

Н. С. Почес, В. Н. Малышев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОВЫХ КЕРАМОПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация. Работа посвящена исследованию новых керамополимерных покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО), при трении в экологически безопасных смазочных материалах, в качестве которых использовали полиальфаолефин (ПАО), полиэтиленгликоль (ПЭГ) и диизотридецил адипат (ДИТА). Формирование покрытий производили в слабощелочном электролите с добавлением суспензии фторопласта при использовании циклического режима. Для улучшения прочности сцепления фторопласта с оксидной матрицей производили дополнительную термическую обработку. Полученные керамополимерные покрытия состоят из оксидной матрицы с внедренными в нее частицами фторопласта. Проведенные испытания показали, что новые керамополимерные покрытия имеют улучшенные триботехнические характеристики относительно традиционных МДО-покрытий при трении как по стали, так и по одноименной поверхности.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамополимерные покрытия, триботехнические характеристики, экологически безопасные смазочные материалы.

Для цитирования: Почес, Н. С. Исследование триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий в экологически безопасных смазочных материалах / Н. С. Почес, В. Н. Малышев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 196–203. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_196.

Введение

Современные экологические вызовы требуют комплексного подхода к разработке и производству машин и оборудования. Постоянное повышение нагрузок и скоростей в машинах и оборудовании является главным направлением развития техники и технологии. При этом существует запрос на снижение затрат энергии и ресурсов, вызванных потерями на трение и износ. Уменьшение габаритов конструкций неизбежно ведет к постоянному увеличению их удельной мощности. В связи с этим узлы трения работают в особо тяжелых условиях [1].

Большинству этих требований удовлетворяют керамические материалы. Однако ввиду сложности механической обработки и, как следствие, их повышенной стоимости применение конструкционной керамики в некоторых узлах трения нецелесообразно [2].

Альтернативой керамическим материалам является применение износостойких керамических покрытий. Одним из относительно новых и перспективных методов создания износостойких покрытий является микродуговое оксидирование (МДО), называемое также плазменно-электролитическим оксидированием (ПЭО). С помощью данного метода можно получать покрытия с широким набором свойств, включающих такие характеристики, как износо-, тепло-, коррозионностойкость, электроизоляция и др., что позволяет применять данную технологию в различных отраслях промышленности [3–5].

Структурно-фазовый состав слоев МДО-покрытий зависит от многих факторов: от параметров процесса (величин токов и напряжений, характера режимов проведения процесса), состава применяемого электролита. Модификация состава электролита входит в число наиболее перспективных и эффективных путей улучшения свойств покрытия. Одним из направлений исследования является добавление в электролит различных твердых частиц различной природы с целью внедрения и встраивания их в структуру покрытия или заполнения ими пор, что наделяет МДО-покрытия новыми функциональными возможностями [6].

Наиболее перспективным с практической точки зрения является добавление в электролит для микродугового оксидирования частиц фторопласта (политетрафторэтилена, ПТФЭ) ввиду его превосходных антифрикционных свойств. Фторопласт активно используют в качестве пропитки при изготовлении антифрикционных материалов на основе пористой металлокерамики [7]. Добавление фторопла-

ста в электролит для микродугового оксидирования открывает широкие возможности для формирования композиционных оксидополимерных покрытий, состоящих из каркаса оксидной матрицы, заполненного включениями частиц политетрафторэтилена.

Другим направлением в решении экологических вызовов является определение некоторых аспектов, влияющих на экосистему, и попытки уменьшения их влияния или полного устранения. В этой связи внимание привлекает производство и применение смазочных материалов, так как они оказывают существенное влияние на процессы трения и изнашивания в зоне трения.

К функциям смазочных материалов относятся снижение трения и изнашивания, а также увеличение нагрузочной способности пар трения. В отдельных случаях относительное движение двух трущихся поверхностей возможно только в присутствии смазочного материала. Кроме того, смазочный материал защищает трущиеся поверхности от коррозии и перегрева в зоне контакта [8].

Разработка смазочных материалов стала важнейшей частью совершенствования машинного оборудования и соответствующих технологий. Это сопряжено со многими областями знаний, в некоторых случаях междисциплинарных, не учитывая которые разработка и применение смазочных материалов не смогли бы быть успешными.

Ужесточение экологических норм и законов непосредственно касается и рынка смазочных материалов, поскольку их влияние на биосферу и человека весьма комплексно и определяется многими факторами, проявляясь на всех этапах – от производства до утилизации вторичного сырья. Поэтому современным решением в этой области является разработка и применение экологически безопасных смазочных материалов [9].

В связи с вышеперечисленным перспективным является создание износостойких покрытий методом микродугового оксидирования с последующим их применением с экологически безопасными смазочными материалами, что позволит получать современные пары трения с повышенными триботехническими характеристиками и незначительным влиянием на состояние окружающей среды.

Целью работы является исследование триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий в экологически безопасных смазочных материалах.

Основная часть

Образцы для испытаний были выполнены из алюминиевых сплавов Д16 и В95, которые для обеспечения плоскостности подвергались предварительной обработке, включавшей притирку образцов с помощью смеси порошка оксида алюминия и керосина на чугушной плите. После выполнения операции микродугового оксидирования производилась повторная притирка образцов с применением алмазной пасты АСМ 28/40 ПОСМ.

Для проведения испытаний формировались два типа покрытий: традиционное МДО-покрытие и новое керамополимерное покрытие.

Традиционные МДО-покрытия формировались в анодно-катодном режиме с применением электролита, включавшего щелочь (KOH) и жидкое стекло (Na_2SiO_3). Толщина сформированных МДО-покрытий составляла 130–140 мкм.

Формирование керамополимерных покрытий проводилось в электролите, содержащем щелочь (KOH) и гексаметафосфат натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$), а также смесь суспензии фторопласта (Ф-4Д) и пеногасителя (ПС-1). Процесс микродугового оксидирования производился преимущественно в анодно-катодном режиме с циклическим чередованием его с анодным. Чередование анодно-катодного и анодного режимов обусловлено необходимостью введения частиц фторопласта в структуру МДО-покрытия и распределения их не только в поверхностном слое, но и в толще самого покрытия для обеспечения сохранения антифрикционных свойств в процессе работы. При включении анодного режима частицы фторопласта обволакиваются глобулами ПАВ (часть суспензии Ф-4Д), которые имеют отрицательный заряд. Вследствие электрофореза происходит более активное движение обволаоченных частиц к поверхности обрабатываемой детали, при этом резко возрастает концентрация частиц фторопласта вблизи оксидируемой поверхности, что способствует встраиванию частиц фторопласта в структуру формируемого покрытия [10].

По окончании процесса микродугового оксидирования производилась термообработка сформированного МДО-покрытия с включениями частиц фторопласта при температуре 380–400 °С в течение 30 минут для увеличения адгезии частиц фторопласта в структуре покрытия и снижения общей пористости.

Полученные керамополимерные покрытия исследовались на металлографических шлифах, а также с помощью энергодисперсионной приставки для микроанализа EDAX TRIDENT XM4 электронного микроскопа.

Для оценки триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий были проведены испытания по схеме трения «кольцо – кольцо» с использованием машины трения МТ-393. В рамках данных исследований испытывали пары трения МДО-покрытий по стали ШХ15 и по одноименной поверхности – МДО по МДО.

В качестве образцов для данной схемы испытаний использовались:

- верхнее кольцо из алюминиевых сплавов, выбранных для исследования, размерами $\text{Ø}28 \times 18 \times 6$ мм;
- нижнее кольцо размером $\text{Ø}35 \times 22 \times 2,5$ мм из стали ШХ15 и кольцо с размерами $\text{Ø}35 \times 22 \times 8$ из алюминиевых сплавов, выбранных для исследования.

При испытании по схеме «кольцо – кольцо» нагрузка на образец составляла 700 Н, скорость вращения шпинделя 750 об/мин, время единичного цикла испытания 60 мин.

В качестве смазочной среды применялись базовые синтетические масла на основе полиэтиленгликоля (ПЭГ), полиальфаолефинов (ПАО), диизотридецил адипата (ДИТА).

Перед испытанием образцы подвергались чистке в ультразвуковой ванне в изопропанол и петролейном эфире (по 10 минут на каждый). Затем производилось контрольное взвешивание массы до испытаний. Те же операции выполнялись после испытаний.

По окончании испытаний проводилось определение:

- среднего коэффициента трения за все время испытаний и в течение отдельных интервалов времени с стандартным отклонением;
- величины весового износа образцов.

Толщина сформированных керамополимерных покрытий после притирки с алмазной пастой на алюминиевом сплаве Д16 составила 90 мкм, а на алюминиевом сплаве В95 – 100 мкм.

Металлографический анализ показал, что частицы фторопласта распределены по толщине покрытия сравнительно равномерно, не скапливаясь на поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Строение керамополимерных покрытий (увеличение $\times 500$)

По данным исследования, в общей толщине покрытия участки фторопласта занимают 34 %. Средний диаметр участков фторопласта составил 36 мкм.

Подтверждением наличия включений фторопласта в толще МДО-покрытия являются результаты анализа химического состава с помощью энергодисперсионной приставки для микроанализа EDAX TRIDENT XM4 электронного микроскопа (рис. 2). Из этих данных следует, что частицы фторопласта встраиваются в структуру формируемого МДО-покрытия.

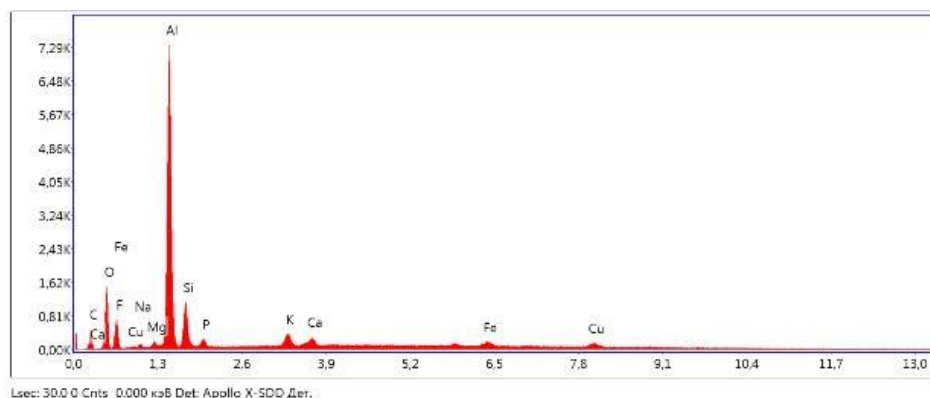


Рис. 2. Спектр участка керамополимерного МДО-покрытия

Сравнение результатов, полученных при испытании пар трения «МДО – сталь ШХ15», представлено на рис. 3.

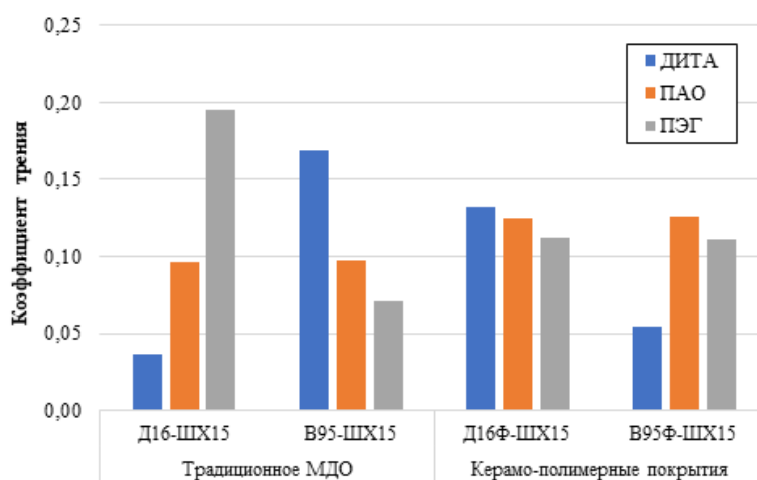


Рис. 3. Средние значения коэффициентов трения после триботехнических испытаний пар трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15»

Анализ полученных данных показывает, что пары трения с традиционными МДО-покрытиями на алюминиевом сплаве Д16 при трении в масле ДИТА показали лучшие значения коэффициента трения, среднее значение которого составило 0,036.

Худший результат по значениям коэффициента трения был получен в масле ПЭГ с покрытиями, сформированными на сплаве Д16, величина коэффициента трения составила 0,195.

Полученные значения коэффициентов трения в парах с керамополимерными покрытиями, сформированными на алюминиевом сплаве Д16 при испытании в масле ПЭГ и на алюминиевом сплаве В95 при испытании в масле ДИТА, имеют средние значения коэффициентов трения ниже на 115 % для покрытий на сплаве Д16 и на 221 % для покрытий на сплаве В95 по сравнению с традиционными МДО-покрытиями, а полученные значения составляют от 0,071 и от 0,055 соответственно.

Оценка износа производилась как для образцов с МДО-покрытием, так и стального контртела. Сравнение полученных значений массового износа представлено на рис. 4.

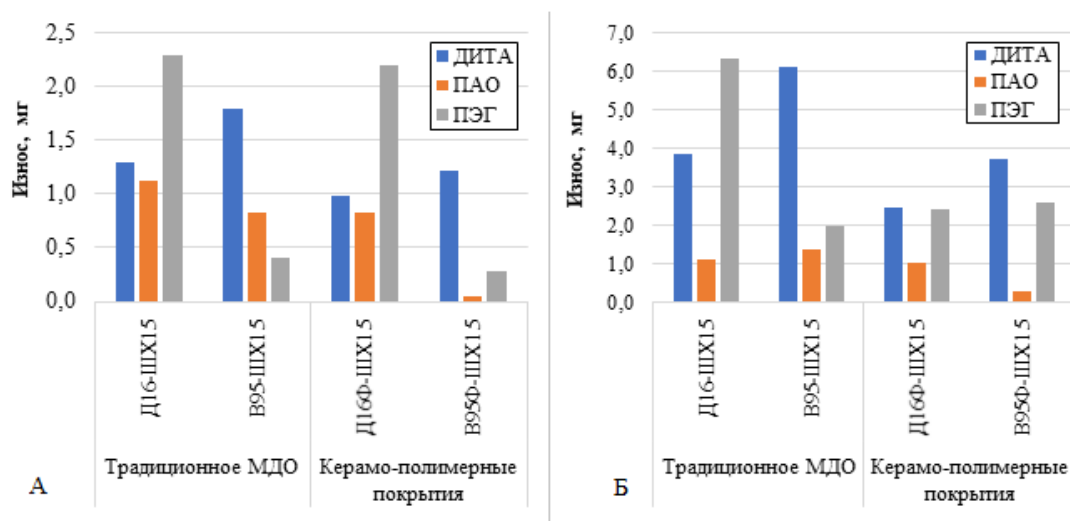


Рис. 4. Средние значения износа после испытаний в экологических маслах пар трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15»:

А – износ верхнего кольца (МДО-покрытие); *Б* – износ нижнего кольца (сталь ШХ15).

В общем случае керамополимерные покрытия показали лучшую износостойкость в сравнении с традиционными МДО-покрытиями. Наименьший износ был получен на керамополимерных покрытиях, сформированных на алюминиевом сплаве В95 в масле ПАО. Снижение износа в сравнении с традиционными МДО-покрытиями на этом же сплаве составило 129 %. В остальных случаях снижение износа керамополимерных покрытий относительно традиционных МДО-покрытий составило от 31,3 до 47,5 %. В то же время снижение износа стальных колец (контртел) в парах трения с керамополимерными покрытиями составило величину в диапазоне 57,1–623 %.

Сравнение средних значений коэффициента трения, полученных при испытании пар трения «МДО – МДО», приведено на рис. 5.

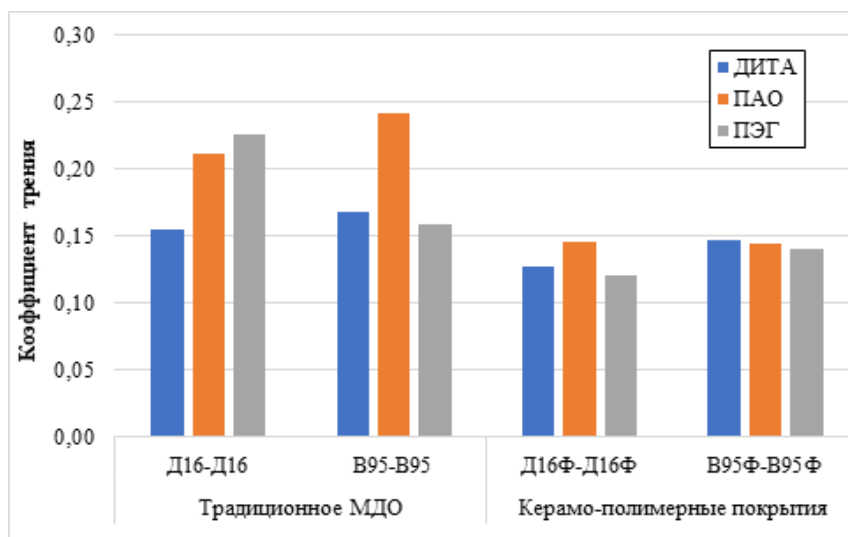


Рис. 5. Средние значения коэффициентов трения после испытаний в экологических маслах пар трения «МДО-покрытие – МДО-покрытие»

Из результатов следует, что пары трения с керамополимерным покрытием показали наименьшие значения коэффициента трения в масле ПЭГ. Для покрытий, сформированных на сплаве Д16, значение коэффициента трения составило 0,120, а для аналогичных покрытий на сплаве В95 это значение составило 0,140.

В масле ПАО керамополимерные покрытия также показали низкий коэффициент трения относительно традиционных МДО-покрытий, величина коэффициента трения составила 0,146 для покрытий, сформированных на сплаве Д16, для аналогичных покрытий на сплаве В95 – 0,144. В целом коэффициент трения керамополимерных покрытий ниже на 14,8–89,0 % по сравнению с коэффициентом трения для МДО-покрытий, полученных традиционным способом.

Полученные значения массового износа верхнего и нижнего колец после испытания пар трения «МДО-покрытие – МДО-покрытие» представлены на рис. 6.

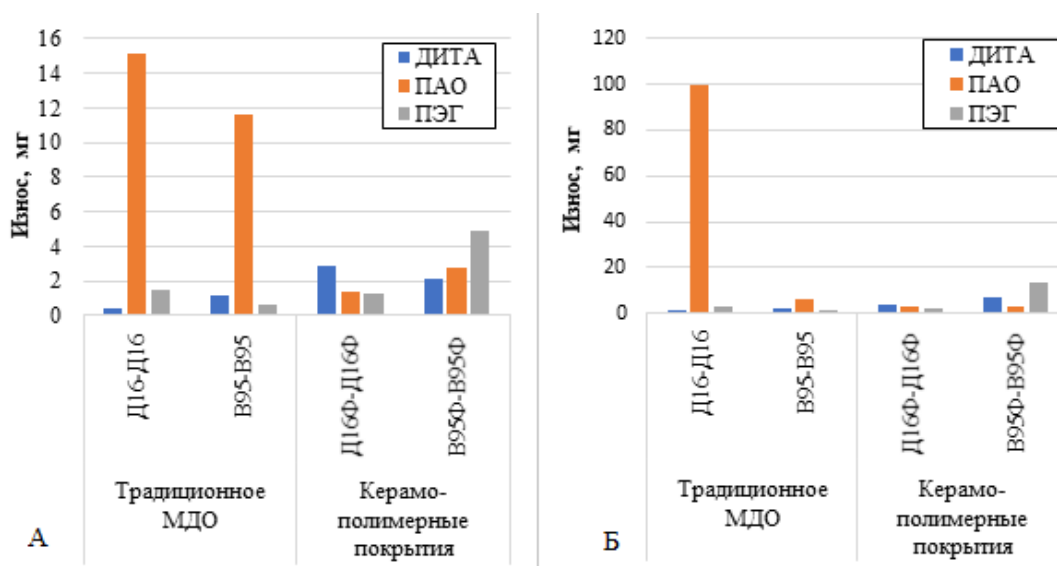


Рис. 6. Средние значения износа после испытаний в экологических маслах пар трения «МДО-покрытие – МДО-покрытие»:
 А – износ верхнего кольца; Б – износ нижнего кольца.

Износ керамополимерных покрытий в целом находится на уровне традиционных МДО-покрытий. Так, в масле ПЭГ величина износа керамополимерного покрытия, сформированного на сплаве Д16, ниже на 58,6 % для нижнего кольца и на 86,7 % для верхнего кольца.

Самые высокие значения износа показали традиционные МДО-покрытия в масле ПАО. В этом случае произошло даже разрушение сформированного покрытия до материала подложки. Поскольку разрушение происходило практически сразу на старте испытания, то данное явление, по всей видимости, связано с большим значением молекулярной составляющей коэффициента трения в трибосистеме «МДО – масло ПАО – МДО», ввиду чего образуются высокие сдвиговые напряжения, разрушающие покрытие. В то же время керамополимерные покрытия в масле ПАО не были разрушены, что указывает на положительное влияние частиц фторопласта в покрытии.

Выводы

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- 1 Использование метода формирования покрытий с циклическим режимом формирования способствует тому, что частицы фторопласта равномерно распределены по всей толщине керамополимерных покрытий.
- 2 Керамополимерные покрытия в парах трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15» показали снижение износа от 31 до 47,5 % при относительно равных значениях коэффициента трения (в сравнении с традиционными МДО-покрытиями).
- 3 Для пары трения, составленной из одноименной поверхности (МДО-покрытие – МДО-покрытие), в зависимости от применяемой смазки характерно снижение коэффициента трения от 14,8 до 89,0 %.

Список литературы

- 1 Елагина, О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие / О. Ю. Елагина. – Москва : Логос, Университетская книга, 2009. – 488 с. – ISBN 978-5-98704-450-6.
- 2 Соколик, Ю. Н. Модифицированные керамические материалы и твердые сплавы для узлов трения, работающих в условиях ограниченной смазки / Ю. Н. Соколик, С. А. Вашарин,

References

- 1 Elagina, O. Yu. Technological methods for improving the wear resistance of machine parts : a textbook / O. Yu. Elagina. – Moscow : Logos, University book, 2009. – 488 p. – ISBN 978-5-98704-450-6.
- 2 Sokolik, Yu. N. Modified ceramic materials and hard alloys for friction units operating in conditions of limited lubrication / Yu. N. Sokolik,

С. Ю. Курочкин // Насосы. Турбины. Системы. – 2019. – № 3(32). – С. 43–54. – ISSN 2226-177X.

3 **Малышев, В. Н.** Трибология поверхностей, упрочненных микродуговым оксидированием. Износо-, коррозионно- и теплостойкие покрытия / В. Н. Малышев. – Москва : Palmarium Academic Publishing, 2012. – 410 с. – ISBN 978-3-8473-9597-3.

4 **Малышев, В. Н.** Модифицирование поверхностного слоя деталей методом микродугового оксидирования : состояние, возможности, перспективы / В. Н. Малышев // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2014. – № 1. – С. 5–20. – ISSN 2071-8152.

5 **Эпельфельд, А. В.** Технология и оборудование микродугового оксидирования / А. В. Эпельфельд // Квалификация и качество. – 2002. – № 4. – С. 33–37.

6 **Малышев, В. Н.** Исследование трения и изнашивания МДО-покрытий в условиях смазки базовыми маслами / В. Н. Малышев, Н. С. Почес // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18, № 5(209). – С. 232–236. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-5-232-236.

7 **Ганз, С. Н.** Антифрикционные химически стойкие материалы в машиностроении / С. Н. Ганз, В. Д. Пархоменко. – Москва : Машиностроение, 1965. – 148 с.

8 **Манг, Т.** Смазки. Производство, применение, свойства. Справочник / Т. Манг, У. Дрезель ; перевод с английского под редакцией В. М. Школьников. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : ЦОП «Профессия», 2015. – 944 с.

9 **Евдокимов, А. Ю.** Экологические аспекты химмотологии смазочных материалов / А. Ю. Евдокимов, И. Г. Фукс, И. Р. Облащикова. – Москва : ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. Губкина, 2001. – 198 с.

10 **Патент № 2787330 С1 РФ**, МПК C25D 11/02, C25D 15/00. Способ получения композиционных покрытий на вентильных металлах и их сплавах / В. Н. Малышев, Н. С. Почес. – № 2022127763 ; заявл. 26.10.2022 ; опублик. 09.01.2023, Бюл. № 1. – 12 с.

S. A. Vasharin, S. Yu. Kurochkin // Pumps. Turbines. Systems. – 2019. – No. 3(32). – P. 43–54. – ISSN 2226-177X.

3 **Malyshev, V. N.** Tribology of surfaces hardened by microarc oxidation. Wear-, corrosion- and heat-resistant coatings / V. N. Malyshev. – Moscow : Palmarium Academic Publishing, 2012. – 410 p. – ISBN 978-3-8473-9597-3.

4 **Malyshev, V. N.** Modification of the surface layer of parts by the method of microarc oxidation : state, possibilities, prospects / V. N. Malyshev // Quality management in the oil and gas complex. – 2014. – No. 1. – P. 5–20. – ISSN 2071-8152.

5 **Epelfeld, A. V.** Technology and equipment for microarc oxidation / A. V. Epelfeld // Qualification and quality. – 2002. – No. 4. – P. 33–37.

6 **Malyshev, V. N.** Study of friction and wear of MAO coatings under conditions of lubrication with base oils / V. N. Malyshev, N. S. Poches // Strengthening technologies and coatings. – 2022. – Vol. 18, No. 5(209). – P. 232–236. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-5-232-236.

7 **Ganz, S. N.** Antifriction chemically resistant materials in mechanical engineering / S. N. Ganz, V. D. Parkhomenko. – Moscow : Mashinostroenie, 1965. – 148 p.

8 **Mang, T.** Lubricants. Production, application, properties. Handbook / T. Mang, W. Drezel ; translated from English edited by V. M. Shkolnikov. – 2nd ed. – Saint Petersburg : TsOP “Professiya”, 2015. – 944 p.

9 **Evdokimov, A. Yu.** Ecological aspects of chemmotology of lubricants / A. Yu. Evdokimov, I. G. Fuchs, I. R. Olashchikov. – Moscow : State Unitary Enterprise Publishing House “Oil and Gas” of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2001. – 198 p.

10 **Patent RU2787330C1**. C25D 11/02, C25D 15/00. Method for obtaining composite coatings on valve metals and their alloys / V. N. Malyshev, N. S. Poches. – Application no. 2022127763; applied 21.10.2020 ; publ. 29.06.2021, Bull. No. 1. – 12 p.

N. S. Poches, V. N. Malyshev

STUDY OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF NEW CERAMIC-POLYMER COATINGS IN ENVIRONMENTALLY SAFE LUBRICANTS

Abstract. This work is devoted to the study of new ceramic-polymer coatings formed by microarc oxidation (MAO) method during friction in environmentally saved lubricants using polyalphaolefin (PAO), polyethylene glycol (PEG) and diisotridecyl adipate (DITA). The coatings were formed in a weakly alkaline electrolyte with the addition of a fluoroplastic suspension using a cyclic mode. To improve the adhesion strength of fluoroplastic to the oxide matrix, additional heat treatment was performed. The resulting ceramic-polymer coatings consist of an oxide matrix with fluoroplastic particles embedded in it. Tests have shown that new

ceramic-polymer coatings have improved tribological characteristics relative to traditional MAO coatings at the friction both to steel and to the eponymous surface.

Keywords: microarc oxidation, ceramic-polymer coatings, tribotechnical characteristics, environmentally safe lubricants.

For citation: Poches, N. S. Study of tribotechnical characteristics of new ceramic-polymer coatings in environmentally safe lubricants / N. S. Poches, V. N. Malyshev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 196–203. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_196.

Сведения об авторах

Почес Никита Сергеевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, кафедра «Трибология и технологии ремонта нефтегазового оборудования», ассистент, e-mail: nikitapoches@gmail.com

Малышев Владимир Николаевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, кафедра «Трибология и технологии ремонта нефтегазового оборудования», доктор технических наук, профессор, e-mail: vmal@inbox.ru

Information about the authors

Poches Nikita Sergeevich

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Chair «Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment», Lecture, e-mail: nikitapoches@gmail.com

Malyshev Vladimir Nikolaevich

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Chair «Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment», Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: vmal@inbox.ru