

УДК 621.357.74

Обоснование нового состава для плазменного нанесения композитных слоев

Трифонов Григорий Игоревич

i@grifonov.ru
SPIN-код: 9499-2510

Жачкин Сергей Юрьевич(*)

zhach@list.ru
SPIN-код: 9374-2996

ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований, направленных на оценку и обоснование нового состава для плазменного напыления композитных покрытий. Проведен анализ существующих аналогов и прототипа материалов для напыления с определением их технологических недостатков. Проведено экспериментальное исследование полученного композитного покрытия из нового состава напыления. Определена микротвердость и кавитационная устойчивость к распространению эрозии. Представлена детальная морфология композитных слоев и покрытий, подвергаемых кавитационную воздействию.

Ключевые слова: плазменное напыление, композитное покрытие, кавитационная эрозия, микротвердость, дистанция напыления, морфология, адгезионная прочность сцепления

Justification of the new composition for plasma deposition of composite layers

Trifonov Grigory Igorevich

i@grifonov.ru
SPIN-code: 9499-2510

Zhachkin Sergey Yurievich(*)

zhach@list.ru
SPIN-code: 9374-2996

MERC AF "AFA", Voronezh, Russia

Abstract. The paper presents the results of research aimed at evaluating and substantiating a new composition for plasma spraying of composite coatings. The analysis of existing analogues and prototype materials for spraying is carried out with the determination of their technological disadvantages. An experimental study of the obtained composite coating from a new spray composition has been carried out. Microhardness and cavitation resistance to erosion propagation are determined. A detailed morphology of composite layers and coatings exposed to cavitation is presented.

Keywords: plasma spraying, composite coating, cavitation erosion, microhardness, spray station, morphology, adhesive bonding strength

Введение. В контексте инновационных технологий, а также разработки нового оборудования и материалов для машиностроительных производств, созда-

ние порошковых составов для плазменного напыления композитных покрытий является актуальной задачей.

Целью данной работы является обоснование нового состава, обеспечивающего высокое качество формируемого композитного покрытия, в том числе необходимые физико-механические и эксплуатационные свойства рабочих поверхностей.

В ходе проводимого исследования был проведен комплексный анализ существующих порошкообразных материалов, разработанных для плазменного напыления функциональных покрытий. Были детально исследованы свойства различных композиций материалов, применяемых в качестве основных компонентов для формирования композитных покрытий. В частности, анализировались их химический состав, микроструктурные характеристики, а также одни из основных механических и эксплуатационных свойств.

Так, разработка и обоснование нового состава для плазменного нанесения композитных покрытий является критически важным этапом в разработке новых материалов и технологий. Это обусловлено несколькими факторами: свойства покрытия, совместимость наносимого материала с подложкой, технологичность процесса, экономическая эффективность и т. д. [1]. Обоснование по созданию нового состава должно включать анализ всех этих факторов и обеспечивать создание композитных покрытий с необходимыми свойствами для последующей эксплуатации.

Необходимо также отметить, что выбор технологии плазменного напыления композитных покрытий обусловлен ее высокой актуальностью во многих промышленных отраслях, поскольку данному методу по нанесению покрытий присущи такие преимущества, как возможность создания высокоадгезионных и износостойких покрытий [2].

Таким образом, данное исследование направлено на детальное обоснование разработанного материала для плазменного напыления композитных покрытий на стальные рабочие поверхности деталей машиностроительного сектора.

Материалы и методы. Проводимые исследования по созданию и обоснованию порошкового материала для плазменного напыления композитных покрытий проводилось на сертифицированном специальном оборудовании — установка плазменного нанесения покрытий УПНС-3040.

Микротвердость сформированного композитного покрытия измерялась на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 10 Н [3]. Измерения проводились в поперечном сечении образца, что позволило получить точные данные о микротвердости композитного покрытия.

Измерения кавитационной эрозии покрытия и подложки после напыления проводились с использованием ультразвукового кавитационного устройства (УТ-4.3Т-22СМ) с частотой колебаний 20 кГц и амплитудой от пика к пику 60 мкм в 3,5 мае. % растворе NaCl.

Проводя анализ существующих материалов для напыления, было определено, что на данный момент активно используются следующие порошкообразные композиции:

– композиционный порошок для плазменного напыления [4], содержащий частицы титана, плакированные слоем никеля, с размером частиц композиционного порошка 45–120 мкм, при этом частицы титана дополнительно содержат слой алюминия, расположенный непосредственно на слое никеля, при следующем соотношении компонентов в композиционном порошке, мас. %: алюминий (Al) 5–20, никель (Ni) 20–70, остальное титан;

– порошкообразный материал для напыления износостойких покрытий [5], содержащий 55–65 % порошка на основе никеля ПР-НХ17 и 35–45 % порошка на основе железа ПР-Х4ГСР.

К недостатку указанных материалов для напыления относится низкая микротвердость покрытия. Поскольку, беря во внимание величину толщины покрытия (2 мм $\pm 0,5$), ее микротвердость резко уменьшается от периферии вглубь образца, на котором оно сформировано, что напрямую оказывает влияние на износостойкость и качество покрытия.

Также существуют композиционный состав порошкообразного материала для плазменного напыления [6], содержащий порошки на основе железа и никеля и порошок алюминия, при следующем соотношении компонентов: порошок на основе железа фракции 40–100 мкм — 73 %, порошок на основе никеля фракции 40–64 мкм — 23 %, порошок алюминия фракции 30–40 мкм — 4 %.

К недостатку указанного материала для плазменного напыления относится низкая степень сопротивления кавитационной эрозии, которая существенно зависит от свойств материала, его структуры и микроструктуры, напряженного состояния и т. д.

Недостатком указанного материала для плазменного напыления является его низкая степень устойчивости к кавитационной эрозии, что обусловлено микроструктурными особенностями, а также состоянием внутренних напряжений.

Известен самофлюсующийся сплав на железной основе ПР-Х4ГСР фракционного состава 20–63 мкм, состоящий из (мас. %): 0,8 углерода, 11 хрома, 3 кремния, 2,7 бора, 4 марганца, остальное — железо.

К недостаткам указанного порошка относится низкая микротвердость покрытия, получаемого при напылении, а также низкая степень сопротивления кавитационной эрозии.

Итак, технологической задачей при разработке нового состава для плазменного напыления, будет являться получение композитного покрытия с высокими показателями микротвердости и устойчивости к кавитационной эрозии.

Результаты. На основе существующих научных изысканий авторов [1, 3, 7] было определено, что рациональным составом, удовлетворяющим поставленную цель и задачи исследования, является порошкообразный материал для плазменного напыления композитных покрытий, который содержит порошок самофлюсующегося сплава на основе железа и порошок карбида титана. Согласно работам [7, 8], повышение качества будет обеспечиваться включением частиц TiC различных форм, поскольку частицы TiC сами по себе являются упрочняющей фазой высокой твердости. Равномерно диспергиро-

ванные частицы TiC и лепестковидные частицы TiC могут действовать как эффективный барьер для ограничения перемещения дислокаций, тем самым повышая общую микротвердость покрытия.

При этом, на основе проводимых экспериментальных исследований [3], было определено, что соотношении компонентов, мас. %: порошок самофлюсующегося сплава на основе железа фракции 20–63 мкм — 88,7 и порошок карбида титана фракции 43–44 мкм — 11,3.

Микроструктурный анализ полученного покрытия выявляет наличие сложной сетчатой эвтектической структуры, а также субмикронных частиц карбида титана. На рис. 1 представлены характерные микроструктурные особенности, подтверждающие наличие данных фаз. По мнению авторов, дисперсные выделения TiC эффективно препятствуют движению дислокаций, что, в свою очередь, приводит к значительному увеличению микротвердости покрытия.

В результате проведенных измерений было установлено, что среднее значение микротвердости покрытия составляет 703 ± 17 HV. Для сравнения, твердость подложки оценивается приблизительно в 250 HV.

Результаты определения кавитационной устойчивости показали, что совокупная потеря веса стальной подложки и покрытия из разработанного материала составила 4,15 и 1,64 мг. При этом значения средней скорости эрозии по глубине для подложки и покрытия составили 8,72 и 3,66 мкм/ч соответственно. Морфология поврежденных поверхностей после кавитационной эрозии в зависимости от времени в 3,5 мас. % растворе NaCl: рис. 2 (а–в) — стальная подложка; рис. 2 (г–е) — покрытие.

Анализ показал, что благодаря большому перепаду твердости между частицами TiC и матрицей, материал эффективно гасит энергию ударов при кавитационной эрозии. На поверхности видны отдельные частицы (TiC) и их скопления в форме лепестков. Их взаимодействие с упругой матрицей заметно улучшает антикавитационные качества композитного покрытия. Рассеивание микроструи и силы удара предотвращает образование и расширение трещин вокруг TiC.

Обсуждение полученных результатов. Достижение необходимого результата объясняется, во-первых, добавлением в существующий порошок — самофлюсующийся сплав на железной основе, частиц порошка карбида титана фракционного состава 43–44 мкм в количестве размере 11,3 % от общей массы материала напыления. Достигается повышение микротвердости формируемого покрытия, ввиду того, что Fe, содержащийся в составе порошкового сплава на железной основе, при напылении смачивает поверхность карбида титана, исключая его хрупкость при определенных температурных воздействиях, следовательно, возникают перспективные предпосылки для создания износостойкого материала.

Во-вторых, при плазменном напылении предлагаемого порошкообразного материала для плазменного напыления композитных покрытий в диапазонах технологических режимов, представленных в работе [7], на стальной ос-

нове образца формируется композитное покрытие, которое в сравнении с прототипом характеризуется повышенной микротвердостью и кавитационной стойкостью к эрозии покрытия.

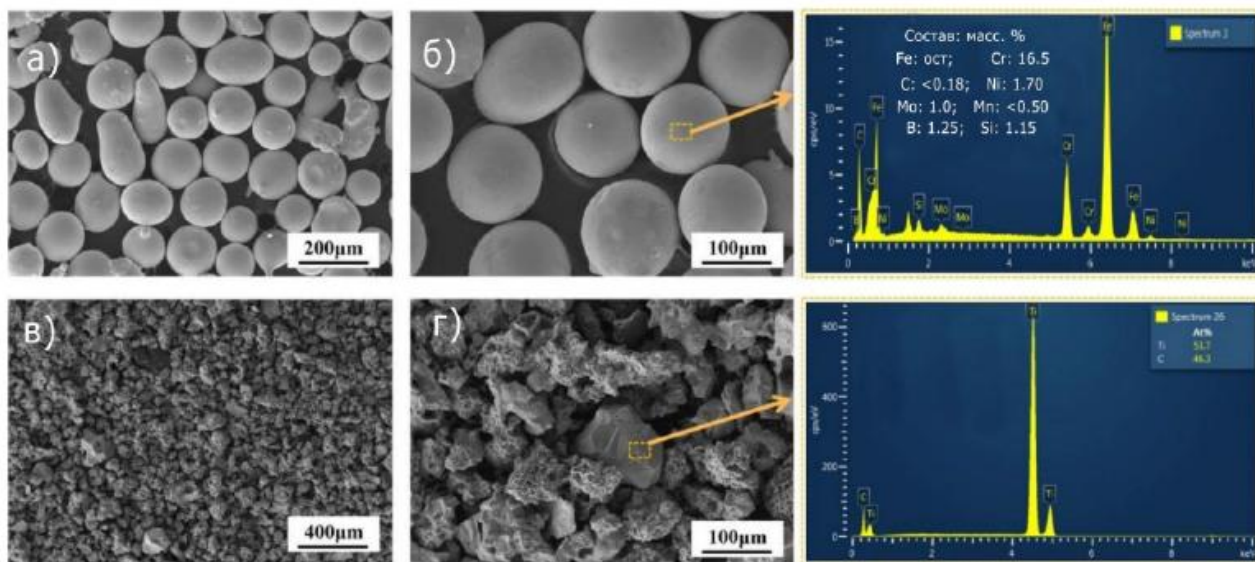


Рис. 1. Морфология порошков и химический состав покрытия из порошка на основе Fe (а, б) и частиц TiC (в, г)

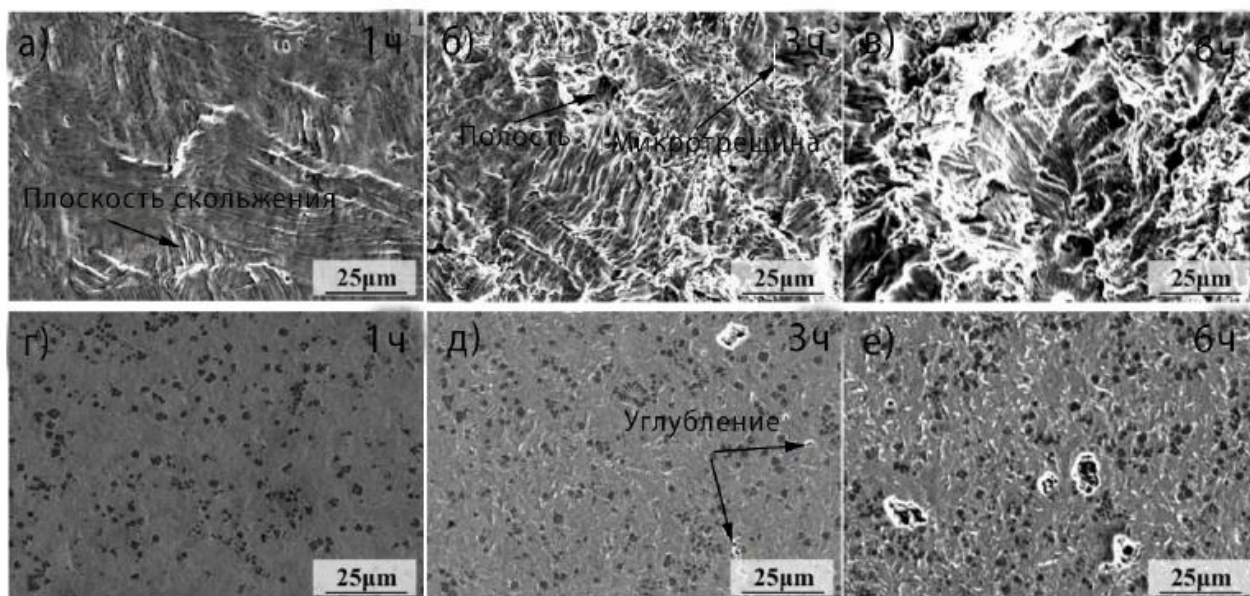


Рис. 2. Морфология поврежденных поверхностей после кавитационной эрозии в зависимости от времени в 3,5 мас. % растворе NaCl: (а–в) подложка; (г–е) композитное покрытие

Закключение. Результатом разработанного состава для напыления является формирование композитного покрытия с микротвердостью в 703 HV, средней скоростью кавитационной эрозии 3,66 мкм/ч и потерей веса при кавитационной эрозии, составляющей 1,64 мг. Эти данные дают основание утверждать, что полученный состав для плазменного напыления композитно-

го покрытия обладает высокими показателями микротвердости и кавитационной устойчивости, что дает основание в рекомендации его применения в промышленных масштабах. Полученные результаты позволяют глубже понять фундаментальные принципы плазменного напыления и оптимизировать процессы создания композитных покрытий с заданными свойствами. Это открывает новые перспективы для разработки высокоэффективных материалов, применяемых в различных отраслях промышленности, включая авиацию, машиностроение и энергетику.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Кравченко И.Н., Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Федюнин П.А. Разработка новых составов порошкообразных композиций для плазменного напыления износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей машин и оборудования. *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. VIII Междунар. науч. конф.: сб. тр.* Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024, с. 121–123.
- [2] Лясников В.Н., Лясникова А.В., Дударева О.А. *Плазменное напыление*. Саратов, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2016, 624 с.
- [3] Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Пустоветов А.В., Стрункин П.В. Повышение износостойкости композиционного покрытия на основе железа при восстановлении специального оборудования. *Вестник ВСГУТУ*, 2024, № 2 (93), с. 92–99.
- [4] Валитова В.М., Афоничев Д.Д., Хайретдинов Э.Ф. *Композиционный порошок для плазменного напыления покрытий*. Патент № 2039125 С1 РФ, 1991, 5 с.
- [5] Хромов В.Н., Зайцев С.А., Коренев В.Н. *Порошкообразный материал для напыления износостойких покрытий*. Патент № 2337178 С1 РФ, бюл. № 20, 2008, 1 с.
- [6] Трифонов Г.И., Кравченко И.Н., Жачкин С.Ю. *Композиционный состав порошкообразного материала для плазменного напыления*. Патент № 2803173 С1 РФ, бюл. № 25, 2022, 9 с.
- [7] Трифонов Г.И. *Восстановление рабочих поверхностей шнека транспортирующих устройств плазменным напылением износостойкого композитного покрытия*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2022, 166 с.
- [8] Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И. Твердость металломатричного плазмонапыленного композитного покрытия с дисперсной фазой карбида титана. *Химическая технология*, 2025, т. 26, № 2, с. 42–48.