

5. *Graphene-based materials: synthesis, characterization, properties, and applications* / X. Huang [et al.] // *Small*. – 2011. – Vol. 7, № 14. – P. 1876–1902.

6. *PEO of AZ31 Mg alloy: effect of electrolyte phosphate content and current density* / B. Hadzina [et al.] // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, № 11. – 1521 p.

7. *Effects of Al₂O₃ Nano-additive on performance of microarc oxidation coatings formed on AZ91D Mg alloy* / Y. Wang [et al.] // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2014. – Vol. 30. – P. 984–990.

8. *Structural, tribological and electrochemical behavior of SiC nanocomposite oxide coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ31 magnesium alloy* / H. N. Vatan [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 683. – P. 241–255.

9. *Preparation and performance of a novel multifunctional plasma electrolytic oxidation composite coating formed on magnesium alloy* / J. Guo [et al.] // *Journal of Materials Science*. – 2009. – Vol. 44. – P. 1998–2006.

10. *Raman spectrum of graphene and graphene layers* / A. C. Ferrari [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2006. – Vol. 97, № 18. – Article 187401.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ NiCrBSi + 22 % TiC + 10 % SiC + 8 % ГРАФИТ

**А. Ф. Ильющенко¹, А. И. Шевцов¹, А. И. Лецко¹,
Л. В. Маркова¹, И. В. Фомихина¹, В. В. Голубев²,
К. В. Буйкус³, А. С. Козорез⁴**

¹*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
г. Минск, Беларусь*

²*НПО ОО «Защитные покрытия», г. Минск, Беларусь*

³*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

⁴*ОАО «Завод Промбурвод», г. Минск, Беларусь*

Введение. Цель работы – разработать композиционные газотермические покрытия на основе самофлюсующегося сплава с повышением их износостойкости в условиях трения при граничной смазке.

Для достижения поставленной цели предусмотрено усиление системы твердых включений покрытий и формирование в них

элементов твердой смазки [1]. Для этого на подложку распыляют порошок из механически активированных частиц – агломератов ($\text{NiCrBSi} - \text{Ti} - \text{C} - \text{SiC}$) [2]. При этом в высокотемпературной распыляющей струе происходит экзотермическая реакция ($\text{Ti} + \text{C} \rightarrow \text{TiC}$), а образующиеся карбиды титана и карбиды кремния частиц активно смачиваются легкоплавким матричным сплавом NiCrBSi . При соударении трансформированных частиц – агломератов с подложкой и их растекании образуется твердая структура покрытия детали с остаточным графитом. Последний сохраняется в покрытии за счет изменения стехиометрического соотношения $\text{Ti} : \text{C}$ в распыляемых частицах с его уменьшением до 1,459 : 1.

Для реализации упомянутого механизма процессов в полной мере актуальна оптимизация режимов газотермического распыления механически активированных частиц – агломератов. В качестве критерия оптимизации принят максимальный коэффициент использования распыляемого порошка (КИП), которому соответствуют повышенные когезионная и адгезионная прочности нанесенного на подложку материала. Величину КИП анализировали при изменении энергозатраты в распыляемые частицы порошка. Управление энергозатраты осуществляли при варьировании основных технологических параметров газопламенного напыления на установке УПТР 83. Установлено оптимальное соотношение кислорода и горючего газа, расход и давление потока воздуха для обжарки и регулирования плотности тепловой энергии высокотемпературной струи с наносимым порошком, расход порошка, дистанция напыления.

При изучении свойств полученных покрытий выполнен металлографический анализ образцов. Покрытия характеризуются достаточно равномерным распределением элементов структуры (карбиды титана и кремния, твердая смазка в виде микрочастиц графита). В качестве матричного самофлюсующегося сплава NiCrBSi применяли порошок ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 (Ni основа; Cr 16–18 мас.%; B 3,1–4,0 мас.%; Si 3,8–4,5 мас.%; C 0,8–1,2 мас.%; $\text{Fe} \leq 5,0$ мас.%).

Исследование процессов и оптимизация технологических параметров газотермического распыления механически активированных частиц – агломератов, содержащих NiCrBSi, Ti, C, SiC. Для формирования покрытия NiCrBSi + 22 % TiC + 10 % SiC + 8 % графит производили газопламенное распыление порошка ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC. При этом осуществляли варьирование технологических параметров нанесения композиции с изучением динамики изменения КИП на образцах. Экспериментальные зависимости режимов формирования покрытия представлены на рис. 1 и 2, согласно которым при варьировании режимов напыления композиционного порошка значения КИП изменялись от 0,55 до 0,73. Полученные результаты объясняются влиянием температуры и скорости распыляемых частиц, образования в них оксидов. Немаловажным фактором является также введение в состав распыляемых

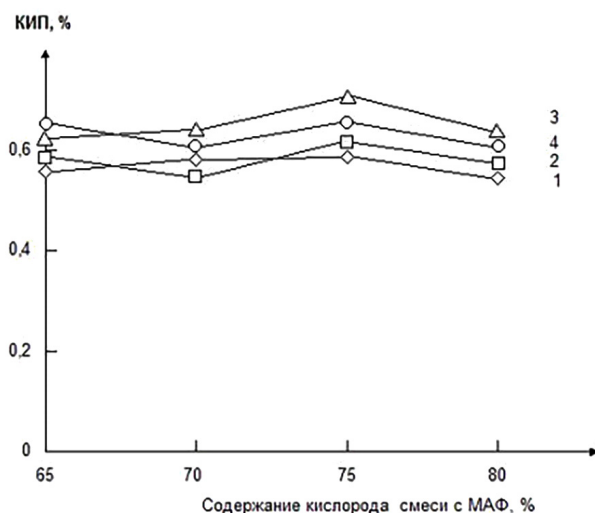


Рис. 1. Изменение КИП при газопламенном распылении порошка ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC в зависимости от содержания кислорода в смеси МАФ + O₂ при дистанции напыления 180 мм. Давление потока воздуха для обжата распыляющей струи, МПа: 1 – 0,09; 2 – 0,11; 3 – 0,13; 4 – 0,14

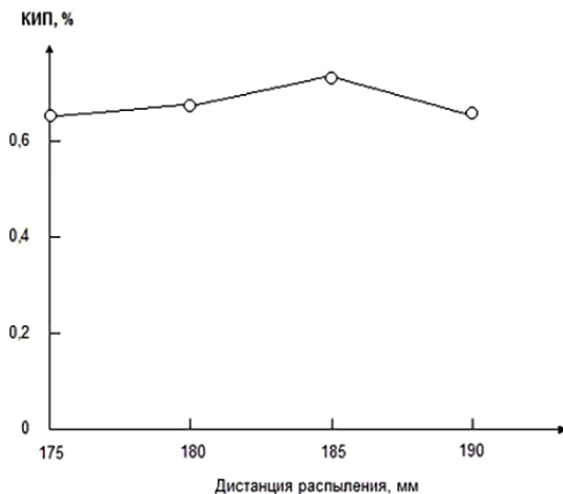


Рис. 2. Изменение КИП при распылении порошка ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC в зависимости от дистанции распыления при оптимальных содержании кислорода в смеси МАФ + O₂ (75 %) и давлении потока воздуха (0,13 МПа)

частиц – агломератов тугоплавких карбидов SiC, характеризующихся высокой теплопроводностью.

Возрастание температуры и скорости распыляемых частиц при увеличении содержания кислорода в смеси МАФ (метилацетилен-алленовая фракция) + O₂ способствует повышению кинетической энергии распыляемых частиц – агломератов. Возрастает вероятность жидкофазного состояния и растекания частиц при соударении с подложкой, коэффициент использования порошка повышается. Активизация окисления материала частиц при чрезмерном увеличении содержания O₂ затрудняет требуемый нагрев распыляемых частиц – агломератов, ограничивается их растекание на подложке. С уменьшением значения КИП ограничиваются также когезионное и адгезионное взаимодействия частиц на подложке.

Введение в состав распыляемых частиц – агломератов тугоплавких карбидов SiC с высокой теплопроводностью создает условия для градиента теплофизических свойств материалов

композиционной частицы. Возможны перегрев легкоплавкого связующего матричного сплава NiCrBSi и разбрызгивание соударяющихся с подложкой частиц. В случае разбрызгивания вторичные частицы с пониженной температурой и приближенной формой тел вращения не обеспечивают формирование покрытия, коэффициент использования порошка уменьшается.

Преимущественное положительное влияние роста температуры и скорости распыляемых частиц создает предпосылки для получения локального максимума КИП на экспериментальной кривой, что соответствует оптимальному режиму содержания кислорода в смеси МАФ + O₂, которое составляет 75 % (см. рис. 1).

Обсуждая результаты на рис. 1, необходимо отметить, что при увеличении давления потока воздуха для обжата распыляющей струи концентрация энергии в ней повышается. Рассмотренные перспективы растекания при соударении частиц с подложкой также имеют место. Экспериментальные кривые *l–4* свидетельствуют о том, что максимальный коэффициент использования порошка и оптимальный режим наблюдаются при давлении потока воздуха 0,13 МПа (см. рис. 1, кривая 3).

Изменение КИП при варьировании дистанции распыления порошка ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC представлено на рис. 2. Согласно приведенным экспериментальным данным максимальный КИП и оптимальная дистанция напыления составляют 0,73 и 185 мм соответственно. Очевидно, что при указанной дистанции имеет место необходимое сочетание нагрева и ускорения частиц в распыляющей струе. Создаются предпосылки пластичности и эффективного растекания частиц на подложке.

Отклонения от оптимальных режимов могут снижать КИП за счет перегрева и разбрызгивания соударяющихся с подложкой частиц. Общие сведения по оптимизированным режимам напыления разрабатываемого покрытия представлены в таблице.

Оптимизированные режимы напыления использовали при получении покрытий для металлографического анализа образцов. Гранулометрический состав распыляемых порошков находился в пределах 50–100 мкм. Вначале распыляли подслоем адге-

зива (самофлюсующийся сплав ПР – Н70Х17С4Р4 – 3) толщиной 0,05–0,10 мм, а затем – основным слоем (порошок ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC). Порошок основного слоя показан на рис. 3, снимки выполнены на стереоскопическом микроскопе «Альтами СМ 0745» (Россия) и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения MIRA фирмы TESCAN (Чехия).

Оптимизированные режимы напыления

Распыляемый композиционный порошок	Толщина наносимого покрытия, мм	Давление/расход, МПа / л/мин			Расход распыляемого порошка, кг/ч	Дистанция напыления, мм
		кислорода	МАФ	воздуха		
ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC	0,6–0,7	0,34/36	0,10/12	0,13/17	6	185

Изучение свойств покрытий, полученных при оптимизированных технологических параметрах. Структура покрытий после распыления порошков в виде частиц – агломератов ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC показана на рис. 4.

Согласно представленным фотографиям нанесенные композиционные материалы сформированы из растекшихся частиц.

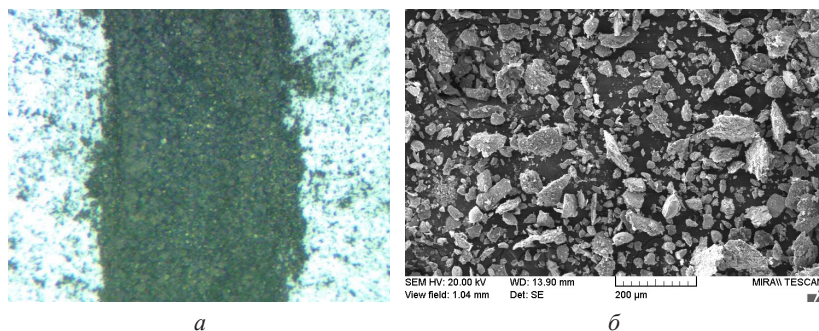


Рис. 3. Порошок (а – внешний вид; б – СЭМ-фотография) для нанесения покрытия

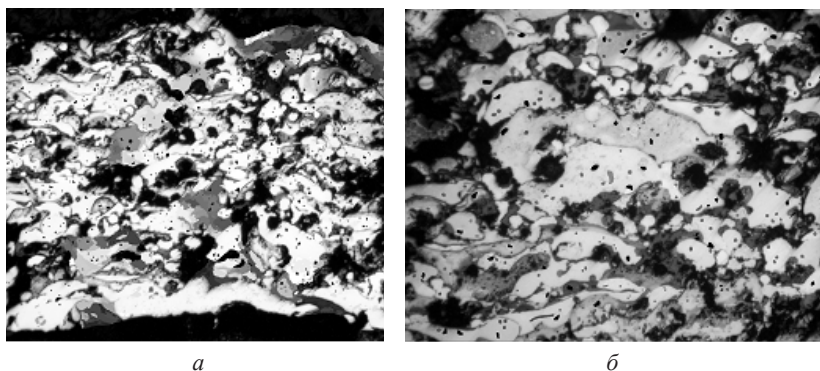


Рис. 4. Микроструктура покрытия после распыления порошка
 ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % С + 10 % SiC: *a* – $\times 100$; *б* – $\times 200$

На фотографиях заметны границы между частицами, нанесенными слоями, покрытием и подложкой. Как видно из рис. 4, основными структурными элементами являются самофлюсующийся сплав NiCrBSi, преимущественно мелкодисперсные карбиды TiC серого оттенка, включения графита черного цвета с достаточно сложной формой. Заметны также карбиды SiC черного цвета с размерами 2–4 мкм, которые уменьшились в сравнении с исходными значениями 6–9 мкм в состоянии поставки (ГОСТ 26327-84). Измельчение обусловлено хрупкостью и скалыванием карбидов SiC при механической активации шихты для получения вышеуказанного распыляемого порошка в виде частиц – агломератов.

Таким образом, система твердых соединений матричного сплава NiCrBSi усилена карбидными фазами TiC и SiC с твердостью по шкале Мооса 9,0 и 9,5 соответственно. Соединение SiC характеризуется эффективной теплопроводностью, что немаловажно при граничной смазке трибосопряжения с интенсивным нагревом поверхности трения. Это соединение способствует теплоотводу и стабилизации механической прочности трущихся материалов, что затрудняет их разрушение.

Как отмечалось, карбиды титана синтезированы при полете частиц в распыляющей струе. При этом известная экзотермическая реакция $Ti + C \rightarrow TiC$ может завершаться на подложке

с микроприваркой распыляемых частиц – агломератов к основному материалу изделия. Создаются предпосылки увеличения адгезионной прочности наносимого износостойкого покрытия.

Включения графита получены за счет незавершенных экзотермических реакций карбидообразования. Это обеспечивается соотношением СВС-реагентов в распыляемых частицах, которое ниже стехиометрического ($Ti : C = 1,459 : 1$). Включения графита на поверхности трения покрытия создают эффект самосмазывания, который наряду с дополнительной системой твердых карбидов титана и кремния затрудняет изнашивание нанесенной композиции микроконтактным схватыванием. При трении с граничной смазкой, для условий которого предназначено разрабатываемое покрытие, упомянутый процесс изнашивания является доминирующим.

Снижению темпов изнашивания разрабатываемого покрытия способствуют также следующие факторы: аморфизация структуры матричного сплава NiCrBSi (непротравленные участки композиции; см. рис. 4); активное смачивание легкоплавким сплавом NiCrBSi твердых тугоплавких соединений, выкрашивание которых и абразивное изнашивание в процессе трения затрудняются; повышенная адгезия жидкой смазки, характерная для сплава NiCrBSi, суммируется с эффектом самосмазывания, надежность разделительного слоя между поверхностями трения возрастает.

На рис. 5 представлена рентгенограмма полученного покрытия ПР – H70X17C4P4 – 3 + 22 % TiC + 10 % SiC + 8 % графит, которая дополняет металлографический анализ и подтверждает наличие в нанесенной композиции основных фаз, регламентированных составом исходного распыленного порошка ПР – H70X17C4P4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % C + 10 % SiC. Пористость полученных покрытий, установленная с применением анализатора изображений MIRA TESCAN при изучении шлифов нанесенных композиций, находится в пределах 7,7–8,7 %.

Заключение. Проведены исследования процессов и оптимизированы технологические параметры газотермического распыления композиционных механически активированных СВС-порош-

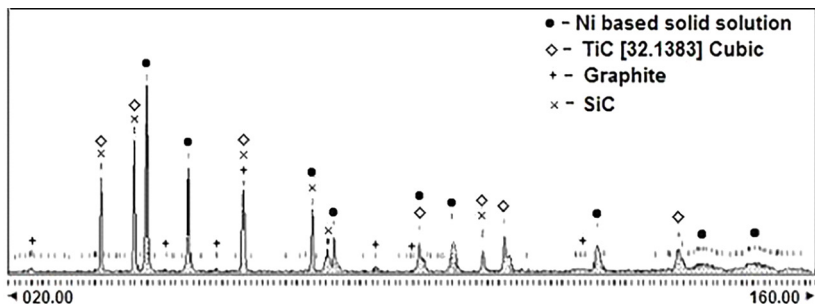


Рис. 5. Рентгенограмма покрытия ПР – Н70Х17С4Р4 –
3 + 22 % TiC + 10 % SiC + 8 % графит

ков в виде распыляемых частиц – агломератов ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 17,8 % Ti + 12,2 % C + 10 % SiC. Упомянутые материалы наносили на подложку путем газопламенного распыления с применением установки УПТР 83. Оптимизация выполнена при исследовании процессов структурообразования из жидкофазных распыляемых частиц, растекающихся на подложке при соударении с ней. В качестве критерия оптимизации принят максимальный коэффициент использования распыляемого порошка (КИП). Оптимальными являются следующие технологические параметры: давление кислорода 0,34 МПа и расход кислорода 36 л/мин; давление МАФ 0,1 МПа и расход МАФ 12 л/мин; давление воздуха 0,13 МПа и расход воздуха 17 л/мин; расход распыляемого порошка 6 кг/ч; дистанция напыления 185 мм.

Изучены свойства полученных покрытий ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 22 % TiC + 10 % SiC + 8 % графит и проанализирована их структура. Установлено, что основными структурными элементами являются самофлюсующийся сплав NiCrBSi, преимущественно мелкодисперсные карбиды TiC серого оттенка, включения графита черного цвета с достаточно сложной формой, заметны также карбиды SiC черного цвета с размерами 2–4 мкм. Пористость полученных покрытий, установленная с применением анализатора изображений MIRA TESCAN при изучении шлифов нанесенной композиции, находится в пределах 7,7–8,7 %.

Литература

1. *Основы* нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2006. – 363 с.
2. *Исследование* процессов и оптимизация технологических параметров синтеза порошка на основе самофлюсующегося сплава с твердыми тугоплавкими включениями при использовании шихты, содержащей СВС-реагенты / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия : респ. межвед. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 39. – С. 17–23.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

Г. А. Костюкович¹, А. В. Попрукайло¹,
А. С. Воронцов²

¹ОАО «Белкард», г. Гродно, Беларусь,
e-mail: gsktb@belcard-grodno.com, ogt@belcard-grodno.com

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
г. Гродно, Беларусь, e-mail: a.voroncov@grsu.by

Карданные передачи с универсальными шарнирами являются неотъемлемой частью подавляющего большинства современных машин и механизмов, особенно в транспортной технике. Оптимальный выбор конструкции карданной передачи, а также ее рациональная компоновка в значительной степени определяют технические и эксплуатационные характеристики машин и механизмов различного функционального назначения.

Возрастающие требования к автомобильной технике, а именно к повышению долговечности и качеству узлов транспортных средств, в частности карданных передач, требуют создания и внедрения их более совершенных конструкций.

Важной особенностью конструкции карданных передач являются осевые перемещения. Для обеспечения осевых перемещений в конструкциях карданных передач используют шлицевые соединения. Подвижное шлицевое соединение, компенсирующее