

УДК 621.794.61:357.669

МИКРОПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.И. КОМАРОВ

(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск)

Показана эффективность микродугового оксидирования с использованием углеродных наноматериалов для восстановления и импортозамещения деталей технологического оборудования для производства полиэфирных нитей и стекловолокна.

Введение. Проблема повышения долговечности быстроизнашиваемых деталей, к числу которых относятся наконечники нитеводов, стойки накопителя нити, ролики, контактирующие с синтетическим и стеклянным волокном, продолжает оставаться достаточно актуальной. Подобные детали широко применяются в химическом и текстильном производстве и во многом определяют качество выпускаемой продукции.

В большинстве случаев оборудование для производства синтетического стекловолокна изготавливается за рубежом (Франция, Италия, Англия, США). В процессе эксплуатации ролики и нитеводы, являющиеся составной частью этого оборудования, подвергаются воздействию агрессивной среды, а также абразивному изнашиванию в условиях повышенных температур. В связи с этим подобные детали изготавливаются из материалов, способных длительно эксплуатироваться в таких условиях. Наряду с прессованной конструкционной керамикой, эмалью широко используются также различного рода покрытия, наносимые на алюминиевые сплавы. Однако состав таких покрытий и технология их получения составляют, как правило, «ноу-хау» фирм-производителей. По мере изнашивания нитеводов возникает необходимость в замене импортных комплектующих, стоимость которых достаточно высока. В связи с этим на предприятиях обычно изготавливают новые детали из инструментальных и конструкционных сталей с последующим упрочнением, однако износостойкость таких деталей сравнительно невысока.

К числу перспективных технологий, позволяющих решить вопросы достижения улучшенных триботехнических свойств (повышенная износостойкость при достаточно низких значениях коэффициента трения), а также высокого комплекса других физико-механических свойств на рабочих поверхностях быстроизнашиваемых деталей относится микродуговое оксидирование (МДО). Применение МДО для упрочнения нитеводов и роликов представляется целесообразным еще в связи с тем, что процесс микроплазменного оксидирования открывает широкие возможности как для замены импортных деталей вновь изготовленными из алюминиевых сплавов, так и их восстановления путем формирования на рабочих поверхностях оксидокерамических покрытий взамен исходных изношенных упрочненных слоев.

Цель настоящей работы состояла в обеспечении повышенной износостойкости наконечников нитеводов и роликов различного назначения из алюминиевых сплавов формированием на их рабочих (внутренних и наружных) поверхностях, модифицированных углеродными наноматериалами (УДАГ, УДА) оксидокерамических покрытий с высоким комплексом физико-механических свойств.

Методика эксперимента. Формирование оксидокерамики осуществляли в анодно-катодном режиме на образцах и деталях из сплава Д16Т. В качестве электролита использовали водный раствор гидроксида калия и натриевого жидкого стекла, содержащий добавки углеродных наноматериалов [1].

Структурное строение и состав оксидокерамики исследовали методами рентгеноструктурного, металлографического и спектрального анализов. Рентгеноструктурный анализ проводили на автоматизированном комплексе на базе дифрактометра ДРОН-3М в SiKa монохроматизированном излучении. Для обеспечения высокой чувствительности анализа использовали прецизионные условия рентгеновской съемки, в частности монохроматизацию дифрагированного рентгеновского пучка. Микроструктура оксидокерамики изучалась на металлографическом микроскопе МИМ-8 на поперечных микрошлифах образцов. С целью комплексного анализа оксидокерамики проводили также изучение ее элементного состава на сканирующем электронном микроскопе «Cam Scan» (Англия) с микрорентгеноспектральным анализатором AN 100 фирмы «Линк Аналитик» (Англия) по программе количественного анализа ZAF4-FLS. Распределение микротвердости по толщине покрытия изучали на приборе ПМТ-3, с помощью которого оценивали также толщину оксидокерамического покрытия. Для определения толщины использовали также токовихревой толщиномер ТМ-250.

Триботехнические испытания проводили на машине трения по схеме возвратно-поступательного движения контртела относительно неподвижного образца. Образцы испытывали в диапазоне удельных давлений 0,5...34 МПа, скорости скольжения 0,1 м/с. Износ образцов определяли весовым методом с использованием аналитических весов ВЛР-200 с последующим пересчетом в линейный износ.

Результаты исследований и их обсуждение. Обладая высоким сопротивлением абразивному и гидроабразивному изнашиванию [2], высокой химической и термической стойкостью, прочностью сцепления с основой, достигающей, как показали полученные данные, 370 МПа, оксидокерамические покрытия, сформированные на сплавах алюминия, представляют собой перспективный триботехнический материал. Одним из направлений достижения повышенных триботехнических свойств оксидокерамических покрытий является их модифицирование наноразмерными компонентами, в частности, ультрадисперсной алмазографитовой шихтой (УДАГ), нанотрубками, фуллеренами [3, 4].

На рис. 1 в качестве примера представлена микроструктура оксидокерамики, полученной на сплаве Д16 в базовом силикатно-щелочном электролите и растворе, содержащем добавки УДАГ. Из сопоставления приведенных микроструктур покрытия следует, что введение в электролит УДАГ оказывает существенное воздействие на формирование покрытия. Прежде всего это проявляется в росте его толщины примерно в 2 раза (с 50...60 мкм до 100... 120 мкм). Эффект заметного увеличения толщины покрытия при использовании в микроплазменных процессах наноразмерных углеродных компонентов обнаружен и для алюминиевых сплавов с другим химическим составом, например, силуминах [5], в том числе с повышенным содержанием кремния (АК10, АЛ-25, КС-740), которые в литературных источниках рассматриваются как трудные объекты с точки зрения получения на них оксидокерамики с высокими свойствами [6].

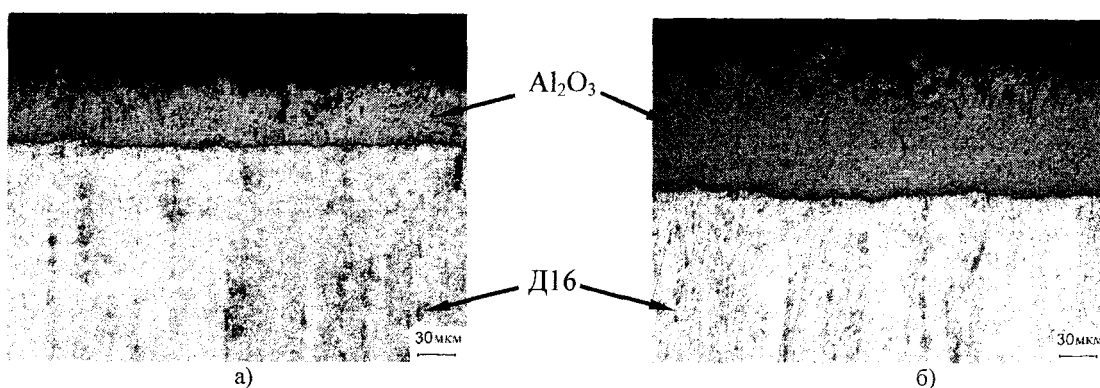


Рис. 1. Микроструктура оксидокерамического покрытия, сформированного на сплаве Д16 в электролитах без УДАГ (а) и с его добавкой (б)

Встраиваясь в покрытие, частицы УДАГ модифицируют его, оказывая при этом заметное влияние на формирование структуры. Как следует из полученных данных, микроплазменный процесс с участием углеродных наноразмерных компонентов приводит к более однородной дисперсной структуре оксидокерамики с меньшей пористостью, что может быть связано со следующим.

Учитывая размер, наличие заряда, особые физические и физико-химические свойства ультрадисперсных частиц алмаза и графита (нескомпенсированные связи на поверхности, делокализация электронной плотности, пониженная энергия активации [7]), можно ожидать, что углеродные нанокластеры под воздействием электрического поля втягиваются в каналы разрядов. Последнее приводит к резкому возрастанию проводимости таких участков и, как следствие, к сосредоточению в них микродуговых разрядов, что способствует значительному повышению мощности и температуры микродуги, приводящему к большому разогреву прилегающих к каналам областей покрытия и материала подложки. В результате этого интенсифицируются процессы термолитиза алуминатных анионов, усиливается протекание диффузионных и миграционных процессов переноса металла основы и легирующих элементов к разогретым областям покрытия, активизируются плазмохимические и термохимические превращения, продукты которых осаждаются в порах, образованных каналами разряда.

С другой стороны, благодаря высокой структурной активности, наночастицы алмаза и графита, находясь в канале микродугового разряда, интенсивно взаимодействуют с компонентами покрытия и встраиваются в структуру оксидокерамики, оказывая на нее диспергирующее воздействие. Предположение о наличии нанографита и наноалмазов в покрытии подтверждается результатами спектрального анализа, свидетельствующими о содержании (до 2 мас. %) углерода в покрытии. Располагаясь в покрытии, включения нанографита снижают напряжение пробоя оксидного слоя, что в свою очередь приводит к увеличению длительности микродуговых разрядов. Развитию пробоя способствует также ионизация пузырьков водорода, выделяющихся на контактирующих с электролитом включениях наночастиц графита. Водород, кроме того, способен частично адсорбироваться графитом и выделяться в результате десорбции при возникновении пробоя, повышая температуру плазмы микродуговых разрядов, а следовательно, интенсивность протекания плазмохимических и термохимических процессов.

Микроплазменный разряд сопровождается выбросом продуктов реакции в электролит с образованием пор в местах их расположения. При сравнительно невысокой мощности микродуговых разрядов прилегающий к каналу микродуги материал покрытия может не успеть прогреться до температуры плавления оксидов. В таких случаях формируется структура с повышенной пористостью (см. рис. 1, а). При наличии в электролите УДАГ, как уже отмечалось, протекание микродуговых разрядов сопровождается интенсивным разогревом покрытия, что приводит к оплавлению пор и уменьшению их размеров (см. рис. 1, б).

Подтверждением заключения о повышенной энергии микроплазменных процессов при использовании электролитов с УДАГ могут служить результаты рентгенофазового анализа (рис. 2). Как известно, для образования фазы α - Al_2O_3 , по сравнению с другими модификациями оксида алюминия, необходима наиболее высокая температура (1470 К), значительно превышающая температуру образования γ - Al_2O_3 (600...770 К). Полученные данные показывают, что образование α - Al_2O_3 в оксидокерамике, модифицированной углеродными наноразмерными компонентами, происходит достаточно интенсивно. Уже в поверхностных слоях ее содержание достигает 50 об. %, что в 1,2 раза превышает ее количество на поверхности немодифицированной оксидокерамики (см. рис. 2). Еще более интенсивный рост объемной доли фазы α - Al_2O_3 регистрируется в более глубоких слоях покрытия, полученного в процессе микроплазменной обработки сплава Д16Т с участием УДАГ.

Так, количественное содержание α - Al_2O_3 в слоях модифицированного покрытия, удаленных на расстоянии 60... 120 мкм от его поверхности, выходит на уровень максимальных значений, достигающих 85...90 об. %. В то же время максимальное содержание оксида α - Al_2O_3 в немодифицированном покрытии не превышает 65 об. % (см. рис. 2). Повышенные содержания фазы α - Al_2O_3 в модифицированном покрытии обуславливают высокий уровень его микротвердости, достигающий 24...25 ГПа и превышающий максимальные значения микротвердости немодифицированной оксидокерамики в 1,3 раза, составляющие 19...20 ГПа. Следует отметить, что протяженность слоев модифицированного покрытия с твердостью, близкой к максимальной, в отличие от немодифицированного, достаточно велика и составляет 80...100 мкм. Это определяет высокие прочностные свойства модифицированного углеродными наноматериалами оксидокерамического покрытия.

Участие УДАГ в процессах микроплазменного оксидирования оказывает заметное воздействие на триботехнические характеристики покрытия. Испытания немодифицированного покрытия при контактом давлении 3 МПа показали, что трение без смазочных материалов по стали сопровождается адгезионным взаимодействием трущихся материалов, о чем свидетельствует появление на их поверхностях полосчатого микрорельефа (рис. 3, а, б).

Участие УДАГ в процессах микроплазменного оксидирования оказывает заметное воздействие на триботехнические характеристики покрытия. Испытания немодифицированного покрытия при контактом давлении 3 МПа показали, что трение без смазочных материалов по стали сопровождается адгезионным взаимодействием трущихся материалов, о чем свидетельствует появление на их поверхностях полосчатого микрорельефа (рис. 3, а, б).

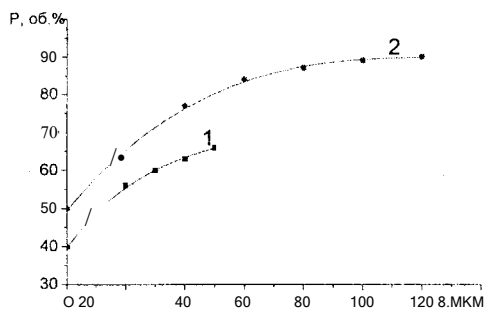


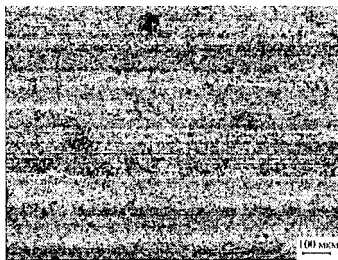
Рис. 2. Распределение α - Al_2O_3 от поверхности к основе в немодифицированном (1) и модифицированном (2) покрытии



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Микроструктура поверхностей пар трения керамика - сталь: а - немодифицированное покрытие; в - модифицированное покрытие; б, г - контртело

При этом интенсивность линейного изнашивания оксидокерамики на стадии установившегося износа $2,8 \cdot 10^{-9}$, коэффициент трения $0,70 \dots 0,75$. Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют об образовании на поверхностях трения окислов $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Продукты износа также представлены оксидами этого типа.

Модифицированное покрытие характеризуется более высоким сопротивлением изнашиванию по сравнению с немодифицированным. Износостойкость покрытия, содержащего углеродные наноматериалы, возрастает в $2,5 \dots 3$ раза ($I_n = 1,110^9$) при одновременном снижении коэффициента трения на $10 \dots 15 \%$, который становится равным $0,58 \dots 0,65$ (табл. 1), что связано с особенностями механизма изнашивания. Как показал анализ поверхностей трения, процесс износа не сопровождается выкрашиванием частиц покрытия. Напротив, наблюдается полирование и выглаживание трущихся поверхностей (см. рис. 3, в, г) частицами ультрадисперсного алмаза, присутствующими в покрытии. Кроме того, частицы наноалмаза, упрочняют покрытие и препятствуют развитию трещин, замедляя тем самым процесс его разрушения. Повышению триботехнических свойств покрытия способствуют также находящиеся в нем включения графита, являющегося твердосмазочным материалом.

Анализ полученных результатов показал, что в условиях граничного трения в широком интервале контактных давлений (до 34 МПа) модифицированное оксидокерамическое покрытие наряду с повышенной износостойкостью обладает также достаточными высокими антифрикционными свойствами (см. табл. 1).

Таблица 1

Триботехнические характеристики модифицированного покрытия

Материал контртела	Удельное давление, МПа	Путь трения, м	Режим трения	Интенсивность изнашивания $I_n, 10^{10}$	Коэффициент трения
Сталь	3	3000	без СМ	11	0,58...0,65
Керамика	3	3000	без СМ	3,5	0,28...0,30
Фритекс-125	2	4800	без СМ	износ не обнаружен	0,42... 0,44
Сталь	34	4800	граничное	износ не обнаружен	0,05...0,07
Чугун	4	4800	граничное	3,3	0,06... 0,08
Сплав КС-740	4	4800	граничное	износ не обнаружен	0,03...0,05
Керамика	34	4800	граничное	износ не обнаружен	0,02...0,03

Оценка эффективности модифицированной оксидокерамики проводилась для нитеводов, контактирующих с полиэфирной нитью, и роликов, взаимодействующих со стекловолкном. При этом оксидо-керамика использовалась как для восстановления импортных деталей из алюминиевых сплавов, так и для упрочнения вновь изготовленных из сплавов Д16, Д16Т деталей, взамен стальных (рис. 4.)

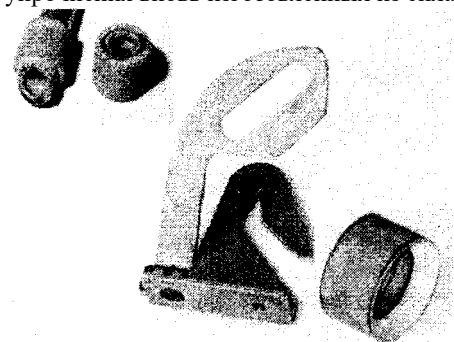


Рис. 4. Упрочненные оксидокерамикой детали технологического оборудования

предназначенных для производства искусственного меха (ОАО «БЕЛФА», г. Жлобин). Эти детали служат для пропуска полиэфирной нити, которая скользит по их внутренней поверхности со скоростью $0,5 \dots 0,7$ м/с, вызывая ее повышенный износ.

Проведенные исследования показали, что сформированное на этих деталях покрытие обладает оптимальным составом и структурой, обеспечивающими повышенные служебные свойства оксидокера-

Режимы микроплазменной обработки выбирались из соображений получения на внутренних (с диаметром отверстия 3 мм) и наружных поверхностях деталей оксидокерамических покрытий, состоящих в основном из фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, имеющей гексагональную решетку. Последнее обуславливает большую по сравнению с другими оксидами алюминия износостойкость этой фазы. Кроме того, оксид $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ обладает наибольшей плотностью ($3,9 \dots 4,02$ г/см³), высокой твердостью (до $24 \dots 25$ ГПа), а следовательно прочностью, более низкими коэффициентами трения.

Объектом микроплазменного оксидирования являлись наконечники и направляющие нитеводов, входящие в состав кругловязальных машин марки НР-18Smm фирмы «Майер» (США),

мики. Результаты промышленных испытаний наконечников из сплава Д16, упрочненных микроплазменной обработкой, подтвердили высокую износостойкость покрытия в условиях эксплуатации, что обеспечило повышение стойкости наконечников с оксидокерамикой более чем в 3,5 раза по сравнению с деталями из сталей, упрочненных различными методами (табл. 2).

Таблица 2

Продолжительность наработки упрочненных наконечников нитеводов

Материал деталей	Метод упрочнения	Продолжительность наработки, ч	Состояние упрочненной поверхности
Сталь ШХ15	Азотирование	1000	Прорезание нитью
Сталь 40	Хромирование	240	Прорезание нитью
Сталь 40	Наплавка, напыление нитридом титана	320	Прорезание нитью
Сталь 20ХН3А	Цементация	800	Прорезание нитью
Оксидокерамика на сплаве Д16	Микроплазменная обработка	3500	Без следов износа

Разработанные физические и технологические принципы формирования модифицированной наноразмерными компонентами оксидокерамики были также применены для упрочнения внутренних и наружных поверхностей роликов из сплавов типа АЛ 19, Д16 технологического оборудования для производства стекловолокна (ОАО «Полоцк-Стекловолокно»),

Как следует из полученных результатов, сформированное покрытие по своим характеристикам значительно превосходит покрытие фирм-изготовителей.

Так, микротвердость рабочего слоя модифицированной оксидокерамики составляет 11 ...14 ГПа, тогда как для импортного покрытия она не превышает 5 ГПа (рис. 5). Это покрытие значительно (примерно в 2 раза) уступает также оксидокерамике по толщине и составляет 50...60 мкм. Высокие эксплуатационные свойства роликов с оксидокерамикой подтверждаются успешными результатами их испытаний в производственных условиях в течение более трех лет.

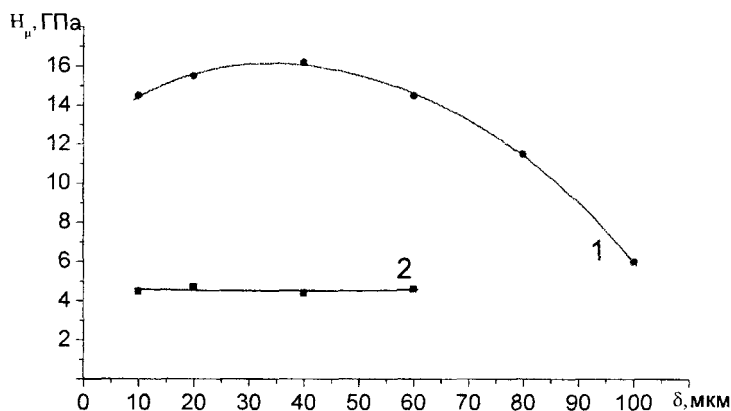


Рис. 5. Распределение микротвердости покрытия на поверхности роликов:

1 - после восстановления микроплазменной обработкой; 2 - покрытие фирмы-производителя

Таким образом, полученные результаты показывают, что формирование модифицированной оксидокерамики на рабочих поверхностях изделий является эффективным методом восстановления и импортозамещения деталей технологического оборудования.

Выводы

1. Использование углеродных наноразмерных компонентов (УДАГ, УДА) при микродуговом оксидировании изделий из сплавов типа Д16 оказывает значительное воздействие на характеристики оксидокерамического покрытия, что проявляется в формировании более дисперсной и менее пористой

структуры, повышении его толщины, микротвердости, износостойкости в 2; 1,3; 2,5..3 раза соответственно по сравнению с немодифицированным покрытием. Эти эффекты связаны с существенным повышением мощности микродуговых разрядов в присутствии частиц наноалмазов и нанографита и их включением в структуру покрытия.

2. На внутренних и наружных рабочих поверхностях деталей (нитеводов, роликов) технологического оборудования для производства полиэфирных нитей и стекловолокна, подвергающихся значительному износу, сформировано модифицированное оксидокерамическое покрытие, превосходящее по свойствам (микротвердость, толщина) примерно в 2 раза покрытие зарубежных фирм-изготовителей на аналогичных деталях. В результате промышленных испытаний в условиях эксплуатации деталей с модифицированным покрытием установлено, что их стойкость в 3...3,5 раза превышает ресурс изделий из сталей. Полученные результаты показали высокую эффективность использования метода микроплазменного оксидирования для восстановления и импортозамещения деталей технологического оборудования, в том числе работающих в условиях повышенных температур и нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заявка на изобретение 20020116 ВУ МПК С25 D 11/06. Электролит для микродугового оксидирования алюминия и его сплавов / П.А. Витязь, В.И. Жорник, А.И. Комаров, В.И. Комарова, А.П. Корженевский // Афіційны бюлетэнь. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры. - 2003. № 3. --
2. Повышение фрикционных характеристик МДО-покрытий вакуумно-плазменной обработкой / А.Л. Ерохин, А. Мэттьюз, С. Доуи, В.В. Любимов // Трение и износ. - 1998. - Т. 19, № 15. - С. 642 - 645.
3. Особенности формирования покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием из растворов, содержащих наноматериалы / П.А. Витязь, В.И. Жорник, А.И. Комаров, В.И. Комарова // Физикохимия ультрадисперсных (нано) систем: Материалы VI Всероссийской междунар. конф. - Томск, 2002.-С. 393 -394.
4. Влияние фуллеренов на триботехнические свойства МДО-покрытия / В.И. Комарова, А.И. Комаров, Э.М. Шпилевский, И.И. Васильев // Фуллерены и фуллереноподобные структуры в конденсированных средах: Сб. материалов III междунар. симпозиума. - Мн., 2004. - С. 123 - 125.
5. Комаров А.И. Особенности формирования покрытий на алюминиевых сплавах с гетерогенной структурой методом микродугового оксидирования // Материалы, технологии, инструменты. - 2003. - Т. 8, № 1. - С. 97-101.
6. Особенности микроструктуры упрочненных поверхностных слоев, получаемых микродуговым оксидированием / В.П. Алехин, В.А. Федоров, С.И. Бульчев, О.А. Тюрпенко // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 5. - С. 121 - 126.
7. Зубов В.И. Некоторые размерные эффекты и свойства ультрадисперсных систем // Журнал Всес. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. - 1991. -Т. 36, № 2. - С. 133-137.
8. Междунар. сб. науч. тр. Донецк: Дон ГТУ, 2002 - Вып. 21. - С. 3 - 7.