

Терентьев А.Е.

Институт проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича НАН Украины,
г. Киев, Украина
E-mail: terentjev_a@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА,
ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СПОСОБА
НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО
ПОРОШКА НА ОСНОВЕ СПЛАВА
СИСТЕМЫ (Ni-Cr-Si-B) НА
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ
ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ
БЕЗ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

УДК 620.198:533.9 (045)

В работе проведен сравнительный анализ износостойкости покрытий, нанесенных плазменным (ПН) и высокоскоростным воздушно-топливным напылением (ВВТН), из композиционных порошковых материалов системы (Ni-Cr-Si-B) – тугоплавкое соединение, полученных по различным технологиям в условиях трения без смазки. Методом микро-рентгеноструктурного анализа исследованы структура и фазовый состав покрытий, изучены их триботехнические характеристики. Установлено, что в композиционном материале НХТБ-20С, изготовленном по технологии жидкофазного спекания в вакууме, в процессе получения синтезируются новые дополнительные фазы в виде включений зерен карборидов титана-хрома сложного состава с микротвердостью 22,9 - 25,4 ГПа. Покрытия из этого материала имеют самую высокую износостойкость. Независимо от способа напыления покрытий их износ составил 22 - 28 мкм/км.

Ключевые слова: газотермические покрытия, плазменное напыление, высокоскоростное воздушно-топливное напыление, износостойкость, самофлюсующийся сплав, композиционный порошковый материал, микроструктура, фазовый состав.

Введение

Эффективным способом повышения надежности и долговечности деталей и узлов современной техники, работающей в условиях высоких нагрузок и скоростей скольжения, сухого и граничного трения, газовой эрозии и абразивного изнашивания является нанесение защитных газотермических покрытий (ГТП). В настоящее время известно несколько направлений газотермических технологий (ГТН), которые широко применяются и интенсивно развиваются – газопламенное, детонационное, плазменное, высокоскоростное напыление и электродуговая металлизация [1, 2]. Весьма актуальным является вопрос разработки новых порошковых материалов для ГТП различного назначения, особенно композиционных, как наиболее перспективных [3]. Выбор состава компонентов для композиционных порошков и их соотношения, способа получения порошковых материалов и технологии их нанесения, исследование структуры и фазового состава получаемых покрытий, а также изучение их физико-механических свойств играет определяющую роль в достижении поставленной цели при разработке изделий с высокими служебными характеристиками. При разработке износостойких ГТП кроме условий эксплуатации и материала покрытия необходимо учитывать химический состав и физико-механические свойства ответной детали, характер изнашивания в паре трения (адгезионный, абразивный или окислительный), состояние поверхности покрытия и контр тела в процессе трения [4]. Подбор оптимальной пары трения для конкретных условий эксплуатации весьма не простая задача и, зачастую, решить ее удастся только экспериментальным путем.

В качестве материала для износостойких покрытий в практике ГТН хорошо зарекомендовали себя эвтектические самофлюсующиеся сплавы на никелевой основе типа колмоной (Colmonoy) системы Ni-Cr-Si-B. Их структура, фазовый состав и физико-механические свойства довольно хорошо изучены и описаны [5,6], эти сплавы выпускаются в нашей стране и за рубежом (ОАО «ТОРЕЗТВЕРДОСПЛАВ», ОАО «ПОЛЕМА», «Wall Colmonoy», «Sulzer Metco», «Castolin Eutectic» и др.) под различными названиями и торговыми марками в промышленном масштабе. Исследование триботехнических свойств покрытий из этих материалов проводилось авторами [7 - 9]. Однако иногда износостойкость этих сплавов оказывается недостаточной [9].

Известным и наиболее распространенным способом повышения износостойкости самофлюсующихся сплавов является создание композиционных материалов, путем введения упрочняющих добавок в виде карбидов, боридов и нитридов переходных металлов [3]. При этом способ получения композиционного порошка и метод его нанесения в известной степени влияют на износостойкость получаемых покрытий.

Целью данной работы является исследование влияния технологии получения композиционных порошковых материалов на основе самофлюсующегося сплава с армирующими добавками TiB₂ и WC, а также способа их нанесения на микроструктуру и износостойкость газотермических покрытий в условиях трения без смазки.

Методика и материалы

В качестве самофлюсующегося сплава на никелевой основе использовался промышленный порошковый материал марки ПР-НХ16СРЗ (ОАО «Полема», Россия ГОСТ 21448-75) состава: 16%Cr – 2,7%В – 3,2%Si – 0,75%С – <5%Fe – Ni – ост. Для напыления использовалась фракция – 63 + 40 мкм, которую отбирали методом ситовой классификации на лабораторной установке для разделения песков на фракции по крупности зерен (модель 029).

В качестве механической смеси самофлюсующегося сплава с карбидом вольфрама использовали серийный материал ПС-12НВК-01 (ОАО «ТОРЕЗТВЕРДОСПЛАВ», ТУ У 322-19-004-96) состава:

65 мас.% (14-20% Cr – 2,8-3,4% В – 4-4,5% Si – 0,61% С – 3-4,5% Fe – Ni – ост.) + 35 мас.% WC. Для напыления брали фракцию – < 63 мкм.

НХТБ-20 С – композиционный порошок состава: 80 мас.% ПР-НХ16СРЗ + 20 мас.% TiB₂, получали по технологии высокотемпературного спекания в вакууме с последующим измельчением, описанной в [10]. Для напыления выбиралась фракция – 63 + 40 мкм.

НХТБ-20 К – конгломерированный композиционный порошок такого же состава, но конгломерированный на органической связке методом непрерывного перемешивания с одновременной сушкой, по технологии, описанной в [3] с последующей классификацией и отбором фракции – 63 + 40 мкм.

Нанесение покрытий производили двумя способами – плазменно - дуговым в открытой атмосфере (ПН) и высокоскоростным воздушно - топливным (ВВТН).

В качестве оборудования для плазменного напыления использовались установка УПУ-3ДМ с плазмотроном F4-MB (Metco) и камера - манипулятор 15ВБ. Плазмообразующий газ представлял собой смесь аргона и водорода.

Нанесение покрытий методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления производилось горелкой ГВО-2РВ (ИПМ НАН Украины) на топливной паре воздух - керосин при стехиометрическом соотношении компонентов. Давление в камере сгорания составляло 1,0 МПа, расход порошка – 4,5 ± 0,5 г/с.

Структуру, химический и фазовый состав покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ 106 и микроанализатора JEOL JAMP 9500.

Микротвердость полученных покрытий определяли вдавливанием алмазной пирамиды Виккерса при нагрузке 0,05Н на приборе ПМТ-3.

Триботехнические испытания проводили в условиях трения скольжения без смазки по схеме сопряжения вал (контр тело) – частичный вкладыш (образец) при скоростях скольжения 0,5 - 6,0 м/с и нагрузке $P_{y0} = 1$ МПа на машине трения М-22м, разработки ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины. В качестве контр тела использовали ролик из стали ШХ15 твердостью HRC = 53 - 55.

Результаты исследований и их обсуждение

Служебные характеристики газотермических покрытий находятся в непосредственной зависимости от их структурно - фазового состава, который в свою очередь определяется химическим составом наносимого материала, технологии его получения и способа нанесения. Для изучения структуры покрытий из порошков ПР-НХ16СРЗ, ПС-12НВК-01 и НХТБ нанесенных плазменным и высокоскоростным способом были приготовлены поперечные шлифы. Детальное исследование микроструктуры полученных покрытий показало, что покрытия из сплава ПР-НХ16СРЗ, напыленные разными способами, обладают однофазной структурой (рис. 1 а, б). В плазменных покрытиях ярко выражены ламели, разделенные оксидными пленками. Это явление отсутствует в покрытиях нанесенных высокоскоростным напылением (ВСН), что говорит о меньшем окислении материала в процессе напыления. Микротвердость обоих покрытий находится в пределах 6,2 - 7,1 ГПа.

Покрытия из материалов НХТБ и ПС-12НВК-01 (рис. 1, в - з) имеют гетерофазную структуру, состоящую из металлической матрицы с равномерно распределенными в ней мелкодисперсными включениями упрочняющей фазы, сходную по составу для различных способов напыления. Микротвердость металлической матрицы покрытий из материалов НХТБ – 6,5 - 7,6 ГПа, что сопоставимо с микротвердостью сплава ПР-НХ16СРЗ – исходного матричного материала композита. В покрытии из материала ПС-12НВК-01 микротвердость матрицы выше – 8,6 - 9, 2 ГПа, что обусловлено более высоким содержанием в ней хрома, бора и кремния. Из-за малых размеров включений упрочняющей фазы TiB₂ и WC в покрытиях их микротвердость измерить не удалось.

Микроструктура покрытий ПС-12НВК-01, нанесенных разными способами, имеет характерные отличия. В плазменном покрытии включения карбида вольфрама (светлые) имеют вид прожилков и округлых капель. Это говорит о том, что в процессе напыления частички WC полностью расплавились, в то время как в аналогичном покрытии, нанесенном способом ВВТН, эти частицы имеют осколочную форму, близкую к исходному порошку. Более высокие скорости и меньшее время нахождения частиц в потоке, а также сравнительно невысокие температуры их нагрева при ВСН снижают интенсивность процессов взаимодействия карбида вольфрама с атмосферой. Этот факт должен благоприятно влиять на износостойкость ВСН покрытий.

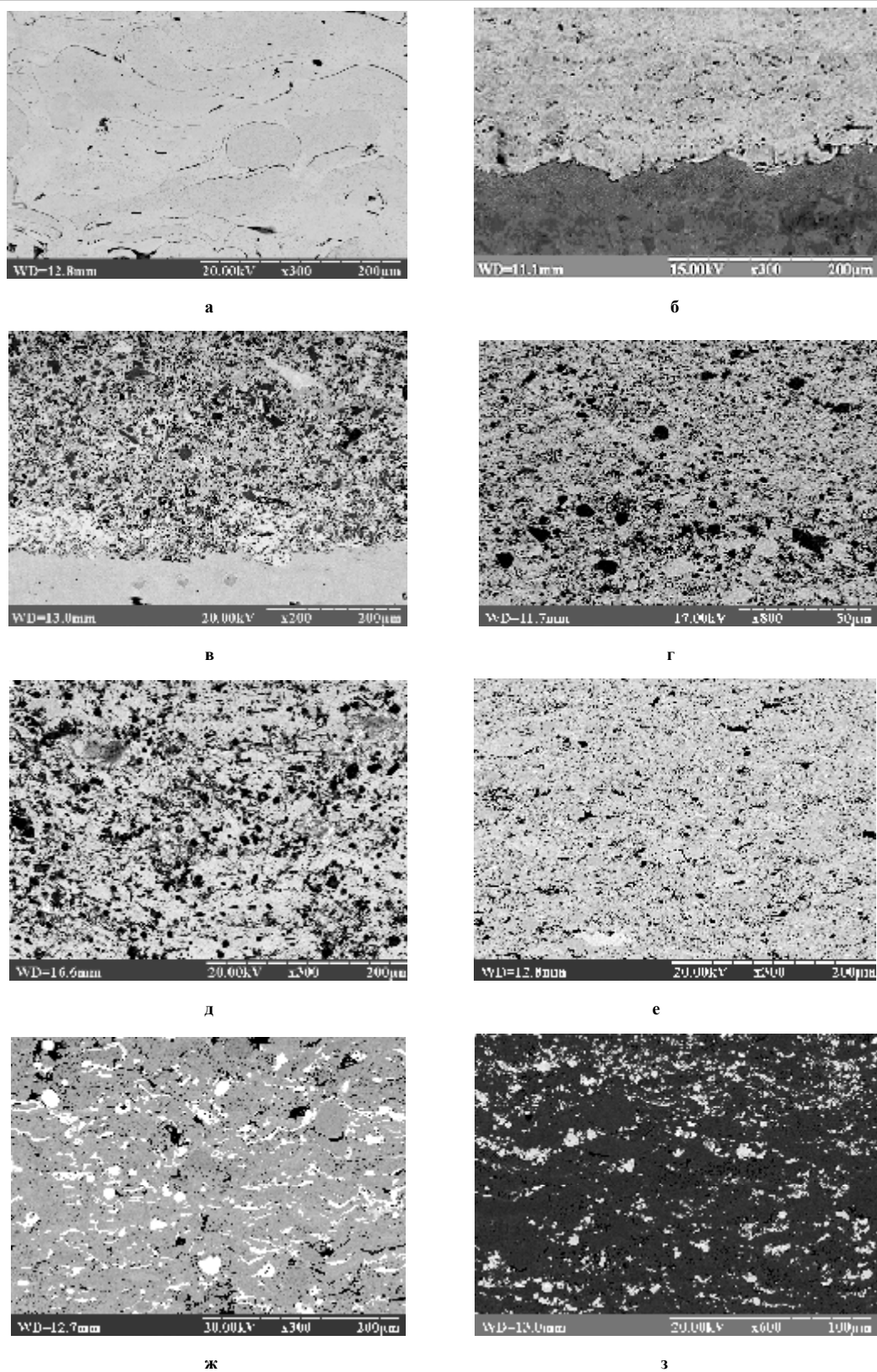


Рис. 1 – Структура покрытий нанесенных плазменным и высокоскоростным напылением:
 а – покрытие из сплава ПР-НХ16СР3 (ПН); б – покрытие из сплава ПР-НХ16СР3 (ВВТН);
 в – покрытие из материала НХТБ-20С (ПН); г – покрытие из материала НХТБ-20С (ВВТН);
 д – покрытие из материала НХТБ-20К (ПН); е – покрытие из материала НХТБ-20К (ВВТН);
 ж – покрытие из материала ПС-12НВК-01 (ПН); з – покрытие из материала ПС-12НВК-01 (ВВТН)

Структурно - фазовый состав покрытий из композиционного материала НХТБ-20С отличается от НХТБ-20К многофазностью (рис. 2 а, б) и, практически, не зависит от способа напыления.

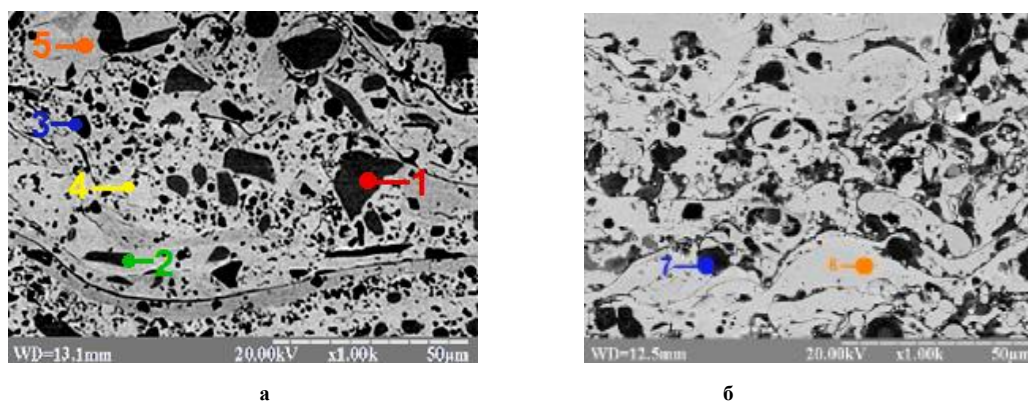


Рис. 2 – Сравнение структуры плазменных покрытий из композиционных материалов:
а – НХТБ-20С; б – НХТБ-20К

По результатам металлографии и микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) в металлической матрице на основе никеля обедненной хромом (табл. 1. спектр 5) равномерно распределены включения четырех фаз различной формы, размера (1 - 20 мкм.) и микротвердости. Они идентифицированы как: борид хрома - серая фаза произвольной формы (спектр 1) с микротвердостью 10,7 - 12,6 ГПа; сложный карбоборид титана-хрома – одноосные включения светло-серой фазы (спектр 2) с микротвердостью 22,9 - 25,4 ГПа; мелкие включения (1 - 5 мкм.) темно-серого цвета округлой формы (спектр 3) и прямоугольной формы (спектр 4) – соответственно диборид и карбид титана.

Таблица 1

**Химический и фазовый состав плазменных покрытий
из композиционных материалов НХТБ**

Материал	Спектры	Концентрация элементов, масс. %							Фазовый состав
		B	C	Ti	Ni	Cr	Fe	Si	
НХТБ-20С	Спектр 1	14,8	0,6	1,5	2,8	79,0	1,3	0,0	CrB
	Спектр 2	9,3	9,1	26,7	1,9	48,1	4,3	0,6	Cr(Ti) ₂₃ B(C) ₆
	Спектр 3	28,0	0,9	69,6	0,6	0,6	0,3	0,0	TiB ₂
	Спектр 4	3,9	17,8	69,8	4,8	2,9	0,3	0,5	TiC
	Спектр 5	0,5	0,5	0,6	84,2	0,9	2,7	10,6	Ni ₃₁ Si ₁₂
НХТБ-20К	Спектр 6	2,2	0,5	-	74,8	15,7	3,0	3,8	ПР-НХ16СР3
	Спектр 7	26,5	0,5	70,5	1,4	0,7	0,4	0,0	TiB ₂

Процесс вакуумного спекания композиционного материала НХТБ-20С приводит к его очистке от кислорода и, соответственно, уменьшению оксидных пленок в покрытии (рис. 2, а), повышению плотности покрытия и улучшению адгезионной связи между частицами, что также является благоприятным фактором с точки зрения повышения износостойкости покрытия.

Исследование зависимости износостойкости покрытий от пути трения и скорости скольжения, а также коэффициента трения от пути показало, что введение в самофлюсующийся сплав армирующих добавок из WC и TiB₂ практически во всех случаях приводит к увеличению износостойкости покрытий (рис. 3, 4). На всех скоростях трения, независимо от технологии получения и способа нанесения износостойкость покрытий из композиционных материалов выше.

В зависимости от технологии получения композиционного порошка износостойкость соответствующих покрытий повышается в ряду – ПС-12НВК-01 → НХТБ-20К → НХТБ-20С. Исключение составили плазменные покрытия из материала ПС-12НВК-01 при скоростях трения $V = 3$ м/с и $V = 6$ м/с.

Резкое снижение износостойкости при увеличении скорости трения, очевидно, связано с низкой адгезионной связью частиц карбида вольфрама в плазменном покрытии, что приводит к их выкрашиванию при увеличении температуры в зоне контакта при сухом трении. Оказавшись в зоне контакта пары трения, твердые частички WC приводят к катастрофическому разрушению покрытия. Выкрашивание зерен WC отсутствует в случае покрытий нанесенных высокоскоростным напылением, обеспечивающим более высокую адгезионную связь между частицами. Этим объясняется более высокая износостойкость покрытий ПР-НХ16СР3, ПС-12НВК-01 и НХТБ-20К, нанесенных методом ВВГН, по сравнению с аналогичными покрытиями, полученными плазменным напылением.

Износостойкость покрытий из материала НХТБ-20С мало зависит от способа нанесения покрытий, что свидетельствует об отсутствии выкрашивания упрочняющей фазы в процессе трения при различных скоростях.

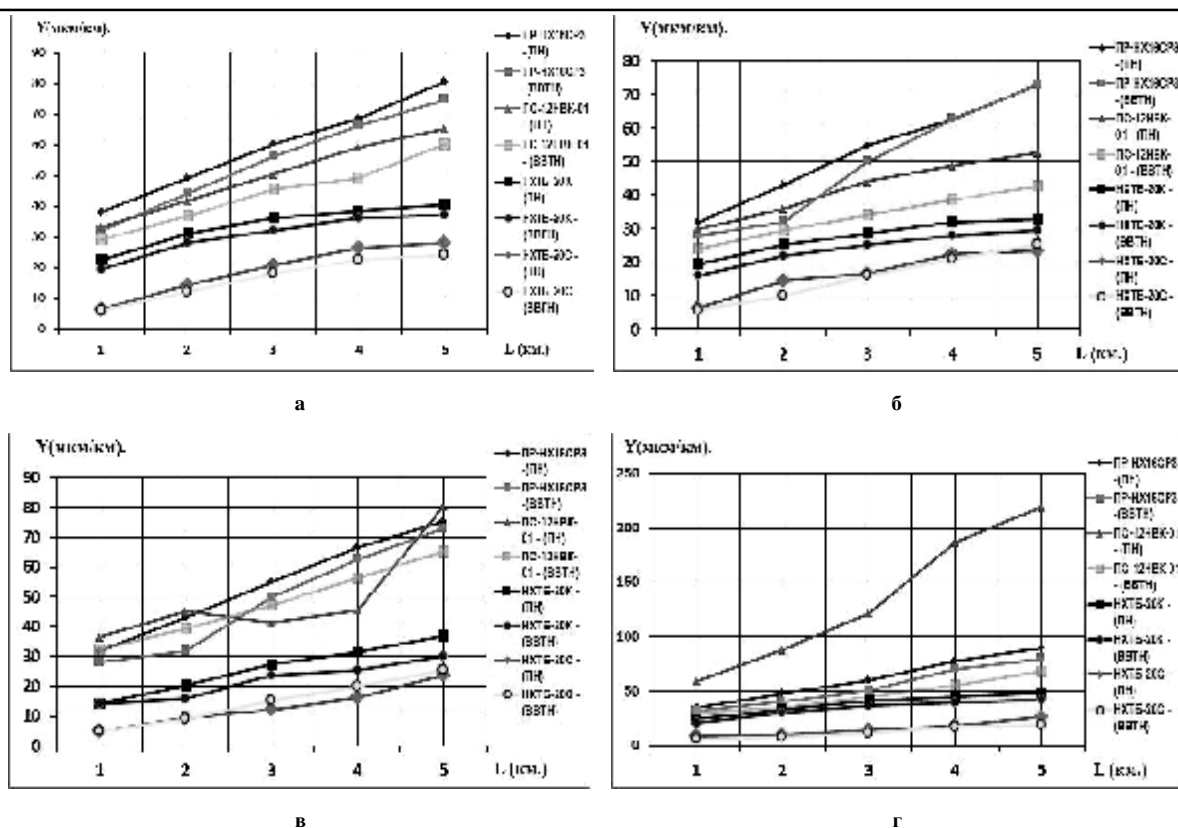


Рис. 3 – Линейный износ пар трения в зависимости от длины пути при скорости:
 а – $V = 0,5$ м/с; б – $V = 1$ м/с;
 в – $V = 3$ м/с; г – $V = 6$ м/с

Этот факт можно отнести к достоинствам технологии получения композиционного материала. За счет процессов межфазного взаимодействия при высокотемпературном спекании в вакууме обеспечивается хорошая адгезионная связь между частицами композита, что способствует повышению стойкости покрытий к износу. Кроме того, при такой технологии получения композиционных порошков для газотермического напыления высокодисперсные частицы упрочняющей фазы, равномерно распределенные внутри частиц из материала матрицы, оказываются защищенными от взаимодействия с продуктами высокотемпературной плазменной струи и сохраняют свои физико-химические свойства, что также способствует повышению стойкости к изнашиванию плазменных покрытий.

Из представленных на рис. 4, а, зависимостей линейного износа пар трения от скорости трения видно, что покрытия ПР-НХ16СР3 и НХТБ-20К, независимо от технологии напыления удовлетворительно работают до скорости $V = 3$ м/с. Дальнейшее увеличение скорости трения до $V = 6$ м/с, приводит к повышенному износу пары. Скорость $V = 1$ м/с является оптимальной для покрытия ПС-12НВК-01, при дальнейшем ее увеличении происходит интенсивное разрушение покрытий, особенно плазменных.

Износостойкость покрытий из материала НХТБ-20С, напыленных различными способами, практически не зависит от скорости трения в интервале $V = 0,5 - 6$ м/с и находится в пределах 22 - 28 мкм/км.

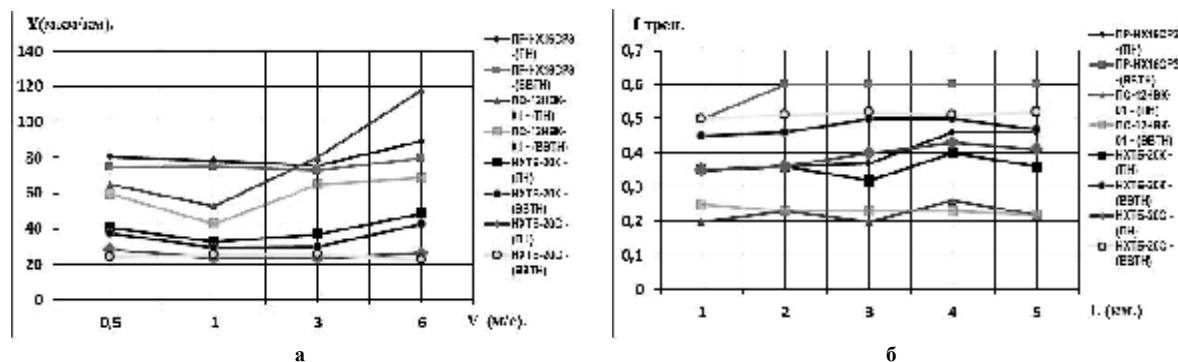


Рис. 4 – Зависимость:
 а – линейного износа пары трения от скорости (путь 5 км);
 б – коэффициента трения от пути ($V = 3$ м/с)

Коэффициент трения рассмотренных пар трения находится в пределах 0,2 - 0,6. Наибольший он (0,6) у ВВТН-покрытия из материала ПР-НХ16СР3, наименьший (0,2) – у ПН - покрытия из материала ПС-12НВК-01.

Необходимо отметить, что коэффициент трения во всех парах трения с участием покрытий напыленных высокоскоростным напылением выше аналогичных, напыленных плазменным способом. Объяснить этот факт без тщательного анализа состояния поверхности дорожек трения не представляется возможным. Изучение структуры и химического состава поверхности пар трения и продуктов износа является предметом дальнейших исследований автора.

Выводы

В процессе выполнения данной работы установлено, что введение в состав покрытий из самофлюсующегося сплава на никелевой основе упрочняющих добавок из карбида вольфрама и диборида титана приводит к повышению износостойкости газотермических покрытий независимо от способа их нанесения и технологии получения композиционного порошкового материала в 1,5 - 4 раза.

Определено, что фазовый состав покрытий, нанесенных высокоскоростным и плазменным напылением, принципиально не отличается. Структура покрытий, полученных по технологии ВВТН, отличается более высокой дисперсностью, отсутствием ламелей, характерных для плазменных покрытий, более высокой плотностью и меньшим содержанием оксидов.

Значительное влияние на износостойкость покрытий оказывает технология получения композиционного материала. Износостойкость покрытий из спеченного композиционного материала НХТБ-20С в 1,5 - 2,5 раза выше по сравнению с аналогичным составом (НХТБ-20К), полученным по технологии конгломерирования на органической связке. Это связано с образованием при вакуумном жидкофазном спекании в композиционном материале дополнительных фаз из сложных карбоборидов титана-хрома с микротвердостью 22,9 - 25,4 ГПа. В зависимости от технологии получения композиционного материала износостойкость соответствующих покрытий повышается, независимо от способа нанесения, в ряду – ПС -12НВК-01 → НХТБ-20К → НХТБ-20С.

Установлено, что износостойкость ВВТН покрытий из материалов ПР- НХ16СР3, ПС-12НВК-01 и НХТБ-20К выше по сравнению с аналогичными плазменными покрытиями. Износостойкость плазменного покрытия из материала НХТБ-20С не уступает износостойкости аналогичного покрытия, нанесенного методом ВВТН, практически не зависит от скорости трения в интервале $V = 0,5 - 6$ м/с и находится в пределах 22 - 28 мкм/км.

Коэффициент трения исследуемых покрытий находится в пределах 0,2 - 0,6, что является характерным для газотермических покрытий из материалов такого типа в условиях трения скольжения без смазки. Необходимо отметить, что коэффициент трения покрытий нанесенных методом ВВТН имеет более высокие значения по сравнению с аналогичными плазменными покрытиями.

Литература

1. Газо-термическое напыление [Текст]: учеб. пособие / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. В. Кудинов и др.; под общ. ред. Л. Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
2. Pavlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings [Text] / L. Pavlovski. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 626 P.
3. Кулик, А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков [Текст] / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин. - Л.: Машиностроение, 1985. - 197 с.
4. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст]: изд. 2-е, перераб. и доп. / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
5. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец и др.; под общ. ред. С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
6. Mrdak M. Microstructure and Mechanical Properties of the Mo-NiCrBSi Coating Deposited by Atmospheric Plasma Spraying [Text] / M. Mrdak, A. Vencl, M. Čosić // FME Transactions. – 2009. □ V. 37. □ №1. □ Pp. 27-32.
7. Rodriguez, J. An Experimental Study of The Wear Performance of NiCrBSi Thermal Spray Coatings [Text] / J. Rodriguez, A. Martin, R. Fernandez, J. Fernandez // Wear. – 2003. – Vol. 255. □ Pp. 950-955.
8. Соболева, Н.Н. Влияние микроструктуры и фазового состава на трибологические свойства NiCrBSi лазерных покрытий [Текст]/ Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева, Н.А.Поздеева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – №4(3). – С. 869-873.
9. Kulu P. Recycled hard metal-base wear-resistance composite coatings [Text] / P. Kulu, J. Halling. // Journal of Thermal Spray Technology. – 1998. – V.7. – P.p. 173-178.
10. Уманский, А.П. Исследование закономерностей влияния мелкодисперсных добавок TiB₂ на формирование структурно фазового состава композиционных порошков и покрытий системы (Ni-Cr-Si-B) - TiB₂ [Текст]/ А.П. Уманский, А.Е. Терентьев, М.С.Стороженко, И.С.Марценюк // Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк. – 2013. – Випуск №41. – Частина 2. – С. 213-221.

Поступила в редакцію 28.01.2014

Terentjev A. **Effect of Ni-Cr-Si-B alloy based composite powder content, production technology and spraying methods on the wear resistance of gas-thermal coatings.**

The main goal of this work is to investigate the effect of self-fluxing alloy based composite powder with TiB₂ and WC particles additives production and spraying technology on the gas-thermal coating microstructure and wear-resistance under dry sliding conditions. The comparative analysis of wear resistance of plasma-sprayed and HVOF-sprayed coatings was performed. The NiCrSiB-based composite powders with 20wt.% of TiB₂ particles additives were produced by various technologies: NTB-20C powder was fabricated by the method of conglomeration with organic binder and NTB-20S powder was produced by bulk composite material sintering in vacuum and crushing. Commercially available powder IIC-12HBK-01 was used to deposit the composite gas-thermal coating of (Ni-Cr-Si-B)-WC system. It was determined that composite powder production technology influence significantly on the coatings wear resistance. The wear-resistance of NTB-20S coatings was 1,5 - 2,5 times better than NTB-20C coatings wear-resistance. Using scanning electron microscopy it has been found that during sintering process of NiCrSiB-20%wt.TiB₂ bulk composite material the chromium-titanium boride and carbide grains are formed. The microhardness of chromium-titanium boride and carbide grains is equal to 22,9 - 25,4 GPa. It was determined that NTB-20S coatings has highest wear-resistance. Regardless of the spraying method their wear rates were in the range of 22 - 28 μm/km. Under dry sliding conditions the friction coefficient rates of the NTB coatings were within the range of 0,2 - 0,6. However, the friction coefficient rates of NTB HVOF-sprayed coatings were higher as compared with NTB plasma-sprayed coatings.

Key words: gas thermal coatings, plasma spraying, high velocity air fuel spraying, wear resistance, self-fluxing alloy, composite powder, colmonoy, structure, phase content.

References

1. Baldaev L.X., Borisov V.N., Kudinov V.V. i dr. Gazo-termicheskoe napylenie; pod obshh. red. L. X. Baldaeva. M.: Market DS, 2007. 344 P.
2. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Chichester: John Willey & Sons, 2008. 626 P.
3. Kulik A.Ja., Borisov Ju.S., Mnuhin A.S. Gazotermicheskoe napylenie kompozicionnyh poroshkov. L.: Mashinostroenie, 1985. 197 P.
4. Kragel'skij I.V. Trenie i iznos: izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1968. 480 p.
5. Klimenko C.A., Kolomec V.V., Hejfec M.L. i dr. Obrabotka rezaniem detalej s pokrytijami; pod obshh. red. S.A. Klimenko. K.: ISM im. V. N. Bakulja NAN Ukrainy, 2011. 353 p.
6. Mrdak M., Vencel A., Čosić M. Microstructure and Mechanical Properties of the Mo-NiCrBSi Coating Deposited by Atmospheric Plasma Spraying. FME Transactions. 2009. V. 37. №1. Pp. 27-32.
7. Rodrigue J., Martin A., Fernandez R., Fernandez J. An Experimental Study of The Wear Performance of NiCrBSi Thermal Spray Coatings. Wear. 2003. Vol. 255. Pp. 950-955.
8. Soboleva N.N., Malygina I.Ju., Osinceva A.L., Pozdeeva N.A. Vlijanie mikrostruktury i fazovogo sostava na tribologicheskie svojstva NiCrBSi lazernyh pokrytij. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2011. T. 13. №4(3). P. 869-873.
9. Kulu P., Halling J. Recycled hard metal-base wear-resistance composite coatings. Journal of Thermal Spray Technology. 1998. V.7. P.p. 173-178.
10. Umanskij A.P., Terentjev A.E., Storozhenko M.S., Marcenjuk I.S. Issledovanie zakonornostej vlijanija melkodispersnyh dobavok TiB₂ na formirovanie strukturno fazovogo sostava kompozicionnyh poroshkov i pokrytij sistemy (Ni-Cr-Si-B) - TiB₂. Mizhvuziv'skij zbirnik "NAUKOVI NOTATKI". Luc'k. 2013. Vipusk №41. Chastina 2. P.p. 213-221.