

Формирование и свойства наноструктурных защитных керамических покрытий из порошка Al_2O_3 на титане

**М. Г. Ковалева, М. С. Прозорова, М. Ю. Арсеенко,
Ю. Н. Тюрин, О. В. Колисниченко**

Изучено формирование наноструктурных защитных керамических покрытий из порошка Al_2O_3 кумулятивно-детонационным методом на поверхности сплава титана OT4sv. Приведены результаты исследований микроструктуры, элементного, фазового состава, твердости, износостойкости и стойкости к газоабразивному износу сплава OT4sv и покрытия Al_2O_3 . Установлено, что кумулятивно-детонационная технология обеспечивает формирование наноструктурных плотных, многофазных, твердых, износостойких керамических покрытий с высоким качеством границы между покрытием и подложкой. Показано, что использование кумулятивно-детонационной технологии для напыления покрытий из порошка Al_2O_3 на поверхности сплава титана OT4sv позволяет на порядок увеличить ее твердость, износостойкость при трении, сопротивление воздействию газоабразивного потока.

Ключевые слова: оксид алюминия, кумулятивно-детонационная технология, микротвердость, износостойкость покрытий, абразивное изнашивание.

The formation of nanostructured ceramic protective coatings from Al_2O_3 powder by using cumulative-detonation method on the surface of titanium alloy OT4sv were studied. The results of investigation of the microstructure, elemental, phase composition, hardness, wear resistance and resistance to gas-abrasive wear of the alloy OT4sv and coating Al_2O_3 were presented. It was found that the cumulative-detonation technology provides for the formation of nanostructured dense, multi-phase, hard, wear-resistant ceramic coatings with high quality boundary between the coating and the substrate. It was shown that the use of cumulative-detonation technology for the deposition of coatings of Al_2O_3 powder on the surface of titanium alloy OT4sv allows increasing an order its hardness and wear resistance of friction, resistance to gas-abrasive flow.

Keywords: aluminum oxide cumulative-detonation technology, microhardness, wear-resistant coatings, abrasive wear.

Введение

Титановые сплавы, отличающиеся сочетанием ряда ценных свойств, перспективны для применения во многих областях современной техники. Благодаря малой плотности, большой удельной прочности, необычайно высокой коррозионной стойкости во многих химически активных средах, значительной прочности при повышенных температурах титан имеет большие перспективы применения в ракетостроении и авиации, в химической промышленности, на предприятиях первичной металлургии, нефте- и

газодобывающей областях, изготовлении геофизических измерительных систем и исследовательских приборов [1 – 3]. Титановые сплавы в промышленном масштабе впервые были использованы в конструкциях авиационных реактивных двигателей, что позволило уменьшить их массу на 10 – 25%. В частности, из титановых сплавов изготавливают диски и лопатки компрессора, детали воздухо-заборника, направляющего аппарата и крепежные изделия [4]. Однако к недостаткам титана следует отнести: активное взаимодействие титана при высоких температурах, особенно в жидком состоянии, со

всеми газами атмосферы; невысокие антифрикционные свойства, обусловленные налипанием титана на многие материалы; высокую склонность титана и многих его сплавов к водородной хрупкости и солевой коррозии; а также низкую износостойкость и сопротивление воздействию газоабразивного потока [5, 6]. Например, при эксплуатации двигателей в наземных установках поверхность лопаток компрессора двигателя постоянно подвержена воздействию газоабразивного потока. В результате этого материал лопатки претерпевает эрозионный износ, возникают различные абразивные повреждения, вызванные присутствием в газе твердых частиц [4].

Значительный интерес для повышения ресурса и надежности изделий и деталей из сплавов титана представляют методы ионной имплантации, диффузионной металлизации, нанесения фторосодержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ), нанесения износ- и коррозионностойких вакуумных, газоплазменных, детонационных и др. покрытий [7–9].

Метод детонационного напыления — наиболее перспективный, как с точки зрения обеспечения износостойкости поверхности деталей, так и технико-экономических показателей их применения [10].

Поскольку детонационное нанесение покрытий — процесс импульсный, то, как правило, при формировании покрытий не происходит нагрева деталей свыше 250°C, поэтому, процесс исключает коробление детали, структурные и фазовые превращения ее материала, что не всегда обеспечивают другие методы [11].

В настоящее время значительный интерес вызывают защитные керамические детонационные покрытия на основе оксида алюминия, обладающие хорошими физико-механическими и химическими показателями (высокой твердостью, стойкостью к износу и воздействию агрессивной среды, низкой тепло- и электропроводностью и т.д.) [12, 13].

Керамические покрытия из порошка Al_2O_3 используют, как правило, для защиты деталей, работающих в тяжелых условиях. Они показывают высокую стойкость в агрессивных и окислительных средах, а также обеспечивают защиту деталей при работе в условиях высоких температур и газоабразивного износа. Кроме того, порошки на основе оксида алюминия имеют невысокую стоимость, что определяет экономическую эффективность их применения.

Цель настоящей работы — исследование возможности повышения твердости, износостойкости и стойкости к газоабразивному изнашиванию образцов из титанового сплава путем нанесения защитных наноструктурных керамических покрытий Al_2O_3 кумулятивно-детонационным методом.

Материалы и методика эксперимента

Для изготовления образцов в виде пластин размером $20 \times 15 \times 5$ мм был использован титановый деформируемый сплав ОТ4св, масс. %: Ti — основа, Al — 3,5–5%, Mn — 0,8%, Zr — до 0,3%. Исследование микроструктуры по поперечному микрошлифу исходного сплава титана ОТ4св и системы “покрытие — сплав титана” проводили металлографическим методом с применением оптического инвертированного микроскопа Olympus GX51. Для травления использовали реактив: плавиковая и азотная кислота в соотношении 20:1.

Для напыления оксидных покрытий было использовано двухкамерное кумулятивно-детонационное устройство, состоящее из цилиндрической (реализуется детонационный режим сгорания газовой смеси) и кольцевой (работает с использованием горючих смесей любой концентрации) камер, сопряженных со стволом, который служит для нагрева и ускорения дисперсных материалов — порошков [14]. Суммирование энергий продуктов сгорания газовых смесей двух камер приводит к кумулятивному эффекту и позволяет формировать высокоскоростной поток (до 1500 м/с в зависимости от режимов заполнения камер компонентами горючей смеси). Иницирование сгорания горючей смеси проводили с частотой 20 Гц, тем самым обеспечивая квазипрерывный режим работы устройства с постоянной подачей порошка в зону нагрева и ускорения [13]. Особенностью многокамерного газодинамического ускорителя [15] является то, что для разгона порошка используются продукты сгорания, которые образуются в камерах ускорителя и сходятся перед входом в сопло, где и взаимодействует с двухфазной газопорошковой струей. В качестве горючей смеси использовали: пропан (30%) + бутан (70%), кислород и воздух. Покрытия наносили послойно при возвратно-поступательном перемещении сопла детонационного устройства с поперечным смещением каждого перемещения на 4 мм и с трехкратным формированием слоя. Производительность процесса составила 550 г/ч. Максимальное значение скорости переднего фронта порошковой струи, оцененное на отрезке 20–50 мм от среза сопла с использованием двухканальной оптической системы измерения, составила — 1400 ± 150 м/с.

Покрытие наносили из порошка AMPERIT® 740.0 Al_2O_3 . Фракционный состав и распределение по размерам микрочастиц порошка титана определяли с помощью лазерного анализатора размеров частиц Analysette 22 NanoTec. Исследование микроструктуры, элементного состава порошка и покрытия Al_2O_3 проводили с помощью растрового электронно-

ионного микроскопа Quanta 200 3D (РЭМ), оснащенного детектором рентгеновского излучения системы PEGASUS 2000. Пористость покрытия определяли металлографическим методом с элементами качественного и количественного анализа геометрии пор с применением оптического инвертированного микроскопа Olympus GX51. Рентгеноструктурные исследования порошка и покрытия проводили с помощью дифрактометра Ultima IV Rigaku и просвечивающего микроскопа с полевой эмиссией Tescan G2 20F S-T (ПЭМ). Микротвердость по поперечному микрошлифу покрытия и подложки определяли с помощью автоматической системы анализа микротвердости DM-8 по методу микро-Виккерса при нагрузке на индентор 0,3 Н. Исследование трибологических характеристик покрытий проводили по стандартной схеме испытания “шарик – диск” на автоматизированной машине трения (Tribometer, CSM Instruments, Швейцария) с применением фактографического анализа бороздки износа покрытий и пятна износа на контроле (шарик из корунда диаметром 6 мм). Испытания износостойкости проведены на воздухе при нагрузке 6 Н, линейной скорости 15 см/с, с радиусом кривизны износа 5 мм, пути трения — 1200 м. Измерение глубины бороздок проводили в 4-х диаметрально и ортогонально противоположных областях образцов с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра Surtronic 25 и определяли среднее значение площади поперечного сечения и глубины бороздки износа. Количественную оценку износостойкости образцов и контроле проводили по фактору износа W [16], методика расчета которого приведена в [17]. Определение адгезионной прочности покрытий проводили на электромеханической машине Instron 5882 (USA) согласно стандарту ASTM C633. Метод испытания, описанный в стандарте, используется для опреде-

ления адгезионной или когезионной прочности газотермического покрытия, подвергающегося растяжению перпендикулярно поверхности.

Испытания износостойкости при газоабразивном воздействии в потоке твердых частиц проведены на установке для пневмоструйной обработки Euroblast (фирма Guyson, Англия) по ГОСТу 23.201-78. Метод газоабразивного изнашивания основан на одновременном воздействии на испытуемые образцы потока твердых частиц, создаваемого центробежным ускорителем при фиксированных режимах испытаний [4]. Испытания проводили сжатым воздухом, чтобы подать абразивный материал прямо на образцы. Давление воздуха составило 3 атм., диаметр сопла — 5 мм, частота вращения ротора — 6000 об./мин, расстояние от сопла до образца — 60 мм, угол атаки 90 град., количество используемого абразива — $5 \pm 0,2$ кг. В качестве абразивного материала использовали электрокорунд марки 25A M28 ГОСТ 3647-80 (размер частиц 20 – 28 мкм).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Покрытие наносили из порошка AMPERIT® 740.0 Al_2O_3 с основной фракцией 5,6 – 22,5 мкм (рис. 1а). Рентгеноструктурный анализ порошка AMPERIT® 740.0 Al_2O_3 (табл. 1, рис. 1б) показал, что порошок состоит из частиц оксида алюминия $\alpha-Al_2O_3$ с тригональной решеткой и $\gamma-Al_2O_3$ с кубической решеткой и содержанием примесей (оксида кремния, железа) порядка 3,83%.

Электронно-микроскопические исследования поперечного шлифа системы “покрытие – подложка” (рис. 2) показало, что покрытие из порошка Al_2O_3 представляет собой чередование характерно упакованных “чешуек” — деформированных дискретных частиц оксида. Пористость полученного Al_2O_3

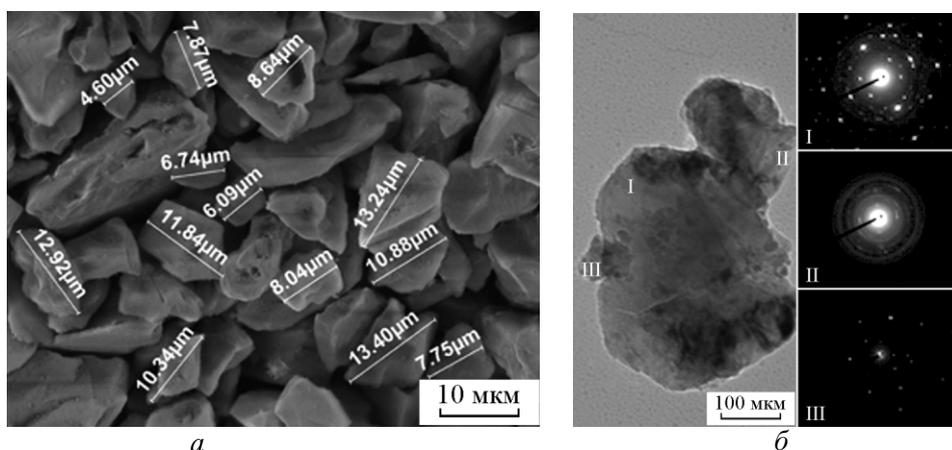


Рис. 1. Порошок Al_2O_3 : а – РЭМ: морфология, б – ПЭМ с дифракцией.

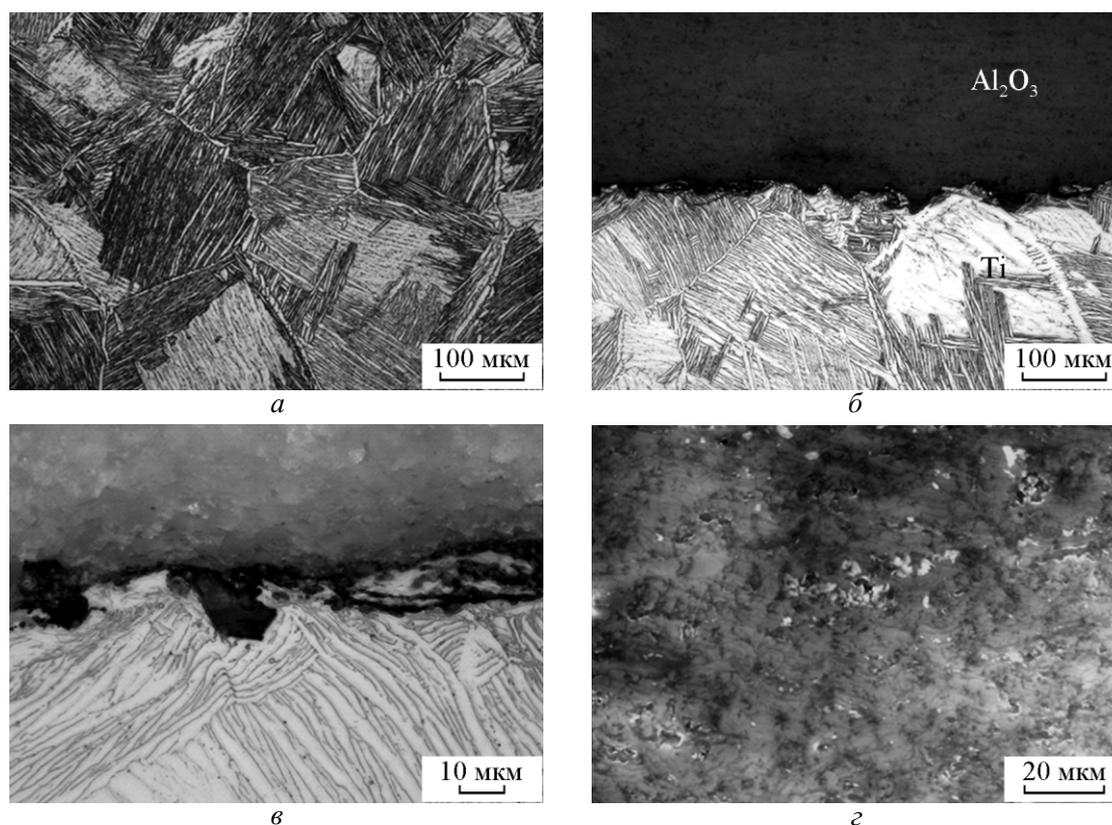


Рис. 2. Микроструктура: а – титанового деформируемого сплава ОТ4св в исходном состоянии, б – системы “покрытие – сплав ОТ4св”, в – граничной зоны “покрытие Al_2O_3 – сплав ОТ4св”, г – покрытия Al_2O_3 , нанесенного кумулятивно-детонационным методом на подложку из сплава ОТ4св.

Таблица 1
Фазовый состав порошка и покрытия Al_2O_3

Материал	Фазовый состав, масс.%				
	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$	Примеси SiO_2, Fe	Аморфная фаза
Порошок Al_2O_3	3,83	92,34	—	3,83	—
Покрытие Al_2O_3 (по- верхност- ный слой)	13,35	9,5	75,35	0,3	1,55

покрытия составила менее 0,5%. Покрытие формируются путем последовательной укладки множества деформированных частичек, имеющих разную температуру, скорость и массу (рис. 2г). Размер деформированных частичек составил ~0,5 – 3 мкм (рис. 2г).

Из-за присутствия в исходном порошке частиц размером до 30 мкм, в полученном слое керамики наблюдаются недеформированные раздробленные частички порошка и происходит выкрашивание крупных частиц при шлифовании образцов (рис. 2г). В результате проведенных исследований установлено, что видимая граница прилегания покрытия Al_2O_3 к

подложке не имеет дефектов, то есть участков с ослабленными связями, которые, по сути, являются микротрещинами, находящимися в одной плоскости и способными к распространению при наложении внешних нагрузок. В зоне контакта покрытия с подложкой обнаружена смешанная структура, состоящая из островков покрытия в титане весьма разнообразных форм и размеров (рис. 2в, 3а).

Согласно результатам элементного анализа, в слое покрытия (рис. 3а, точки 1, 2, 5) в основном содержатся алюминий и кислород, а их концентрация в разных точках изменяется незначительно (табл. 2). При взаимодействии углерода с титаном в покрытии образуются хрупкие фазы, что приводит к появлению трещин на границе и даже образованию сквозных пор. Присутствие углерода в объеме покрытия и граничной зоны “покрытие Al_2O_3 – сплав ОТ4св” не выявлено.

Алюминий стабильно присутствует во всем слое керамического покрытия, что и следовало ожидать, исходя из химического состава наносимого порошка. То же самое можно сказать и о кислороде. По толщине элементный состав покрытия неоднородный (табл. 2). Так, на границе между переходной зоной и основным покрытием (рис. 3а, область 3) содержится

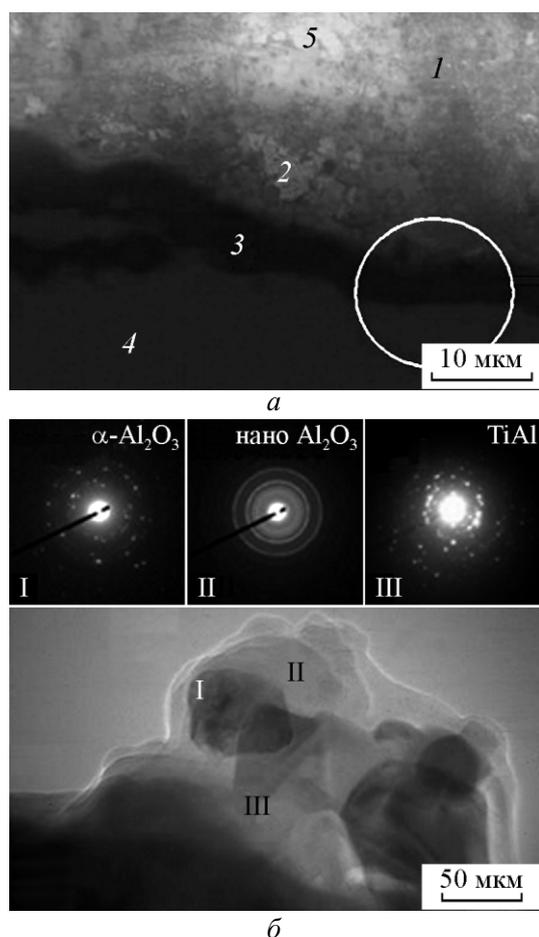


Рис. 3. Граничная зона “окрытие Al_2O_3 – сплав ОТ4св”: а – РЭМ, б – ПЭМ. 1 – покрытие; 2 – переходной слой от покрытия; 3 – переходной слой от подложки; 4 – подложка.

Таблица 2

Элементный состав системы
“покрытие Al_2O_3 – сплав ОТ4св” (рис. 3а)

Область анализа	Содержание элементов, масс. %/ат. %		
	O	Al	Ti
1	33,79/48,70	52,06/44,49	14,15/6,81
2	33,38/48,84	49,07/42,58	17,55/8,58
3	33,74/50,90	40,23/35,98	26,03/13,12
4	6,31/16,21	5,10/7,77	88,59/76,02
5	34,28/49,30	51,36/43,80	14,36/6,90

≈ 34 масс.% Al, ≈ 40 масс.% O. Наличие в этой области ≈ 26 масс.% Ti можно объяснить его массопереносом из подложки. При формировании керамики на подложке, происходит частичная деструкция оксида алюминия и перемешивание продуктов деструкции с материалом подложки. Высокая скорость нанесения дисперсных материалов обеспечивает их деформирование, механохимическую реакцию и образование достаточно толстого (5 мкм) переходного слоя,

который обеспечивает сопряжение керамического слоя с подложкой из титана. Переходной слой “покрытие/подложка” состоит из интерметаллических соединений TiAl (рис. 3б).

Присутствие на границе между покрытием и подложкой, металлического алюминия и интерметаллидов AlTi способствует релаксации напряжений, возникающих при напылении покрытий. Поэтому титан следует рассматривать как примесь, благоприятно влияющую на механические свойства покрытий. Адгезионная прочность покрытий составила 35 ± 8 МПа.

Проведенный рентгенофазовый анализ показывает, что основные составляющие покрытия — алюминий и кислород, их концентрация в разных точках изменяется незначительно. Фазовый состав покрытия (табл. 1) в основном представлен θ - Al_2O_3 и α - Al_2O_3 , в незначительном количестве присутствуют включения SiO_2 , γ - Al_2O_3 и аморфной фазы, состоящей из Al, O, Fe и Si.

Микротвердость поверхности покрытия составляет $1300 \pm 25 \text{ HV}_{0,3}$ (твердость ОТ4св — $200 \pm 10 \text{ HV}_{0,3}$), фактор износа керамического покрытия из порошка Al_2O_3 — $2,02 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2/(\text{Н} \cdot \text{м})$ (сплава ОТ4св — $6,97 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2/(\text{Н} \cdot \text{м})$). Улучшение трибологических свойств сплава ОТ4св после нанесения покрытия на порядок связано с дополнительным упрочнением поверхности и изменением механизма износа. Известно, что титановые сплавы отличаются неудовлетворительными трибологическими свойствами, а именно высокой склонностью к схватыванию при трении. При трибологических испытаниях в условиях сухого трения у титановых сплавов преобладает адгезионное изнашивание [18]. Наличие на поверхности керамического покрытия позволяет уменьшить влияние адгезионной составляющей. Нанесение керамического покрытия из порошка оксида алюминия на поверхности титанового сплава ОТ4св приводит к увеличению его стойкости к износу при трении. В результате проведенного анализа бороздок износа поверхности керамических покрытий из порошка оксида алюминия установлено, что поверхность трения представляет собой продольные контактные участки, ориентированные по направлению скольжения, которые не испытывают значительных повреждений и изменений.

После испытания износостойкости покрытия при газоабразивном воздействии в потоке твердых частиц определяли износ по изменению массы образца и сравнению полученной величины с износом исходного образца (сплав ОТ4св без покрытия). В табл. 3 представлены результаты взвешивания образцов, рассчитанные по формуле [4]:

Таблица 3

Результаты исследования газоабразивной стойкости образцов из сплава ОТ4св

Материал	Начальная масса, г	Масса образца после испытания, г	Величина износа $\Delta m/m_0$, %
Сплав ОТ4св	14,6517	14,5647	0,5938
Система "покрытие Al_2O_3 – сплав ОТ4св"	15,3351	15,2781	0,3717

$$\zeta = \frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100\%,$$

где Δm — изменение массы образца в результате испытания на износ; m_0 — начальная масса образца. За стойкость к газоабразивному изнашиванию принимали соотношение величины износа исследуемого образца к износу образца в исходном состоянии. За счет насыщения (шаржирования) поверхности сплава ОТ4св частицами абразивного материала (порошка электрокорунда 25А М28) масса образца увеличивается, в результате покрытие из порошка Al_2O_3 показывает низкое значение стойкости к газоабразивному изнашиванию. Стойкость к газоабразивному изнашиванию образца с защитным керамическим покрытием Al_2O_3 по сравнению с образцом без покрытия повысилась в 1,5 – 2 раза.

Нанесение защитных наноструктурных керамических покрытий Al_2O_3 не оказывает заметного влияния на изменение микроструктуры сплава ОТ4св (рис. 2б). Данный вывод открывает возможность разработки технологии нанесения защитных наноструктурных керамических покрытий Al_2O_3 кумулятивно-детонационным методом с целью обеспечения эксплуатационных свойств деталей из титанового сплава (например, деталей геофизических приборов и лопаток компрессора газотурбинного двигателя).

Заключение

1. Использование кумулятивно-детонационной технологии для напыления покрытий из порошка Al_2O_3 позволяет получать плотные, твердые, износостойкие, многофазные, керамические покрытия. Несмотря на высокую твердость, покрытие достаточно пластично и хорошо прилегает к подложке. Видимая граница прилегания покрытия Al_2O_3 к подложке не имеет дефектов, то есть участков с ослабленными связями. Переходной слой "покрытие/подложка" состоит из интерметаллических соединений TiAl.

2. Кумулятивно-детонационная технология импульсная, исключает нагрев изделия, не оказывает

заметного влияния на изменение его структуры и позволяет наносить точные (± 10 мкм) по толщине покрытия на локальные поверхности крупногабаритных изделий.

3. Фазовый состав покрытия в основном представлен $\theta-Al_2O_3$ и $\alpha-Al_2O_3$, в незначительном количестве присутствуют включения SiO_2 , $\gamma-Al_2O_3$ и аморфной фазы, состоящей из Al, O, Fe и Si.

4. Результаты исследования износостойкости покрытия при газоабразивном воздействии в потоке твердых частиц показывают значительное (более чем в 1,5 – 2 раза) повышение стойкости к износу образца с защитным керамическим покрытием Al_2O_3 по сравнению с образцом без покрытия.

5. Показано, что использование кумулятивно-детонационной технологии для напыления покрытий из порошка Al_2O_3 на поверхности сплава титана ОТ4св позволяет на порядок увеличить ее твердость, износостойкость при трении, сопротивление воздействию газоабразивного потока.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием НИУ БелГУ "Диагностика структуры и свойств наноматериалов". Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-31060 мол_а, Министерства образования и науки РФ в рамках госконтракта № 16.552.11.7087, гранта Президента Российской Федерации МК-215.2013.8.

Литература

1. Sobiecki J.R., Wierzchon T., Rudnicki J. The influence of glow discharge nitriding, oxynitriding and carbonitriding on surface modification of Ti – 1 Al – 1 Mn titanium alloy. Vacuum, 2001, v. 64, no. 1, p. 41 – 46.
2. Galliano F., Galvanetto E., Mischler S., Landolt D. Tribocorrosion behavior of plasma nitrided Ti – 6 Al – 4 V alloy in neutral NaCl solution. Surf. Coat. Technol., 2001, v. 145, no. 1 – 3, p. 121 – 131.
3. Shibata H., Tokaji K., Ogawa T., Hori C. The effect of gas nitriding on fatigue behaviour in titanium alloys. Int. J. Fatigue, 1994, v. 16, p. 370 – 376.
4. Дыбленко Ю.М., Селиванов К.С., Валиев Р.Р., Скрыбин И.В. Исследование газоабразивного износа образцов из титанового сплава ВТ6 с наноструктурированными защитными покрытиями. Вестник УГАТУ, 2011, т. 15, № 1 (41), с. 83 – 86.
5. Абковиц С., Бурке Дж., Хильц Р. Титан в промышленности. М.: ОБОРОНГИЗ, 1957, 146 с.
6. Zhecheva A., Sha W., Malinov S., Long A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. Surf. Coat. Technol., 2005, v. 200, p. 2192 – 2207.

7. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Федорова Е.А., Леванов Ю.К. Физико-механические и коррозионные свойства ионно-плазменных покрытий нитрида титана, полученных при разных парциальных давлениях реакционного газа. Физика и химия обработки материалов, 2006, № 4, с. 42 – 45.
8. Fu Y., Loh N.L., Batchelor A.W., Liu D., Zhu X., He J., Xu K. Improvement in fretting wear and fatigue resistance of Ti – 6 Al – 4 V by application of several surface treatments and coatings. Surf. Coat. Technol., 1998, v. 106, p. 193 – 197.
9. Yilbas B.S., Sahin A.Z., Al-Garni A.Z., Said SAM, Ahmed Z., Abdulaleem B.J., et al. Plasma nitriding of Ti–6 Al–4 V alloy to improve some tribological properties. Surface and Coatings Technology, 1996, v. 80, no. 3, p. 287 – 292.
10. Долматов А.И., Мовшович А.Я., Буденный М.М. Перспективы развития высоких технологий в машиностроении. Мир техники и технологий, 2002, № 3, с. 8 – 11.
11. Гавриленко Т.П., Николаев Ю.А., Прохоров Е.С. О механизмах образования покрытий при газотермическом напылении. Физика горения и взрыва, 1990, т. 26, № 3, с. 110 – 122.
12. Pogrebniak A.D., Il'jashenko M., Kul'ment'eva O.P., Kshnjakin V.S., Kobzev A.P., Tyurin Y.N., Kolisnichenko O. Structure and properties of Al_2O_3 and $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ coatings deposited to steel 3 (0.3 wt% C) substrate using pulsed detonation technology. Vacuum, 2001, v. 62, no. 1, p. 21 – 26.
13. Ковалева М.Г., Прозорова М.С., Арсеенко М.Ю., Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В. Структура и свойства порошкового покрытия из Al_2O_3 , полученного кумулятивно-детонационным методом. Деформация и разрушение материалов, 2012, № 12, с. 9 – 14.
14. Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Дуда И.М., Иванов О.Н., Ковалева М.Г., Марадудина О.Н., Трусова Я.В. Свойства покрытия из порошка титана на подложке из стали (0,3 % C), нанесенного кумулятивно-детонационным устройством. Упрочняющие технологии и покрытия, 2011, № 8, с. 38 – 43.
15. Василик Н.Я., Колисниченко О.В., Тюрин Ю.Н. Заявка на патент РФ рег. №2012129061 от 11.07.2012 “Способ газодинамического детонационного ускорения порошков и устройство для его осуществления”.
16. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008, 387 с.
17. Вершинин Д.С., Смолякова М.Ю., Манохин С.С., Дручинина О.А., Ахмадеев Ю.Х. Исследование трибологических свойств азотированного титанового сплава ВТ16 с использованием автоматизированной машины трения. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2010, т. 76, № 12, с. 45 – 49.
18. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазки, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАЛИТ, 2007, 368 с.

Статья поступила в редакцию 20.02.2013 г.

Ковалева Марина Геннадьевна — Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ “БелГУ”), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования научным оборудованием “Диагностика структуры и свойств наноматериалов”. Специалист в области программного упрочнения металлов и сплавов, керамических и композиционных материалов. E-mail: kovaleva@bsu.edu.ru.

Прозорова Майя Сергеевна — Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ “БелГУ”), научный сотрудник Центра коллективного пользования научным оборудованием “Диагностика структуры и свойств наноматериалов”. Специалист в области программного упрочнения металлов и сплавов, керамических и композиционных материалов. E-mail: Prozorova@bsu.edu.ru.

Арсеенко Мария Юрьевна — Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ “БелГУ”), студент. Специализируется в области программного упрочнения металлов и сплавов, керамических и композиционных материалов. E-mail: Arseenko@mail.ru.

Тюрин Юрий Николаевич — Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ (г. Киев, Украина), доктор технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области программного упрочнения металлов и сплавов, керамических и композиционных материалов. E-mail: ytyurin@i.com.ua

Колисниченко Олег Викторович — Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ (г. Киев, Украина), кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области программного упрочнения металлов и сплавов, керамических и композиционных материалов. E-mail: okolis@i.ua.