	110	12	3,5

Примечание. Расход плазмообразующего газа (аргона) – 50 л/мин.

Таблица 2

Трение и износ покрытий по чугунам и стали

Способ получения материала	Трение по чугуну				Трение по 38ХЮА Ст45			
	Со смазкой		Сухое		Со смазкой		Сухое	
	Износ покрытия, мкм	Коэффициент трения	Износ покрытия, мкм	Нагрузка задира, кг	Износ покрытия, мкм	Коэффициент трения	Износ покрытия, мкм	Нагрузка задира, кг
Ni80Cr20 + 12,5 % MoS <sub>2</sub> + 55 % TiC	1,2	0,011	10,2	5,8	1,9	0,03	6,1	6,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 % TiO <sub>2</sub> + 12,5 % MoS <sub>2</sub>	0,9	0,008	7,9	6,9	1,6	0,02	4,9	8,1

а

б

в

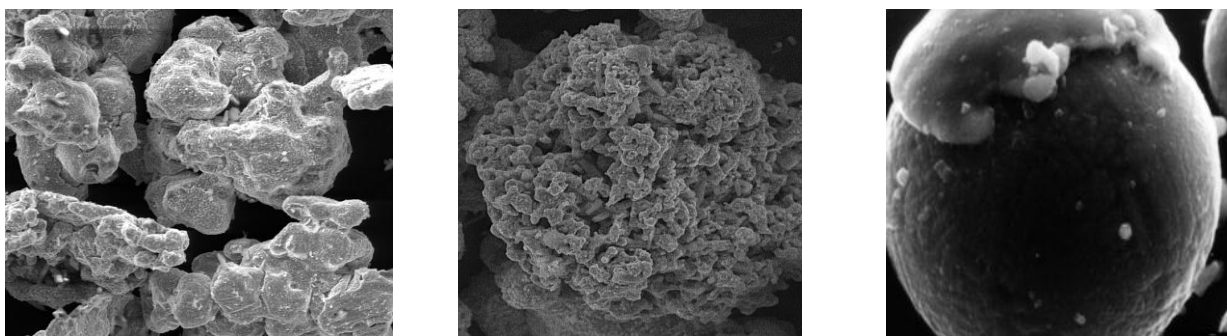


Рис. 1. Микроструктуры композиционного порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiO}_2 + 12,5\% \text{MoS}_2$ , полученные методом СВС: а – после дробления ( $\times 200$ ); б – после сфероидизации ( $\times 400$ ); в – после плакирования ( $\times 400$ )

## ВЫВОД

Недостатком карбидной керамики с включениями твердой смазки является высокая термическая диссоциация в процессе плазменного напыления. В период полета в плазменной струе частицы карбидной керамики склонны к потере устойчивости с изменением химического состава, что приводит к получению большого коэффициента трения покрытий и негативно отражается на их эксплуатационных свойствах. Композиционный керамический материал на основе оксидной керамики с добавлением твердой смазки, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, обладает хорошими технологическими характеристиками, устойчив к поддержанию химического состава в процессе плазменного напыления и способен формировать покрытия с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения. Покрытия, полученные из порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiO}_2 + 12,5\% \text{MoS}_2$ , изготовленного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, имеют в 1,2 раза больше износостойкость при трении со смазкой и в 1,3 раза – при сухом трении по чугуно и стали, чем покрытия, полученные из порошка  $\text{Ni80Cr20} + 12,5\% \text{MoS}_2 + 55\% \text{TiC}$ . Таким образом, предложенный способ позволяет повысить износостойкость покрытий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Рыморов, Е. В.** Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин / Е. В. Рыморов. – М., 1987. – 226 с.
2. **Цеев, Н. А.** Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме: справ. / Н. А. Цеев. – М., 1991. – 322 с.
3. **Брейтуэйт, Е. Р.** Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / Е. Р. Брейтуэйт. – М., 1997. – 182 с.
4. **Weld, J.** Crankshaft repaired at 30 % Saving / J. Weld. – 1999. – Vol. 58, № 2. – P.710–715.
5. **Горик, П. Н.** Плазменное напыление износостойких и антифрикционных покрытий / П. Н. Горик, В. А. Норков, Н. А. Рогов // Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении: тез. докл. – Луганск, 1996. – С. 196–206.
6. **Ильющенко, А. Ф.** Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Беспринт, 2005. – 253 с.
7. **Оковитый, В. А.** Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки / В. А. Оковитый // Сварочное производство. – 2002. – № 6. – С. 41–43.
8. **Получение** композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 156–162.
9. **Okovity, V.** Plasma Wear-Resistant Coatings with Inclusions of a Solid Lubricant / V. Okovity // Welding International. – 2003. – Vol. 16, № 11. – P. 918–920.
10. **Керамический** материал системы оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник БНТУ. – 2011. – № 1. – С. 16–20.

Поступила 16.01.2012