

Заключение. Исследованы структурно-фазовое состояние и свойства покрытий, сформированных на стали холодным газодинамическим напылением порошков алюминия и последующим микродуговым оксидированием нанесенного подслоя. Показано, что полученные методом ХГДН покрытия обладают высоким уровнем адгезии, вязкости и твердости, что обеспечивается однородностью и низкой пористостью структуры алюминиевой основы и равномерностью распределения в ней частиц корунда, усвоенных из напыляемого порошка.

Установлено, что созданное методом МДО алюминиевого подслоя, изготовленного ХГДН на поверхности стальных образцов, керамическое α - Al_2O_3 покрытие толщиной до 180 мкм характеризуется однородной структурой основного слоя. Преимущественное содержание в этом слое высокопрочной фазы α - Al_2O_3 обеспечивает высокий (до 19 ГПа) уровень микротвердости и прочности адгезии, низкую пористость.

Достигнутые результаты позволяют утверждать, что созданные МДО Al_2O_3 покрытия на стали способны выдержать интенсивное нагружение в процессе трения.

Представленные результаты получены в рамках НИР, финансируемой Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований в соответствии с договором Т17 КИГ-01 от 22.05.17.

Список использованных источников

1. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь, В.И. Жорник, А.Ф. Ильюшенко, В.Т. Сенють, А.И. Комаров и др. – Минск: Беларуская навука. – 2013, 380 с.
2. Витязь П.А. Создание износостойких упрочняющих покрытий микродуговым оксидированием непосредственной и последующей модификацией углеродными наноматериалами / П.А. Витязь, А.И. Комаров, В.И. Комарова // Перспективные технологии: монография / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – гл. 6, с.114–148.
3. Витязь П.А. Особенности формирования износостойких слоев на поверхности модифицированного фуллеренами МДО-покрытия при трении / П.А. Витязь, А.И. Комаров, В.И. Комарова, Т.А. Кузнецова // Трение и износ. – 2011, т. 32, № 4, с. 313 – 325.
4. Кулаков К.В. Технология восстановления деталей из алюминиевых сплавов газодинамическим напылением с упрочнением микродуговым оксидированием: дис. ... кан. техн. наук / К.В. Кулаков. – Орел, 2006. – 142 л.
5. Рябов В.Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминовых соединений/В.Р. Рябов. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
6. Витязь П.А. Теория и практика нанесения покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильюшенко, А.И. Шевцов, Е.Д. Манойло – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
7. Косарев В.Ф. Физические основы холодного газодинамического напыления: дис. ... доктора физ.-мат. наук / В.Ф. Косарев. – Новосибирск, 2003. – 292 л.
8. Тушинский Л.И., Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Плохов А.В., Мочалина Н.С. Структура и свойства алюминиевых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления/ Л.И. Тушинский, А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.В. Плохов, Н.С. Мочалина // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, №1. – С. 141 – 145.

УДК 621

Триботехнические свойства α - Al_2O_3 покрытий на стали, сформированных микродуговым оксидированием (МДО) Al подслоев

Горанский Г.Г.¹, Комаров А.И.², Ваганов В.В.¹

¹Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Введение. Значительная номенклатура стальных деталей, работающих в условиях износа, высоких температур и химически активных сред (например, изделия вентильной группы, детали насосов и компрессоров, детали оборудования химической и пищевой промышленности), нуждается в увеличении ресурса работы. Это может достигаться МДО предварительно нанесенных на стальные поверхности алюминиевых покрытий. При реа-

лизации данной технологии на рабочей поверхности стальной детали в итоге формируется высокоплотное, твердое покрытие $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с хорошей адгезией [1]. Уровень свойств сформированного МДО покрытия в значительной степени зависит от строения и свойств алюминиевого подслоя, который целесообразно наносить методом холодного газодинамического напыления (ХГДН) [1].

Цель данной работы – определить уровень триботехнических характеристик $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытий на стали, сформированных МДО Al подслоев, нанесенных методом ХГДН.

Методика. Нанесение Al подслоев на стальные образцы осуществлялось ХГДН с последующим МДО до получения $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытий по методике работы [1]. Строение и уровень свойств созданных $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытий на стальной основе также соответствовали описанным в работе [1].

Триботехнические испытания покрытий проводились в режиме трения без смазочного материала на автоматизированном трибометре АТВП (рисунок 1), работающем по схеме возвратно-поступательного перемещения призматического образца (размеры рабочей части образца 8×5 мм) по призматическому контртелу ($90\times 30\times 3$ мм). Образцы вырезали из стальных пластин с нанесенными на них МДО $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытиями.

Перед проведением испытаний с поверхности покрытий удалялся наружный технологический слой. Удаление наружного слоя осуществлялось при помощи водостойкой наждачной бумаги типа Р-400. В результате шероховатость поверхности покрытия составила $Ra = 1,66\text{-}0,09$ мкм. Толщина покрытий измерялась с помощью широкодиапазонного магнитного толщиномера МТЦ-3 (каждый результат - среднее 5 измерений).

В качестве контртела использовалась пластина, изготовленная из закаленной углеродистой стали У8 с твердостью HV 800. Средняя скорость перемещения образца относительно контртела в процессе триботехнических испытаний составляла 0,1 м/с, длина шага – 60 мм. Номинальное контактное давление испытаний составляло 1,5 МПа. Испытания проводились на пути трения 3 000 м.

В качестве триботехнических характеристик, подлежащих оценке в процессе испытаний, были выбраны коэффициент трения и интенсивность износа.

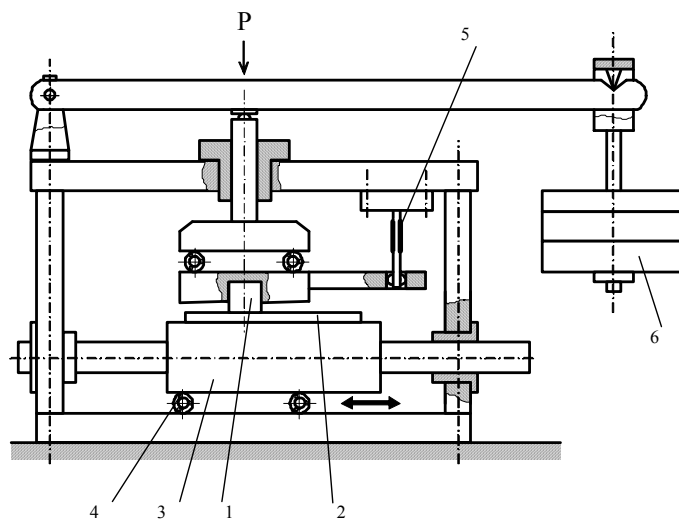


Рисунок 1 – Автоматизированный трибометр АТВП:

1 – образец, 2 – контртело, 3 – каретка, 4 – подшипники, 5 – тензобалка, 6 – система нагружения

Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжиривались спиртом и ацетоном и высушивались. Измерение величины износа покрытий осуществлялось по потере массы при испытаниях. С поверхности образцов перед взвешиванием тщательно удалялись продукты изнашивания, затем образцы промывались, протирались спиртом и просушивались в сушильном шкафу при температуре 50 С. После высушивания образцы взвешивались

вались на аналитических весах АДВ-200М. Взвешивание каждого образца производилось не менее 2 – 3 раз. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг.

Интенсивность износа (I) определялась по формуле

$$I = \Delta m / L,$$

где Δm – массовый износ, мг; L – путь трения, м.

Значение динамического коэффициента трения определялось с помощью тензометрического динамометра. Приведенные значения усреднены за 25–50 циклов.

Триботехнические испытания в режиме граничного трения сформированного керамического покрытия в условиях ограниченной подачи смазки (масло И-20А) выполнялось на универсальном трибометре MFT-5000 (Rtec instruments, США) при возвратно-поступательном перемещении относительно контртела из стали ШХ-15. Номинальное давление составляло 20 МПа, путь трения – 1600 м.

Результаты исследований. Характер изменения в процессе трения триботехнических характеристик полученных МДО Al_2O_3 покрытий приведен в таблице 1. Видно, что на стадии притирания (до 1500м) интенсивность износа достаточно велика (вплоть до $2,8 \cdot 10^{-3}$ мг/м), оставаясь меньшей для Al_2O_3 покрытий с большим временем МДО и, следовательно, с большей толщиной основного рабочего слоя. На этой стадии идет равномерное снижение коэффициента трения для Al_2O_3 покрытий независимо от времени МДО.

Завершение стадии притирания (путь трения $L > 1500$ м) сопровождается стабилизацией значений коэффициента трения на минимальном уровне 0,11 для всех покрытий независимо от времени МДО. Интенсивность износа продолжает снижаться и также стабилизируется при $L \geq 2500$ м, причем для покрытий с более длительным МДО она ниже ($I = 1,6 \cdot 10^{-3}$ мг/м), чем для покрытий с кратковременным МДО ($I = 1,9 \cdot 10^{-3}$ мг/м).

Таблица 1 – Изменение в процессе трения триботехнических характеристик полученных МДО Al_2O_3 покрытий

Путь трения, м		500	1000	1500	2000	2500	3000
Интенсивность износа, $\cdot 10^3$ мг/м	МДО 1 час	2,8	2,6	2,8	2,6	1,9	1,9
	МДО 1,5 час	2,8	2,4	2,1	1,7	1,6	1,6
$K_{тр}$	МДО 1 час	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11
	МДО 1,5 час	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11

Отмеченные выше особенности изменения триботехнических характеристик могут быть объяснены различной толщиной, фазовым составом и твердостью основного слоя покрытия, получаемого при разной длительности МДО.

В таблице 2 сопоставлены полученные в рамках данной работы (для пути трения $L = 3000$ м) триботехнические характеристики ряда износостойких материалов и Al_2O_3 покрытий, полученных МДО из газодинамических Al подслоев.

Таблица 2 – Триботехнические характеристики износостойких материалов и Al_2O_3 покрытий, полученных МДО из газодинамических Al подслоев

Материал	Al_2O_3 покрытие		Покрытие из ПГ-10Н-04	Чугун СЧ18-36	Твердый сплав ВК6	Контртело, сталь У8
	МДО 1 час	МДО 1,5 час				
Интенсивность износа, 10^3 мг/м	1,9	1,6	3,8	9,4	2,8	4,9
$K_{тр}$	0,11	0,11	0,86	0,82	0,96	-

Видно, что в условиях сухого трения по стали коэффициент трения полученных МДО Al_2O_3 покрытий существенно ниже (в 7-8 раз), чем для многих традиционных износостойких материалов. Интенсивность износа для разработанных покрытий также существенно меньше, чем для лучших известных аналогов (ниже, чем для покрытия из самофлюсующегося сплава ПГ-10Н-04, твердого сплава ВК6, закаленной и отпущенной стали У8, – соответственно в 2,2; 1,6 и 2,8 раза).

Триботехнические испытания в режиме граничного трения сформированного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытия в условиях ограниченной подачи смазки также подтвердили высокие характеристики керамического покрытия.

Так, коэффициент трения на стадии приработки составляет 0,060–0,065, а на стадии установившегося изнашивания снижается до значений 0,048–0,050 (рисунок 2). Износ керамических покрытий при указанных выше условиях испытаний не зарегистрирован.

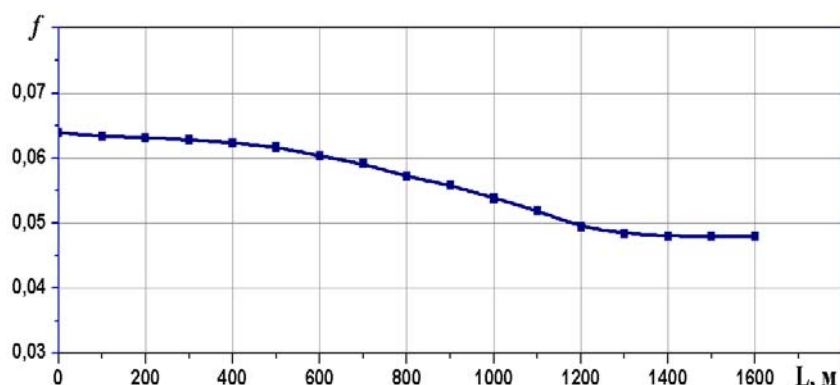


Рисунок 2 – Изменение коэффициента трения $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытия в зависимости от пути трения в условиях подачи смазки

Полученные результаты исследования МДО $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытий в плане их износостойкости и антифрикционных свойств свидетельствуют о высоком уровне достигнутых характеристик, превышающих аналогичные для известных износостойких материалов, и возможности их дальнейшего улучшения за счет коррекции параметров газодинамического напыления алюминиевых подслоев и параметров их микродугового оксидирования.

В рамках перспективных направлений дальнейших работ целесообразны комплексные исследования износостойкости разрабатываемых покрытий в условиях гидроабразивного износа при повышенных температурах в химически активных средах.

Заключение. На основании выполненных исследований доказано, что комплексное использование технологий холодного газодинамического напыления (для создания Al подслоев) и микродугового оксидирования (для обеспечения фазового перехода $\text{Al} \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) позволяет наносить с высокой степенью адгезии на поверхность стальных деталей оксидные покрытия значительной твердости и толщины, обладающие высокими износостойкостью и антифрикционными свойствами. Уровень механических и триботехнических свойств полученных $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытий на поверхности стальных изделий существенно превышает характеристики известных износостойких материалов.

Представленные результаты получены в рамках НИР, финансируемой Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований в соответствии с договором Т17 КИГ-01 от 22.05.17.

Список использованных источников

1. Горанский Г.Г., Комаров А.И., Ваганов В.В. Эволюция строения, состава и свойств алюминиевых покрытий при их микродуговом оксидировании (МДО) // Материалы Белорусско-китайского молодежного инновационного форума «Новые горизонты – 2018», Минск: БНТУ, 2018. – Т. 2. – С. 17-23.