

УДК 621.793.71

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-58-66

Отработка режимов напыления и свойства износостойких газопламенных покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, полученных с использованием гибкого шнурового материала

© 2016 г. **А.С. Аникеев, И.В. Блинков, В.В. Иванов, А.И. Лаптев, В.С. Челноков, И.Ю. Кучина**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва
ООО «Оерликон Метко Рус», г. Люберцы, Московская обл.

Статья поступила в редакцию 01.03.16 г., доработана 25.04.16 г., подписана в печать 29.04.16 г.

Методом газопламенного напыления гибкого шнура получены образцы покрытий на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$. Исследовано влияние параметров процесса и состава напыляемого материала на структуру, состав и механические свойства покрытий. Показано, что увеличение дистанции напыления и скорости подачи напыляемого материала приводит к снижению их плотности. Повышение концентрации легкоплавкого компонента TiO_2 обуславливает уменьшение пористости покрытий, а на их твердость заметного влияния не оказывает. Сформированные с минимальной пористостью ($\Gamma \sim 3,2\%$) пламенные покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ при измерительном царапании характеризуются когезионным характером разрушения и отсутствием вскрытия подложки при нагрузке на индентор до 90 Н. Коэффициент трения исследуемых покрытий после 2800 об. контр-тела (44 м пути трения) меняется от 0,2 до 0,78. Это связано с накоплением в материале покрытия усталостных трещин и его последующим когезионным разрушением через образование крупных фрагментов, играющих роль абразива.

Ключевые слова: газопламенные покрытия, напыление гибкого шнура, пористость, твердость, расход напыляемого материала, дистанция напыления, износостойкость.

Аникеев А.С. – магистрант кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: Andrey.anikee.93@mail.ru.

Блинков И.В. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: biv@misis.ru.

Челноков В.С. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры.

Иванов В.В. – ген. директор ООО «Оерликон Метко Рус» (140000, Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, 259а). E-mail: Valery.ivanov@oerlikon.com.

Лаптев А.И. – докт. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник НИЛ СТМ НИТУ «МИСиС». E-mail: laptev@misis.ru.

Кучина И.Ю. – ст. науч. сотрудник той же лаборатории. E-mail: Kuchinaira@yandex.ru.

Для цитирования: Аникеев А.С., Блинков И.В., Иванов В.В., Лаптев А.И., Челноков В.С., Кучина И.Ю. Отработка режимов напыления и свойства износостойких газопламенных покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, полученных с использованием гибкого шнурового материала // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 3. С. 58–66. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-58-66.

Anikeev A.S., Blinkov I.V., Ivanov V.V., Laptev A.I., Chelnokov V.S., Kuchina I.Yu.

Try-out of spraying modes and properties of wear resistant $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ flame coatings obtained using flexible cord material

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ -based coating specimens were obtained using the method of oxyfuel gas spraying of a flexible cord. The paper studies the influence of process parameters and composition of the sprayed material on the structure, composition and mechanical properties of coatings. It was shown that the increase in spraying distance and feed rate of the sprayed material leads to reduction in their density. An increased concentration of the low-melting TiO_2 component preconditions a decrease in coating porosity and has no significant effect on its hardness. During measuring scratching, the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ flame coatings formed with minimal porosity (porosity $\sim 3,2\%$) are characterized by cohesive fracture behavior and no substrate break up at the 90 N load applied to the indenter. The studied coatings show changes in their friction factor from 0,2 to 0,78 after 2800 counterbody revolutions (44 m of rubbing path). This is due to accumulated fatigue cracks in the coating material and its subsequent cohesive fracture through formation of large fragments that serve as an abrasive.

Keywords: flame coating, flexible cord spraying, porosity, hardness, flow rate of the sprayed material, spraying distance, wear resistance.

Anikeev A.S. – Master, Department of functional nanosystems and high temperature materials, National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 4). E-mail: Andrey.anikee.93@mail.ru.

Blinkov I.V. – Dr. Sci. (Tech.), Professor of the same Department. E-mail: biv@misis.ru.

Chelnokov V.S. – Cand. Sci., Associate Professor of the same Department.

Ivanov V.V. – General Director LTD «Oerlikon Metco Rus» (140000, Russia, Moscow region, Lyubertsy, Oktyabrsky prospect, 259a). E-mail: Valery.ivanov@oerlikon.com.

Laptev A.I. – Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Researcher, Research Laboratory of superhard materials, NUST «MISIS». E-mail: laptev@misis.ru.

Kuchina I.Yu. – Senior Researcher of the same Laboratory. E-mail: Kuchinaira@yandex.ru.

Citation: Anikeev A.S., Blinkov I.V., Ivanov V.V., Laptev A.I., Chelnokov V.S., Kuchina I.Yu. Otrabotka rezhimov napyleniya i svoystva iznosostoikikh gazoplammennykh pokrytii $Al_2O_3-TiO_2$, poluchennykh s ispol'zovaniem gibkogo shnurovogo materiala. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 3. С. 58–66.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-58-66.

Введение

Повышение надежности и долговечности машин путем увеличения износостойкости трущихся деталей — одна из основных задач современного развития машиностроительной отрасли. Возможное ее решение связано с разработкой и совершенствованием износостойких покрытий и расширением их применения. Широко распространенным методом нанесения таких покрытий является газотермическое напыление [1, 2], каждая из разновидностей которого имеет свои достоинства и недостатки.

- **Высокоскоростное пламенное напыление (High Velocity Oxy-Fuel — HVOF)** наряду с детонационно-газовым обладает самыми высокими показателями по плотности и адгезионной прочности получаемых покрытий [3]. Однако оно характеризуется высокой стоимостью оборудования и сложностью производства порошков для напыления.

- **Покрытия, полученные плазменным методом,** имеют достаточно низкую пористость ($\Pi \sim 5\div 7\%$) и удовлетворительную адгезию (30–60 МПа) [4]. Вместе с тем этот метод связан с низким тепловым КПД, высокими остаточными напряжениями в покрытиях и максимальными затратами энергии для его реализации.

- **Широкое распространение** получил газопламенный метод (Flame Spraying) нанесения покрытий из-за его относительной простоты, надежности и мобильности оборудования. При правильной оптимизации распыления покрытия обладают высокими показателями плотности и физико-механических свойств, сопоставимыми с получаемыми методами HVOF и плазменного напыления [5]. Также он является наименее энергозатратным и дешевым по сравнению с другими газотермическими технологиями.

Газотермические композитные покрытия, нанесенные с использованием порошковых смесей оксидов алюминия и титана, обеспечивают защи-

ту от абразивного износа, эрозии и изнашивания при трении скольжения в условиях повышенных температур, обладают высокой жаростойкостью и диэлектрическими свойствами [6–12]. Благодаря этому они успешно используются в качестве электрических изоляторов для защиты изделий, подверженных электрохимической коррозии (насосы валы, термопары) и различным видам изнашивания. В работе [13] приведены результаты исследования по нанесению покрытий $Al_2O_3-TiO_2$ в качестве диффузионных барьерных слоев.

Интерес к композиции $Al_2O_3-TiO_2$ для газопламенного напыления связан с тем, что при нагреве до температуры 1840 °С в данной системе возможно образование эвтектики [14], наличие которой компенсирует относительно низкое теплосодержание пламени горелки, необходимое для расплавления напыляемого материала.

В настоящей работе проведено исследование влияния параметров процесса напыления на свойства газопламенных покрытий $Al_2O_3-TiO_2$, полученных с помощью гибкого шнура. Использование данного типа напыляемого материала оказывает существенное влияние на нагрев его составляющих, их распределение в пламенном потоке. Это может сказаться на их свойствах по сравнению с покрытиями, полученными при напылении порошковых смесей.

Экспериментальная часть

Покрытия наносились на образцы цилиндрической формы из стали Ст. 45. В качестве исходного материала для напыления выбран гибкий шнур марки «Черный корунд» на основе оксидов алюминия (83 мас.% $\alpha-Al_2O_3$) и титана (13 мас.% TiO_2). Напыление осуществлялось с использованием установки Top Jet-2 на предприятии ООО «Оерликон Метко Рус». С целью улучшения адгезион-

ной прочности покрытия с подложкой исходные образцы перед нанесением подвергались струйно-абразивной обработке. Затем на основу при дистанции напыления 100 мм и скорости подачи шнура 36 см/мин наносился подслои из материала «ниалид» (95 % Ni + 5 % Al), который был выбран для согласования коэффициентов линейного термического расширения керамического покрытия и металлической основы и уменьшения остаточных термических напряжений. Кроме этого, данный подслои выполняет функции барьера на пути возможной самодиффузии кислорода из объема оксидного покрытия в подложку.

Меняющимися параметрами при нанесении покрытий являлись: дистанция напыления (l), расход материала (v) и состав горючего газа (см. таблицу). В качестве источника тепла использовалось ацетилен-кислородное и пропан-кислородное пламя. Давления газов при нанесении покрытия составляли: ацетилен — 1,2 атм, пропан — 1,8 атм и кислород — 3,2 атм. Толщина напыленного покрытия $Al_2O_3-TiO_2$ была порядка 550 мкм.

Для изучения морфологии, элементного состава и пористости покрытий были подготовлены поперечные шлифы образцов, которые исследовались на полевом растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-6700 при ускоряющем напряжении 20 кВ, оснащенный энергодисперсионным спектрометром (JEOL, Япония).

Пористость покрытий определялась по изображениям, полученным с помощью РЭМ, согласно [15]. Фазовый состав был исследован методом рентгеновской дифракции. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре ДРОН-3М с использованием излучения CoK_{α} .

Параметры процесса напыления для различных серий образцов

№ обр.	Дистанция напыления l , мм	Скорость подачи шнура v , см/мин	Состав пламени
1	50	36	Ацетилен–кислород
2	100	36	Ацетилен–кислород
3	150	36	Ацетилен–кислород
4	100	28	Ацетилен–кислород
5	100	41	Ацетилен–кислород
6	100	36	Пропан–кислород

Примечание. В интервалах $l = 50 \div 150$ мм и $v = 28 \div 41$ см/мин в экспериментах реализовывались промежуточные значения этих параметров.

Твердость покрытий измерялась по Роквеллу по шкале В (HRВ) на стационарном твердомере ТН-300 («TIMEGroup», Китай) при максимальной нагрузке 980 Н. Исследование микротвердости структурных составляющих материала покрытия выполнено на приборе Micro-Hardness Tester (CSM, Швейцария), оснащенный алмазным индентором Берковича, под нагрузкой 2 Н в течение 15 с. Твердость и модуль Юнга локальных областей покрытий определялись по методу Оливера—Фара [16].

Измерительное царапание образцов с покрытиями осуществлялось в соответствии с «Методикой выполнения измерений адгезионной и когезионной прочности на скретч-тестере «REVE-TEST» фирмы CSM (Швейцария) МВИ АКП/09» (ФР.1.28.2010.07503) при следующих условиях:

- максимальная нагрузка 70/100 Н;
- индентор — алмазный конус Rockwell C;
- скорость нагружения: 99,1 Н/мин;
- длина царапины 5 мм.

В процессе царапания фиксировались уровень акустической эмиссии (АЭ), сила трения (СТ) и коэффициент трения (КТ). После испытания образцов были получены изображения царапины с использованием оптического микроскопа.

Трибометрические испытания были проведены на установке Nanovea Tribometers T50 («Nanovea», США) по методу Pin-On-Disk при следующих условиях:

- нормальная нагрузка 5 Н;
- линейная скорость 0,1 м/с;
- скорость вращения исследуемого образца 20 000 об.;
- диаметр дорожки трения 5 мм;
- корундовое контртело в виде шарика диаметром 6 мм.

Испытания проводились в атмосфере воздуха при комнатной температуре. Исследования бороздок износа осуществлялись на оптическом профилеометре WYKONT 1100 («Veeco», США).

Результаты экспериментов и их анализ Структура покрытия

На первом этапе проведены исследования влияния дистанции напыления (l) на структуру и состав покрытий. Установлено, что все они имеют характерную для газопламенного напыления слоистую арочную структуру (рис. 1). В покрытиях присутствуют отдельные дефекты в виде микротрещин и пор, что может быть связано с фор-

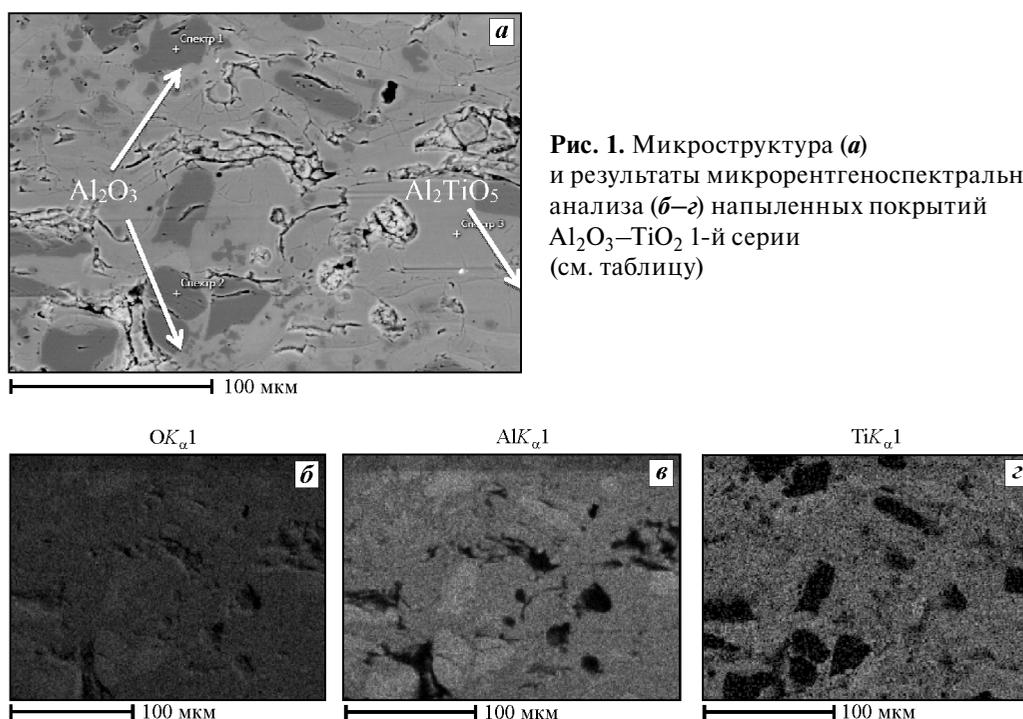


Рис. 1. Микроструктура (а) и результаты микрорентгеноспектрального анализа (б–д) напыленных покрытий Al₂O₃–TiO₂ 1-й серии (см. таблицу)

мированием слоев из маловязких частиц Al₂O₃ и расплавленных частиц TiO₂. При кристаллизации капель происходит их усадка, приводящая к возникновению растягивающих напряжений на границах контакта и, как следствие, возможному развитию микротрещин на поверхности покрытия.

Все серии полученных покрытий имеют в своем составе примерно одинаковое соотношение компонентов, отвечающее их содержанию в напыляемом материале. В их структуре четко выражены две области (рис. 1, а): первая — темно-серые включения, обогащенные алюминием и кислородом, и вторая — светло-серая матрица, характеризующаяся наличием алюминия, титана и кислорода и занимающая большую часть образца (84–90 %). По соотношению компонентов в этих областях покрытий можно сделать вывод о том, что данные структурные составляющие — это оксид алюминия и сложный оксид на основе алюминия и титана (Al₂TiO₅), образовавшийся в процессе взаимодействия Al₂O₃ и TiO₂.

Эти выводы согласуются с результатами РФА, который подтвердил наличие в покрытии α- и γ-модификации оксида алюминия для образцов 1–4, а также фазы Al₂TiO₅. На рис. 2 представлена рентгенограмма покрытия 2.

Метастабильная фаза γ-Al₂O₃ могла образоваться из расплава исходного Al₂O₃ при резком

охлаждении в процессе формирования покрытия. Ее отсутствие в обр. 5 и 6 связано с меньшей вероятностью нагрева оксида алюминия до температуры плавления вследствие большой загруженности пламени напыляемым материалом (максимальная скорость подачи шнура ~41 см/мин) и меньшей температурой пропан-кислородного пламени по сравнению с ацетилен-кислородным соответственно для обр. 5 и 6. Это подтверждается уменьшением содержания в данных покрытиях Al₂TiO₅ — продукта взаимодействия Al₂O₃ с TiO₂ — до 84 и 87 % соответственно против 90 % для обр. 2, полученного при той же дистанции напыления, но при меньшем расходе напыляемого материала, с использованием ацетилен-кислородного пламени.

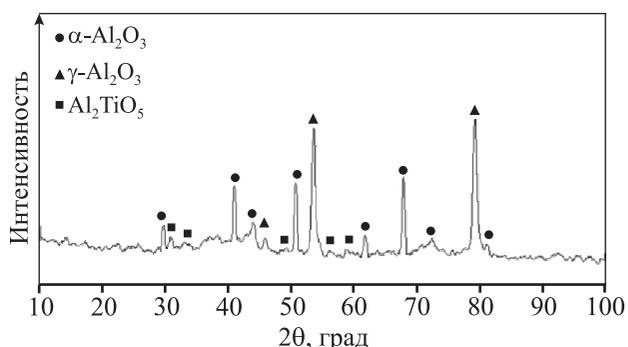


Рис. 2. Рентгенограмма пламенного покрытия Al₂O₃–TiO₂ 2-й серии

С увеличением дистанции напыления наблюдается уменьшение плотности покрытия (рис. 3) и возрастание при этом среднего размера пор с 10 до 40 мкм.

При изучении морфологии обр. 4 и 5, которые были получены при возрастающей скорости подачи шнура с 28 до 41 см/мин соответственно, наблюдалось увеличение пористости. При максимальной величине v в покрытии формируются крупные поры, достигающие размера 50 мкм. Это можно объяснить уменьшением степени нагрева распыляемых частиц, что является одним из факторов формирования качественных и плотных покрытий [1]. Для обр. 4 и 5, полученных при расходе напыляемого материала 28 см/мин, характерна наименьшая пористость (рис. 4).

Покрытие 6, напыленное в пропан-кислородном пламени при $l = 100$ мм и $v = 36$ см/мин, характеризуется расслоениями, крупными порами, достигающими 30–40 мкм (рис. 5). Это связано с

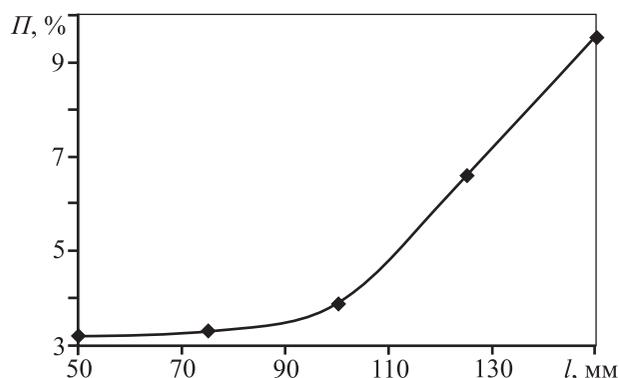


Рис. 3. Зависимость пористости ацетилен-кислородного пламенного покрытия $Al_2O_3-TiO_2$ от дистанции напыления
Расход материала постоянный – 36 см/мин

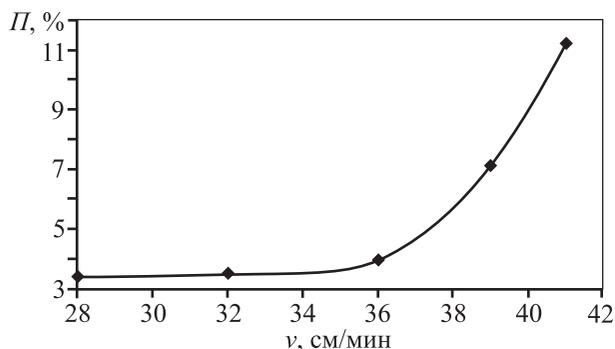


Рис. 4. Зависимость пористости ацетилен-кислородного пламенного покрытия $Al_2O_3-TiO_2$ от расхода напыляемого материала
Дистанция напыления постоянна – $l = 100$ мм

меньшей температурой горения пропана в кислородной среде (~ 2050 °С) по сравнению с температурой ацетилен-кислородного пламени (~ 3100 °С). Пористость данных покрытий составляла $\sim 12,8$ % против $\sim 3,9$ %, соответствующей покрытию 2, полученному при тех же режимах напыления с применением ацетилен-кислородного пламени.

Далее в работе изучалось влияние содержания оксида титана в напыляемом материале на структуру и состав формируемых покрытий. Для этого были приготовлены 3 шнура, содержащих 8, 15 и 17 мас.% TiO_2 . Дистанция напыления и скорость их подачи были 100 мм и 36 см/мин соответственно. В качестве пламяобразующего газа использовалась ацетилен-кислородная смесь.

Установлено, что с увеличением концентрации TiO_2 пористость напыленных покрытий снижается (рис. 6), что может быть связано с уменьшением температуры плавления данной смеси компонентов по мере приближения их состава к эвтектическому и формированию покрытий из расплавленного материала.

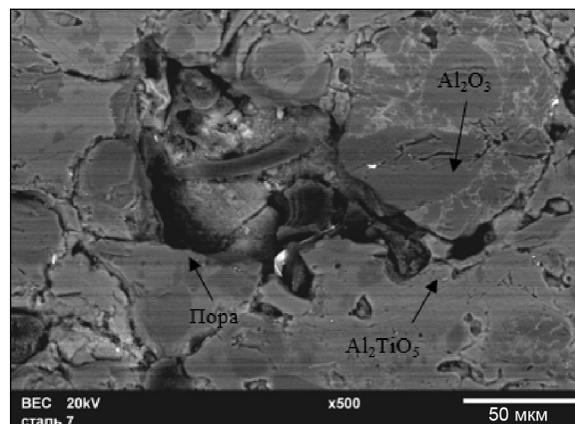


Рис. 5. Микроструктура пламенных покрытий $Al_2O_3-TiO_2$ серии 6

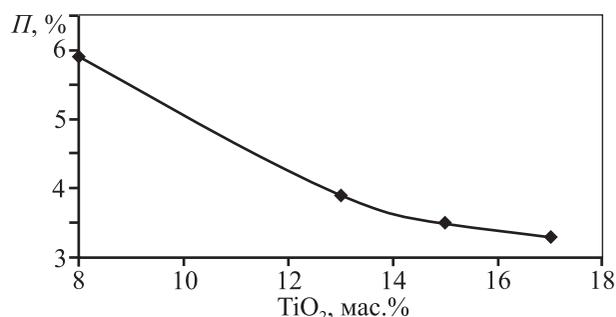


Рис. 6. Зависимость пористости ацетилен-кислородного пламенного покрытия $Al_2O_3-TiO_2$ от концентрации TiO_2 в напыляемом материале
 $l = 100$ мм, $v = 36$ см/мин

Механические и трибологические свойства пламенных покрытий

Формирующаяся структура и состав покрытий при изменяющихся дистанции напыления, расходе напыляемого материала и его составе оказывают существенное влияние на их свойства. Ниже представлены результаты измерения твердости полученных покрытий разных серий:

№ обр.	1	2	3	4	5
HRB	108±4	105±4	89±3	108±4	95±4

Видно, что на показатель *HRB* оказывают влияние дистанция напыления и расход напыляемого материала, определяющие их пористость и содержание Al_2O_3 и Al_2TiO_5 .

Микроиндентирование дало возможность определить микротвердость структурных составляющих покрытий. Так, у включений Al_2O_3 она составляет ~10 ГПа, а Al_2TiO_5 — порядка 8 ГПа, что является характерным для данных фаз [7].

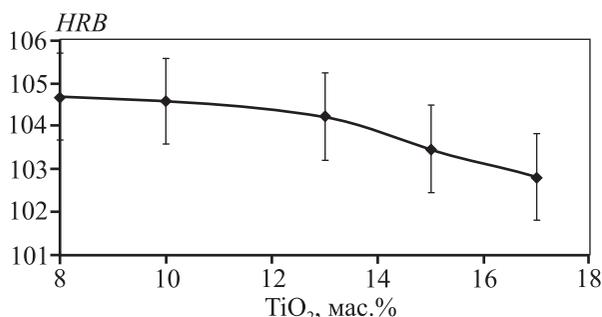


Рис. 7. Зависимость твердости ацетелен-кислородного пламенного покрытия $Al_2O_3-TiO_2$ от концентрации TiO_2 в напыляемом материале

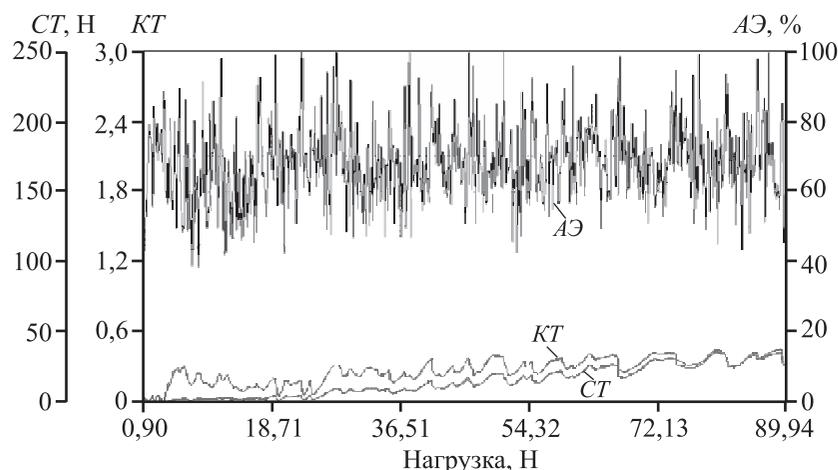


Рис. 8. Зависимости силы трения, коэффициента трения и акустической эмиссии от величины нормальной нагрузки, полученные при измерительном царапании обр. 1

На рис. 7 показана зависимость твердости покрытия от содержания TiO_2 в исходном напыляемом шнуре. Видно, что ее значения практически не зависят от состава напыляемого шнура в исследуемом диапазоне концентраций исходных компонентов. Данная закономерность проявляется на фоне влияния содержания TiO_2 на пористость напыляемых слоев (см. рис. 6), оказывающую заметное влияние на твердость покрытий. Это может быть связано с тем, что в составе сформированных покрытий при росте содержания TiO_2 в гибком шнуре увеличивается концентрация с 80 до 90 % фазы Al_2TiO_5 , твердость которой значительно меньше, чем у Al_2O_3 .

Методом измерительного царапания была изучена адгезионная/когезионная прочность напыленных покрытий. Характерная зависимость измеряемых величин *АЭ*, *СТ*, *КТ* и внешний вид царапины от алмазного индентора представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

По сигналу *АЭ* видно (рис. 8), что процесс образования царапины на поверхности покрытия с самого начала происходит по механизму хрупкого разрушения. При этом интенсивность *АЭ* не меняется в ходе всего эксперимента.

При возрастании нагрузки вплоть до 90 Н вскрытия подложки не наблюдается (рис. 9), что свидетельствует об отсутствии адгезионного характера разрушения покрытия и высокой прочности его соединения с подложкой. Однако выявлено очаговое когезионное разрушение. Об этом также можно судить по монотонному характеру изменения величин *СТ* и *КТ* в зависимости от нагрузки на индентор (см. рис. 8). При вскрытии подложки на

этих графиках обычно наблюдается перелом, свидетельствующий о проникновении индентора в более мягкий материал [17]. При повышении нагрузки величина отделяющихся фрагментов материала покрытия растет.

Результаты трибологического испытания подложки и напыленного покрытия представлены на рис. 10 и 11. Из полученных данных видно, что до 2800 об. контртела коэффициент трения между ним и покрытием не превышает 0,2, а затем наблюдается его резкий скачок и возрастание амплитуды его колебаний.

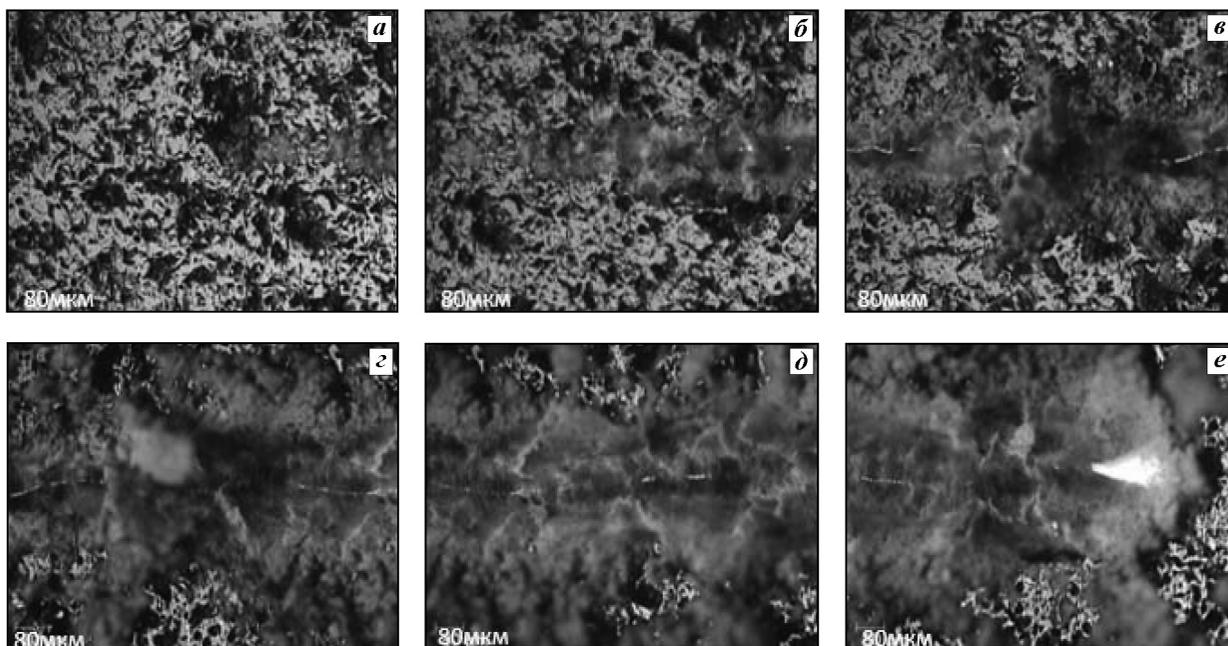


Рис. 9. Изображения царапины на поверхности газопламенного покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ серии *1* при разных нагрузках на индентор
a – 1 Н, *б* – 12,2 Н, *в* – 31,4 Н, *г* – 43 Н, *д* – 60,7 Н, *е* – 88 Н

Это может быть связано с накоплением в процессе испытаний в материале покрытия усталостных трещин и началом процесса его разрушения с образованием относительно крупных фрагментов покрытия, которые в дальнейшем участвуют в из-

нашивании в роли абразива. Износ материала покрытия при этом составил $20,8 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$.

По профилограмме дорожки износа контроле—покрытие (рис. 11) можно сделать вывод, что вскрытия подложки за время испытания не произошло. Глубина износа составила 86 мкм, что гораздо меньше толщины покрытия (~550 мкм).

Результаты трибологических исследований подложки показали, что коэффициент трения начинает расти с начала испытания и достигает значения ~0,6. Износ материала подложки при этом составил $44,6 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$.

Сравнение полученных результатов с данными

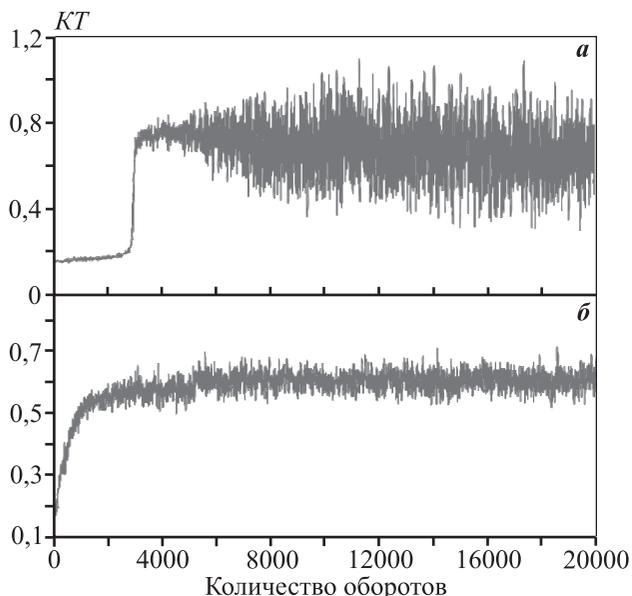


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения от количества оборотов контроле для газопламенных покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ серии *1* и подложки
a – контроле—покрытие, *б* – контроле—подложка



Рис. 11. Профилограмма дорожки износа образца газопламенного покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ серии *1*

авторов [6], изучавших механические и трибологические свойства газопламенных покрытий Al_2O_3 — TiO_2 , показывает, что покрытия, сформированные в наших условиях, характеризуются большей износостойкостью. Данный результат может быть связан с их меньшей пористостью (3,2 % против 9,9 % в работе [6]).

Заключение

Полученные методом газопламенного напыления гибкого шнура образцы покрытий на основе Al_2O_3 — TiO_2 характеризуются наличием α - и γ - фаз оксида алюминия и сложного оксида Al_2TiO_5 , образовавшегося в процессе взаимодействия Al_2O_3 и TiO_2 .

Показано, что увеличение дистанции напыления и скорости подачи напыляемого материала обуславливает снижение плотности материала покрытий и укрупнение пор.

Замена ацетилен-кислородного пламени на пропан-кислородное приводит к расслоению покрытия и появлению крупных пор, достигающих размера 30—40 мкм, что связано с меньшей температурой горения пропана в кислородной среде (~2050 °С) по сравнению с температурой ацетилен-кислородного пламени (~3100 °С).

Повышение содержания легкоплавкого компонента TiO_2 в составе напыляемого шнура характеризуется уменьшением пористости покрытия без заметного влияния на их твердость, что определяется увеличивающейся долей в покрытии фазы Al_2TiO_5 , твердость которой значительно меньше, чем у Al_2O_3 .

Полученные пламенные покрытия Al_2O_3 — TiO_2 имеют когезионный характер разрушения. При этом вскрытия подложки в процессе измерительного царапания не происходит при нагрузках на индентор до 90 Н.

Коэффициент трения данных покрытий меняется от 0,2 с ростом после 2800 об. (44 м пути трения) до 0,78, что связано, по-видимому, с накоплением в материале покрытия усталостных трещин и его последующим когезионным разрушением через образование крупных фрагментов, играющих роль абразива.

Литература

1. Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А., Ганноченко Г.И., Затока А.Е., Захаров Б.М., Иванов А.В., Кудинов В.В.,

Ярославцев В.М. Газотермическое напыление: Учеб. пос. / Под ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007.

2. Утенков В.М., Зайцев А.Н. Исследование триботехнических характеристик перспективных износостойких плазменных покрытий при трении скольжения без смазки // Новые материалы и технологии. 2013. No. 11. С. 81—89.
3. Dorfman M. Thermal spray materials // Adv. Mater. Proces. 2002. Vol. 160. P. 49—51.
4. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977.
5. Kasparova M., Houdkova S., Cubrova J. Thermally sprayed coatings for high temperature application // Proc. 21-st Int. conf. on metallurgy and material (Brno, Czech Republic, 23—25. 05. 2012). P.144—146.
6. Vargas F., Ageorges H., Fournier P. Mechanical and tribological performance of Al_2O_3 — TiO_2 coatings elaborated by flame and plasma spraying // Surf. Coat. Technol. 2010. Vol. 205. P. 1132—1136.
7. Habib K.A., Saura J.J., Ferrer C. Comparison of flame sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ coatings: Their microstructure mechanical properties and tribology behavior // Surf. Coat. Technol. 2006. Vol. 201. P. 1436—1443.
8. Hazar H., Ozturk U. The effects of Al_2O_3 — TiO_2 coating in a diesel engine on performance and emission of corn oil methyl ester // Renewable Energy. 2010. Vol. 35. P. 2211—2216.
9. Yilmaz S. An evaluation of plasma-sprayed coatings based on Al_2O_3 and Al_2O_3 —13% TiO_2 with bond coat on pure titanium substrate // Ceram. Inter. 2009. Vol. 35. P. 2017—2022.
10. Mishra N.K., Mishra S.B., Kumar R. Oxidation resistance of low-velocity oxy fuel-sprayed Al_2O_3 — TiO_2 coating on nickel-based superalloys at 800 °С // Surf. Coat. Technol. 2014. Vol. 260. P. 23—27.
11. Kenya Hamano, Chii-Shyang Hwang, Zenbe-e Nakagawa, Yutaka Ohya. Effect of TiO_2 on sintering of alumina ceramic // J. Ceram. Soc. Jap. 1986. Vol. 94. P. 505—511.
12. Kang J.J., Xu B.S., Wang H.D. Influence of spraying parameters on the microstructure and properties of plasma-sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3/40\%\text{TiO}_2$ coating // Phys. Proc. 2013. Vol. 50. P. 169—176.
13. Wank A., Reisel G., Wielage B. Diffusion barrier coatings for graphite, C/C and C/SiC racks in vacuum heat treatment or high temperature brazing processes // ITSC. 2005. Vol. 4. P. 135—138.
14. Barrios de Arenas I. Reactive sintering of aluminum titanate, sintering of ceramics — new emerging techniques / Ed. A. Lakshmanan. InTech, 2012. P. 501—526.
15. Standard ASTM E2109. Standard test methods for determining area percentage porosity in thermal sprayed coatings.

16. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *J. Mater. Res.* 1992. Vol. 7. No. 6. P. 1564—1583.
17. Блинков И.В., Волхонский А.О., Белов Д.С., Блинков В.И., Шаталов Р.Л., Андреев В.А. Свойства наноструктурных керамико-металлических покрытий TiN—Ni, полученных ионно-плазменным вакуумно-дуговым методом // *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2014. No. 4. С. 51—58.

References

1. Baldaev L.H., Borisov V.N., Vahalin V.A., Gannochenko G.I., Zatoka A.E., Ivanov A.V., Kudinov V.V., Yaroslavcev V.M. *Gazotermicheskoe napylenye: Uchebnoe posobie [Thermal spraying: the manual]*. Moscow: MarketDS, 2007.
2. Utenkov V.M., Zaycev A.N. *Issledovanie tribotekhnicheskikh harakteristik perspektivnyh iznosostoikih plazmennyyh pokrytyi pri trenii skolzhenia bez smazki [The study of tribotechnical characteristics of advanced wear-resistant plasma coatings on friction sliding without lubrication]*. *Novye materialy i tehnologii.* 2013. No. 11. P. 81—89.
3. Dorfman M. Thermal spray materials. *Adv. Mater. Proces.* 2002. Vol. 160. P. 49—51.
4. Kudinov V.V. *Plazmennyye pokrytya [Plasma coating]*. Moscow: Nauka, 1977.
5. Kasparova M., Houdkova S., Cubrova J. Thermally sprayed coatings for high temperature application // *Proc. 21-st Int. Conf. on Metallurgy and Material (Brno, Czech Republic, 23—25. 05. 2012)*. P. 144—146.
6. Vargas F., Ageorges H., Fournier P. Mechanical and tribological performance of Al₂O₃—TiO₂ coatings elaborated by flame and plasma spraying. *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 205. P. 1132—1136.
7. Habib K.A., Saura J.J., Ferrer C. Comparison of flame sprayed Al₂O₃/TiO₂ coatings: Their microstructure mechanical properties and tribology behavior. *Surf. Coat. Technol.* 2006. Vol. 201. P. 1436—1443.
8. Hazar H., Ozturk U. The effects of Al₂O₃—TiO₂ coating in a diesel engine on performance and emission of corn oil methyl ester. *Renewable Energy.* 2010. Vol. 35. P. 2211—2216.
9. Yilmaz S. An evaluation of plasma-sprayed coatings based on Al₂O₃ and Al₂O₃—13%TiO₂ with bond coat on pure titanium substrate. *Ceram. Inter.* 2009. Vol. 35. P. 2017—2022.
10. Mishra N.K., Mishra S.B., Kumar R. Oxidation resistance of low-velocity oxy fuel-sprayed Al₂O₃—TiO₂ coating on nickel-based superalloys at 800 °C. *Surf. Coat. Technol.* 2014. Vol. 260. P. 23—27.
11. Kenya Hamano, Chii-Shyang Hwang, Zenbe-e Nakagawa, Yutaka Ohya. Effect of TiO₂ on sintering of alumina ceramic. *J. Ceram. Soc. Jap.* 1986. Vol. 94. P. 505—511.
12. Kang J.J., Xu B.S., Wang H.D. Influence of spraying parameters on the microstructure and properties of plasma-sprayed Al₂O₃/40%TiO₂ coating. *Phys. Proc.* 2013. Vol. 50. P. 169—176.
13. Wank A., Reisel G., Wielage B. Diffusion barrier coatings for graphite, C/C and C/SiC racks in vacuum heat treatment or high temperature brazing processes. *ITSC.* 2005. Vol. 4. P. 135—138.
14. Barrios de Arenas I. Reactive sintering of aluminum titanate, sintering of ceramics — new emerging techniques. Ed. A. Lakshmanan. *InTech.* 2012. P. 501—526.
15. Standard ASTM E2109. Standard test methods for determining area percentage porosity in thermal sprayed coatings.
16. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.* 1992. Vol. 7. No. 6. P. 1564—1583.
17. Blinkov I.V., Volkhonskiy A.O., Belov D.S., Blinkov V.I., Schatalov R.L., Andreev V.A. Svoistva nanostrukturnykh keramiko-metallicheskih pokrytyi TiN—Ni, poluchennykh ionno-plazmennyyh vacuumno-dugovym metodom [Properties of nanostructured ceramic and metallic coatings of a TiN—Ni obtained by ion-plasma vacuum-arc method]. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgia.* 2014. No. 4. P. 51—58.