

## Синтез композиционных наноструктурированных керамополимерных функциональных покрытий для торцевых уплотнений

© Н.Н. Андрианова<sup>1</sup>, А.М. Борисов<sup>1</sup>, Р.В. Желтухин<sup>1</sup>,  
А.В. Косогоров<sup>2</sup>, Б.Л. Крит<sup>1</sup>, Н.В. Морозова<sup>4</sup>, И.А. Рыжиков<sup>3</sup>,  
Н.Л. Семенова<sup>1</sup>, И.В. Суминов<sup>1</sup>, А.В. Эпельфельд<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «МАТИ» — РГТУ им. К.Э. Циолковского, Москва, 121552, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>3</sup> Институт теоретической и прикладной электродинамики (ИТПЭ) РАН,  
Москва, 125412, Россия

<sup>4</sup> Российская медицинская академия последиplomного образования, Москва,  
123995, Россия

*Проведено микродуговое оксидирование (МДО) алюминиевого сплава АМгЗ с последующим наполнением полимером на основе полипараксилилена путем газофазной депозитной полимеризации. Установлено, что образование полимерного покрытия позволяет снизить остаточную сквозную пористость МДО-покрытий более чем в 5 раз. МДО в сочетании со способом газофазной депозитной полимеризации может служить основой разработки технологии поверхностного синтеза композиционных наноструктурированных керамополимерных покрытий для торцевых уплотнений механизмов из легких, недорогих и доступных металлов и сплавов.*

**Ключевые слова:** торцевые уплотнения, микродуговое оксидирование, керамополимерные покрытия.

**Введение.** Повышение долговечности и надежности машин и механизмов, технологического оборудования, инструмента с учетом экономических и экологических факторов непосредственно связано с триботехническими характеристиками сопрягаемых деталей (износостойкость, коэффициент трения, схватывание, заедание и т. п.). Решение этой актуальной и практически необходимой задачи возможно только на базе глубоких, научно обоснованных подходов, одним из которых следует считать инженерию поверхности [1]. Инженерия поверхности (*surface engineering*) — относительно новое направление в науке и технологии, включающее как традиционные, так и инновационные способы модифицирования поверхности изделий. Инженерия поверхности охватывает многие области современного материаловедения и базируется на научных и технологических процессах формирования поверхностных слоев с необходимыми свойствами непосредственно в материале (основе) и нанесения на него различными методами прочно связанных с ним слоев другого, как правило, композиционного материала со свойствами, отличающимися от

свойств основы. Интерес к поверхностному модифицированию также обусловлен тем, что в большинстве случаев именно характеристики поверхности в сочетании со свойствами материала основы определяют уровень свойств изделия в целом. Кроме того, модифицирование поверхности представляется более приемлемым с экономических позиций по сравнению со способами изменения объемных характеристик материалов и изделий [2].

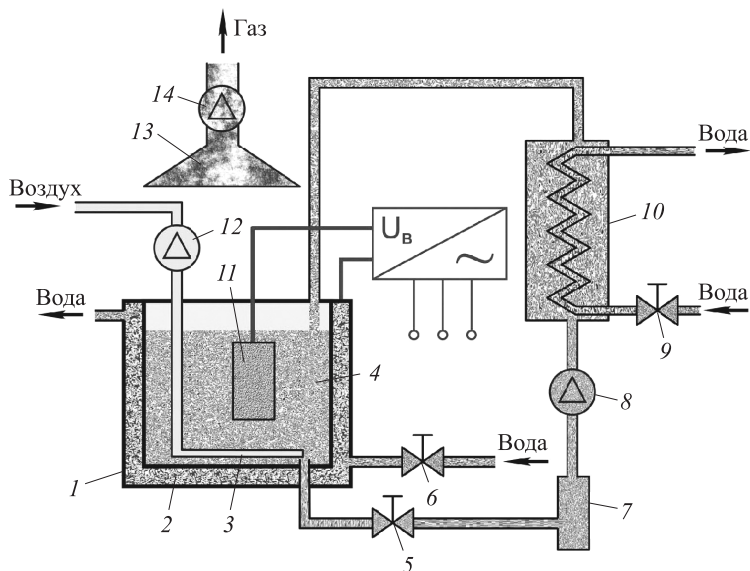
Разработка новых экологически чистых технологий модифицирования поверхности для создания многофункциональных поверхностных слоев и покрытий, защищающих и упрочняющих металлические изделия, является актуальной задачей современной науки и техники. Примером подобного подхода может служить инженерия сопрягаемых поверхностей при создании торцевых уплотнений. Торцевым уплотнением называется герметизирующее устройство контактного типа, применяемое в машинах и механизмах для разделения полостей высокого и низкого давлений. Обычно оно выполнено в виде пары трения торцевых поверхностей двух деталей, одна из которых закреплена на роторе, а вторая — в статоре (корпусе) устройства. К торцевым уплотнениям также относятся упорные подшипники скольжения с парой трения, для функционирования которых необходим подвод смазки в пространство между трущимися поверхностями. Отличие торцевых уплотнений от обычных упорных подшипников по характеру работы заключается в том, что трущаяся пара торцевых уплотнений должна работать в условиях перепадов давления, а в качестве смазки в подавляющем большинстве случаев используется уплотняемая среда. Торцевые уплотнения являются наиболее эффективными и долговечными уплотняющими устройствами вращающихся валов насосов и других машин и имеют существенные преимущества по качеству герметизации и сроку службы по сравнению с сальниковыми уплотнениями [3].

Во многих случаях повышение долговечности пар трения традиционно основано на создании различными методами поверхностных защитных оксидных слоев [4]. В последнее время в инженерии поверхности все шире применяются методы плазменного воздействия в электролитах — сравнительно нового вида электрохимической обработки поверхности преимущественно металлических материалов. В данной работе опыт использования одного из таких методов — микродугового оксидирования (МДО) — в сочетании со способом газофазной депозитной полимеризации (Vapor Deposition Polymerization или VDP-процесс) [5] положен в основу разработки технологии поверхностного синтеза композиционных наноструктурированных керамополимерных покрытий для торцевых уплотнений высокоточных, долговечных, маломоментных быстровращающихся механизмов.

Модифицирование поверхности с применением микроразрядов на обрабатываемой поверхности позволяет синтезировать на поверхности металлов вентильной группы (Al, Mg, Ti, Zr, Nb, Ta и некоторые другие, при анодном окислении которых на поверхности образуются оксидные пленки с униполярной проводимостью в системе металл—оксид—электролит) наноструктурированные оксидные композитные слои, которые по многим показателям превосходят покрытия, сформированные другими методами. Сочетание ряда функциональных свойств (высокая твердость, износо- и коррозионностойкость, электроизоляционные свойства) делает возможным использование модифицированных изделий во многих областях промышленности. Однако необходимо отметить, что для данного вида обработки характерно наличие остаточной сквозной пористости, которая необходима для обеспечения процесса МДО как составная часть реализации его физико-химических механизмов. Следовательно, при разработке и применении такого технологического процесса важно учитывать наличие остаточной пористости (особенно сквозной) синтезируемых МДО-слоев. В том случае, когда не ставится задача целенаправленного формирования на поверхности пористой структуры, пористость следует рассматривать как недостаток, существенно снижающий характеристики материалов и изделий и не позволяющий в полной мере достичь результатов модифицирования [6]. Для регулирования остаточной пористости (вплоть до полного устранения), а также придания поверхности окончательных потребительских свойств применяют различные виды дополнительной обработки, в частности пропитку органическими, неорганическими жидкостями и расплавами металлов; наполнение различными веществами (химическими элементами и соединениями, полимерами); оплавление; механическую обработку и т. п., повышающие свойства и существенно расширяющие области применения оксидированных деталей.

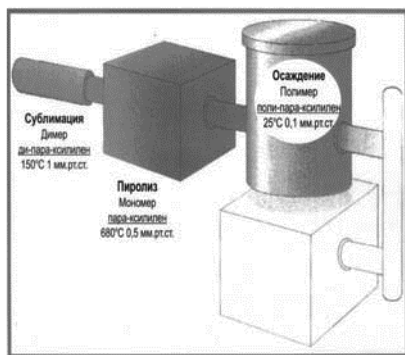
**Результаты экспериментов.** Синтез поверхностных наноструктурированных оксидокерамических МДО-слоев проводили на установке МДО-100 МАТИ им. К.Э. Циолковского, принципиальная схема которой приведена на рис. 1. Для исследований использовали цилиндрические образцы из алюминиевого сплава АМг3 диаметром 20 мм, высотой 6 мм, модифицированные в силикатно-щелочном электролите при анодно-катодном режиме в течение 1...300 мин при соотношении катодного и анодного токов  $I_k / I_a = 0,9...1,1$  и общей плотности тока 10 А/дм<sup>2</sup>.

Наполнение полимерным материалом на основе полипараксилилена проводили на технологической установке для газофазной депозитной полимеризации Института теоретической и прикладной электродинамики РАН (рис. 2). Полипараксилилены — ароматические полимеры, которые формируются в виде тонкопленочных высокоадгезионных покрытий (толщиной от 10 нм до 100 мкм) на поверх-



**Рис. 1.** Функциональная схема установки МДО-100:

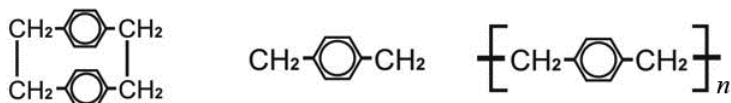
1 — электролитная ванна; 2 — рубашка водяного охлаждения; 3 — барьер; 4 — электролит; 5, 6, 9 — запорная арматура; 7 — фильтр; 8 — водяной насос; 10 — бак с теплообменником; 11 — деталь; 12 — воздушный компрессор; 13 — вытяжной зонг; 14 — вытяжной вентилятор



**Рис. 2.** Схема установки для наполнения МДО-слоев поли-*n*-ксиленом

ности субстратов различной природы. Основой газофазной депозитной полимеризации является генерирование при вакуумном пиролизе цикло-ди-параксилилена (2,2-парациклофана) высокорекционно-способных частиц — интермедиатов (параксилиленов), адсорбция которых на твердых поверхностях сопровождается их самопроизвольной полимеризацией с образованием полимерного покрытия полипараксилилена

ности субстратов различной природы. Основой газофазной депозитной полимеризации является генерирование при вакуумном пиролизе цикло-ди-параксилилена (2,2-парациклофана) высокорекционно-способных частиц — интермедиатов (параксилиленов), адсорбция которых на твердых поверхностях сопровождается их самопроизвольной полимеризацией с образованием полимерного покрытия полипараксилилена



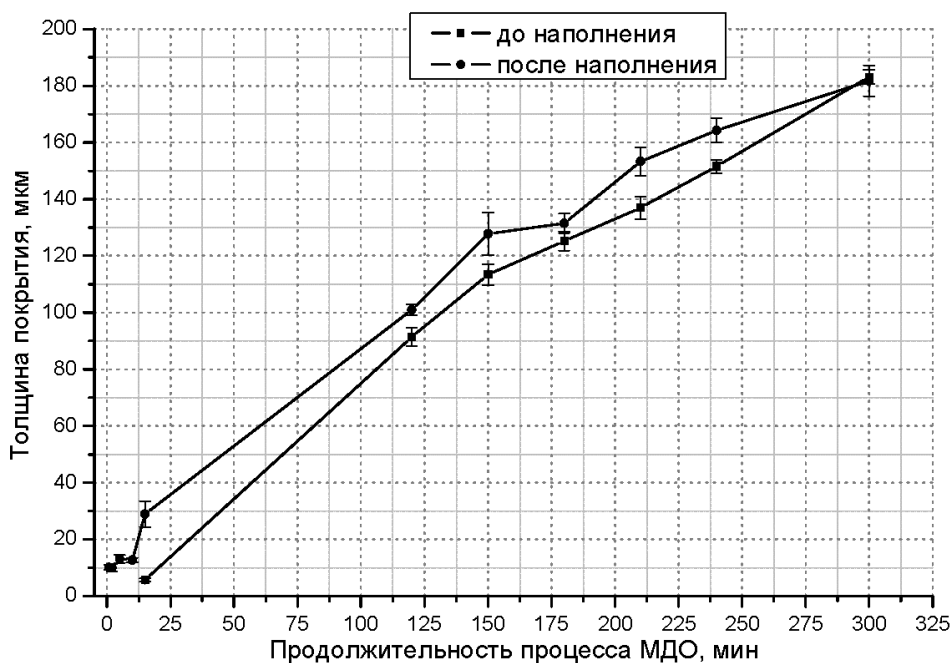
Пленка формируется одновременно по всей поверхности субстрата независимо от его профиля и образует на ней однородный по толщине слой. Полимерное покрытие имеет одинаково хорошее ка-

чество в щелях, порах, трещинах, а также вблизи острых краев и кромок, в отверстиях и других труднодоступных местах.

Наполнение осуществляется по следующему алгоритму: создание вакуума в замкнутой системе сублиматор — пиролизатор — камера осаждения; возгонка димера (ди-*n*-ксилилена или его замещенных) при температуре 100...150 °С; пиролиз паров димера при температуре 650...680 °С; осаждение (адсорбция) реакционного мономера *n*-ксилилена на подложках (изделиях) с последующей полимеризацией и кристаллизацией покрытия.

Толщину модифицированного слоя измеряли с помощью вихре-токового толщиномера ВТ-201, который предназначен для быстрого, точного и неразрушающего контроля толщины неметаллических покрытий, нанесенных на металлическое немагнитное основание (алюминий, медь, титан). Для определения пористости оксидных композитных слоев использовали методику, разработанную на кафедре ТОМПВЭ МАТИ и подробно описанную в работе [4].

Полученные результаты приведены в графическом виде на рис. 3 и 4. Как видно на рис. 3, толщина МДО-слоев после их наполнения полимером увеличилась в среднем на 15 мкм. На рис. 4 представлены графические зависимости изменения сквозной пористости поверхностного слоя от его толщины. Из приведенных графиков видно, что пористость «ненаполненных» образцов незначительно растет с уве-



**Рис. 3.** Зависимость толщины керамоподобного покрытия от продолжительности процесса МДО

личением толщины модифицированного слоя. Наполнение поли-*n*-ксилиленом существенно снижает сквозную пористость получаемого материала: наиболее значительное уменьшение пористости (примерно до 0,7 %, т. е. в 7...8 раз) наблюдали для максимальной в данной серии экспериментов толщины модифицированного слоя. Поскольку толщина модифицированного слоя, с одной стороны, зависит от технологического фактора обработки — времени МДО, а с другой стороны, является контролируемым и традиционным параметром оценки результата модифицирования, она выбрана в качестве аргумента при построении зависимостей. По оси абсцисс отложены средние значения толщин оксидных композитных слоев, синтезированных при МДО. Погрешность измерения толщины составила  $\pm 1,5$  мкм, а соответствующие им значения пористости  $\pm 0,1$  %.

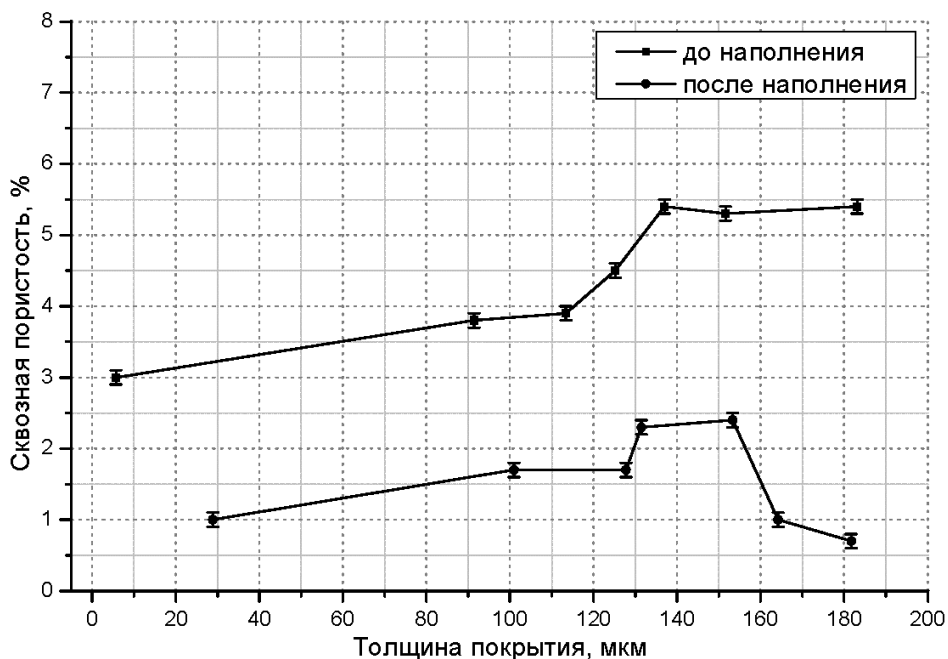


Рис. 4. Зависимость пористости от толщины керамикоподобного покрытия

**Заключение.** Проведено микродуговое оксидирование алюминиевого сплава АМг3 с последующим наполнением полимером на основе поли-параксилилена путем газофазной депозитной полимеризации. Установлено, что образование полимерного покрытия позволяет снизить остаточную сквозную пористость МДО-покрытий более чем в 5 раз.

Микродуговое оксидирования в сочетании с газофазной депозитной полимеризацией может служить основой разработки технологии поверхностного синтеза композиционных наноструктурированных

керамополимерных покрытий для торцевых уплотнений высокоточных, долговечных, маломоментных быстровращающихся механизмов из легких, недорогих и доступных металлов и сплавов.

*Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», ГК № 14.513.11.0034.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Суслов А.Г. *Инженерия поверхности деталей*. Москва, Машиностроение, 2008, 320 с.
- [2] Крит Б.Л. Ионно-лучевая модификация материалов. *Очерки по физико-химии и материаловедению*. Москва, Интернет инжиниринг, 1998, с. 278–290.
- [3] Мельник В.А. *Торцовые уплотнения валов: справочник*. Москва, Машиностроение, 2008, 320 с.
- [4] Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. *Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование)*. Москва, ЭКОМЕТ, 2005, 368 с.
- [5] Белова Е.А., Гусев А.В., Крит Б.Л., Маилян К.А., Рыжиков И.А., Сорокин В.А. Повышение свойств МДО-слоев методом VDP. *Физика и химия обработки материалов*, 2009, № 6, с. 49–54.
- [6] Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. *Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов*. Москва, Техносфера, 2011, т. 2, 512 с.

Статья поступила в редакцию 05.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Желтухин Р.В., Косогоров А.В., Крит Б.Л., Морозова Н.А., Рыжиков И.А., Семенова Н.Л., Эпельфельд А.В. Синтез композиционных наноструктурированных керамополимерных функциональных покрытий для торцевых уплотнений. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/905.html>

**Андрианова Наталья Николаевна** родилась в 1982 г., окончила МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского в 2005 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского». e-mail: andrianova\_nn@mail.ru

**Борисов Анатолий Михайлович** родился в 1952 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1976 г. Д-р. физ.-мат. наук, профессор ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского». e-mail: anatoly\_borisov@mail.ru

**Желтухин Роман Владимирович** родился 1980 г., окончил МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского в 2003 г. Старший преподаватель ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского». e-mail: tompve-2005@yandex.ru

**Косогоров Александр Викторович** родился 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kosogoriv.a@eandex.ru

**Крит Борис Львович** родился 1957 г., окончил МИСиС в 1981 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского». e-mail: bkrit@mail.ru

**Морозова Наталья Владиславовна** — канд. пед. наук, доцент кафедры «Медицинская техника» Российской медицинской академии последиplomного образования. e-mail: innat.m@mail.ru

**Рыжиков Илья Анатольевич** — канд. техн. наук, заведующий лабораторией ИТПЭ РАН.

**Семенова Наталья Леонидовна** родилась 1962 г. Канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского».

**Суминов Игорь Вячеславович** — д-р техн. наук, проректор по научной работе ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского». e-mail: tompve-2005@yandex.ru

**Эпельфельд Андрей Валерьевич** родился 1959 г., окончил МИСиС в 1981 г. Д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВПО «МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского». e-mail: tompve-2005@yandex.ru