

Д. т. н. Ю. А. Кузнецов¹, к. т. н. М. А. Марков² (✉), д. т. н. И. Н. Кравченко³,
к. х. н. А. В. Красилов², А. Д. Быкова²

¹ ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина», г. Орел, Россия

² НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

³ ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», Москва, Россия

УДК 621.794.61

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРОТОЧНЫМ СПОСОБОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Представлена перспективная технология применения традиционной схемы реализации метода микродугового оксидирования проточным способом на примере восстановления локальных поверхностей алюминиевых деталей — втулок. Сформированы керамические композиционные покрытия на основе корунда, которые характеризуются толщиной 70–110 мкм и твердостью 9500–10800 МПа.

Ключевые слова: керамические покрытия, микродуговое оксидирование (МДО), восстановление, ремонт, электролит, оксид алюминия.

ВВЕДЕНИЕ

Принципиально новым шагом на пути создания покрытий с высокими физико-механическими характеристиками на алюминиевых сплавах стал переход от традиционного анодирования к получению оксидно-керамических покрытий в условиях искрового разряда [1–3]. Фигурирующий в научной литературе под названиями «микроплазменный синтез», «анодно-искровой электролиз», «ANOF-process» (anodischen Oxidation unter Funkenentladung), «MAO» (mikro-arc oxidation) способ микродугового оксидирования (МДО) является на сегодняшний день весьма перспективным способом упрочняющей обработки изделий из вентильных сплавов [4, 5].

Известны электрохимические методы нанесения защитных оксидных покрытий, близких по свойствам к конструкционной керамике [6–10]. В настоящее время электрохимические методы оксидирования являются рекомендуемыми при восстановлении целых алюминиевых деталей и конструкций, которые эксплуатируют преимущественно в изделиях для сельского хозяйства. Однако в большинстве

случаев в ремонтном производстве необходимо локальное воздействие на поверхность для устранения точечных дефектов отработанного изделия (коробки передач, крышки насосов и т. д.). Применение метода МДО в данном случае является затруднительным из-за технологических особенностей процесса (объемное погружение детали в электролит).

Авторами настоящей статьи предложен перспективный и технологичный способ нанесения упрочняющих керамических покрытий на локальные участки алюминиевых изделий за счет применения МДО проточным способом. Следует отметить, что предлагаемая схема МДО дает возможность использовать при оксидировании мелкодисперсные порошки. Это позволяет значительно увеличить производительность процесса и толщину формируемых покрытий за счет попадания частиц в область микродуговых разрядов.

Цель данной работы — обоснование применения традиционной схемы реализации метода МДО проточным способом на примере восстановления алюминиевых деталей.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сущность МДО-процесса заключается в пропускании анодного тока высокой плотности через границу раздела алюминий (вентильный металл) – электролит. При этом на границе раздела фаз появляется напряженность, которая существенно выше ее диэлектрической плотно-



М. А. Марков
E-mail: barca0688@mail.ru

сти. В результате на поверхности электрода возникают микроплазменные разряды с температурой от нескольких сотен до нескольких тысяч градусов Цельсия. Напряженность электрического поля в сочетании с высокой температурой разрядов способствует формированию высокотемпературных модификаций оксида алюминия и возникновению неравновесных условий, в результате чего в процесс оксидирования вовлекаются компоненты из электролита [11–14]. При дополнительном действии электрофоретической составляющей происходит легирование оксидного покрытия, а также формируются сложные смеси оксидов. Таким образом, в зависимости от режимов МДО и выбора электролита можно получать керамические композиционные алюмооксидные покрытия заданного химического состава.

В настоящей работе МДО осуществляли проточным способом на локальных участках экспериментальных изделий из алюминиевого сплава марки АЛ7ч, а именно на ремонтных втулках (дополнительная ремонтная деталь), используемых при ремонте клапанных коробок насосных установок ЖБ-ВНП. Для МДО алюминия применяли комбинированный силикатно-щелочной электролит $\text{NaOH-Na}_2\text{SiO}_3$. В этом составе NaOH является активатором, который влияет на растравливающую способность, что позволяет формировать упрочненный слой внутри оксидируемой поверхности относительно номинального размера детали. Это приводит к существенному увеличению адгезионной прочности покрытий. Жидкое стекло Na_2SiO_3 выступает как пассиватор и, адсорбируясь, создает на металле пленку с высоким электросопротивлением. Благодаря этому при анодной поляризации возможно появление искровых разрядов, приводящих к синтезу высокотемпературных модификаций оксида алюминия. Состав электролита, г/л: NaOH 2, Na_2SiO_3 9.

Микротвердость покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3М по ГОСТ 9450–76, фазовый состав покрытий исследовали на дифрактометре D8 Advance, толщину покрытий определяли на приборе «Константа К5».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время наиболее распространенная и известная схема установки для проведения МДО включает электролитическую ванну (рис. 1). Электролитическая ванна снабжена, как правило, системой охлаждения. Перемешивание электролита осуществляется механически посредством лопастной мешалки с приводом от электродвигателя. Деталь для МДО крепится непосредственно к изолированной подвеске резьбовым соединением. При реализации локальной обработки поверхности требуется изоляция отдельных участков изделия, однако отсутствует

необходимость в охлаждении и перемешивании электролита.

Возможности применения технологических аспектов метода МДО были проанализированы в публикации [5]. На рис. 2 показан классификатор признаков использования МДО проточным способом.

Рассмотрим представленные технологические аспекты. В качестве рабочего тела выступает непосредственно электролит. Для реализации проточного способа МДО могут быть использованы стандартные электролиты, зарекомендовавшие себя в массовом производстве, а также электролиты с добавками порошковых материалов.

Электролит на поверхность оксидируемой детали можно подавать через сопло. При этом материал сопла может выступать как катод. В этом случае геометрическая форма катода может иметь ключевое значение в процессе МДО. Если сопло электрически нейтрально то катод можно установить отдельно, например, по оси сопла; в таком случае зона обработки детали приобретает более локальный характер. При этом важно обеспечить непрерывную подачу электролита.

Классификационный признак по способу перемещения рабочего органа обосновывается тем, что движение катода должно осуществляться на минимальном расстоянии от положительно заряженной обрабатываемой поверхности. Если перемещается анод, имеющий сложную геометрию, то каждая точка оксидируемой детали должна претерпевать наименьшее отклонение от катода по ходу движения для формирования равномерного керамического покрытия.

Предлагаемая реализация технологии МДО проточным способом на примере оксидирова-

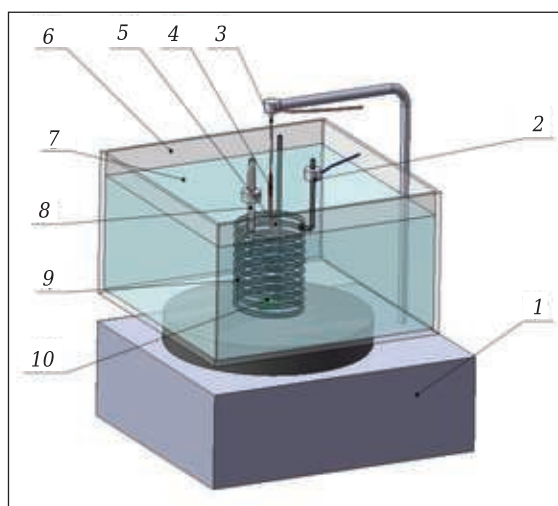


Рис. 1. Основные узлы установки МДО: 1 — магнитная мешалка; 2 — отрицательный полюс источника постоянного тока; 3 — токопровод; 4 — термоусадочная изоляционная труба; 5 — образец; 6 — ванна; 7 — электролит; 8 — термометр; 9 — змеевик; 10 — магнит



Рис. 2. Классификатор признаков использования МДО проточным способом

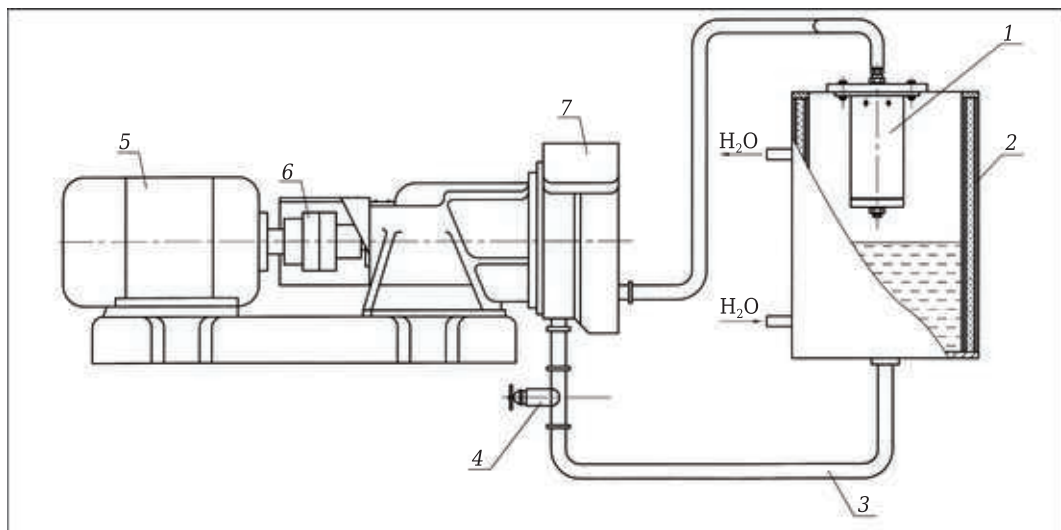


Рис. 3. Схема проточного МДО при упрочнении втулок: 1 — приспособление для закрепления и оксидирования втулок; 2 — сборник электролита с рубашкой охлаждения; 3 — патрубок; 4 — кран; 5 — электродвигатель; 6 — муфта; 7 — щелочестойкий насос

ния алюминиевых втулок схематично показана на рис. 3. Ремонтируемые детали размещаются внутри металлического электрода-1, зафиксированного на изоляционной (фторопластовой) пластине. В свою очередь, электрод крепится над специальным сборником электролита. Внутри втулок устанавливается электрод-2 (рис. 4). Циркуляция электролита создается щелочестойким насосом, при этом скорость подачи можно регулировать вентилем. В процессе движения электролит начинает выливаться через боковые отверстия электрода-1, и в этот момент происходит включение электрического тока. Далее

между внутренней поверхностью упрочняемых втулок и электродом-2 возникают микродуговые разряды, обеспечивающие образование износостойкого керамического слоя.

На основании экспериментальных данных рекомендуемые режимы МДО втулок для создания упрочняющих керамических покрытий проточным способом приведены ниже:

Плотность тока, A/dm^2 15–20
 Температура электролита, $^{\circ}C$ 30–35
 Продолжительность оксидирования, мин..... 100–120

Основные характеристики упрочненного слоя: толщина 0,070–0,110 мм, микротвердость

9500–10800 МПа. Характерный фазовый состав керамических покрытий для рекомендуемых технологических режимов включает муллит и корунд. На поверхности покрытий присутствует также аморфный SiO_2 , который в научной литературе часто трактуется как технологический слой (рис. 5) [9].

На основании приведенной технологии синтеза керамических покрытий на локальных по-

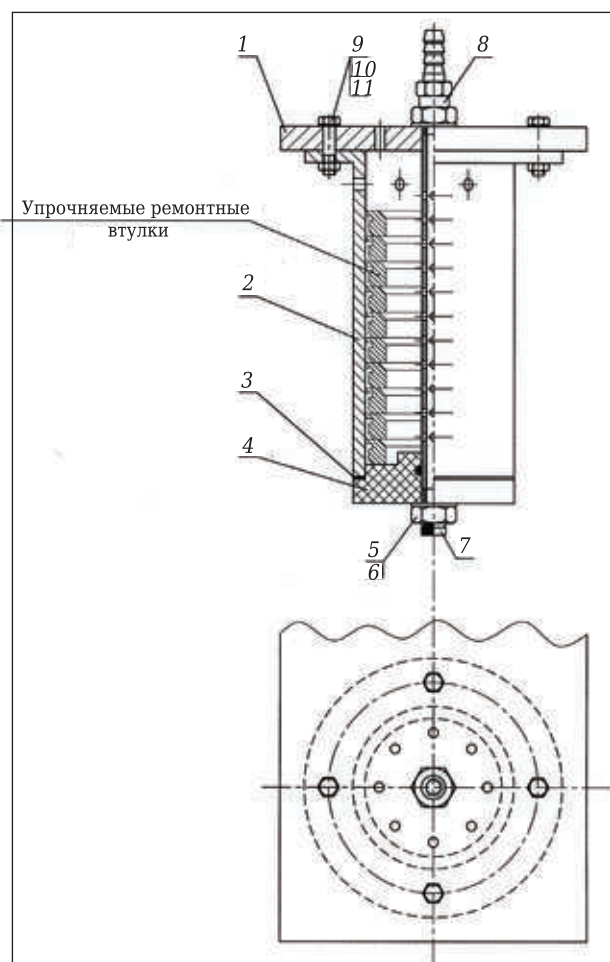


Рис. 4. Общий вид приспособления, используемого для закрепления и оксидирования втулок: 1 — фторопластовая пластина; 2 — цилиндрический электрод-1; 3 — прокладка; 4 — крышка; 5 — гайка; 6 — шайба; 7 — электрод-2 с пробкой; 8 — штуцер; 9 — болт; 10 — шайба; 11 — гайка

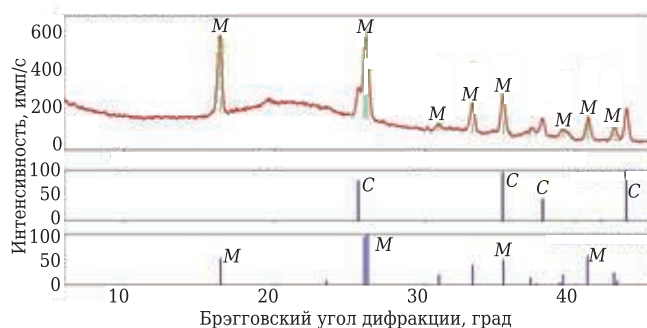


Рис. 5. Характерная рентгенограмма поверхности керамических покрытий: М — муллит; С — корунд

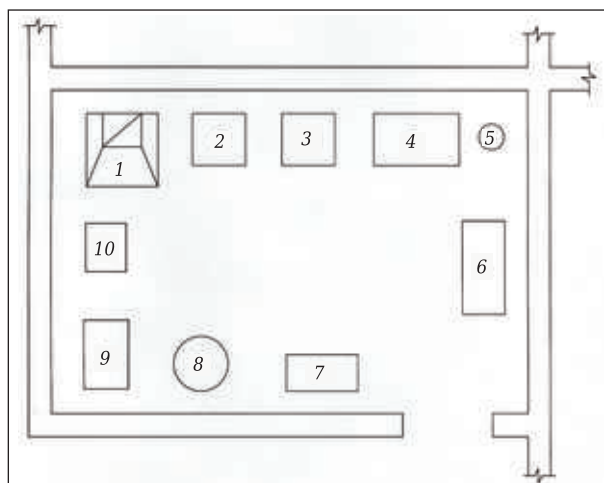


Рис. 6. Схема размещения оборудования на участке МДО: 1 — вытяжной шкаф со сборником электролита; 2 — ванна обезжиривания; 3 — ванна промывки; 4 — верстак; 5 — влагомаслоотделитель; 6 — стеллаж ремфонда; 7 — шкаф реактивов и приспособлений; 8 — дистиллятор; 9 — стол; 10 — источник питания установки МДО

верхностях алюминиевых изделий в процессе их восстановительного ремонта с применением проточного способа МДО авторами предложена схема расположения оборудования в условиях производственного участка (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена перспективная технология применения традиционной схемы реализации метода микродугового оксидирования (МДО) проточным способом на примере восстановления локальных поверхностей алюминиевых деталей — втулок.

Для рекомендуемых режимов упрочнения ремонтных втулок МДО по предложенному способу формируются керамические композиционные покрытия на основе корунда, которые характеризуются толщиной 70–110 мкм и твердостью 9500–10800 МПа.

Предложена схема расположения оборудования в условиях производственного участка для реализации МДО проточным способом.

* * *

Представленный материал получен в рамках реализации гранта Российского научного фонда «Проведение исследований научными лабораториями мирового уровня в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными по соглашению № 21-73-30019.

Библиографический список

1. **Суминов, И. В.** Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов, А. В.

Эпельфельд, В. Б. Людин [и др.]. — М. : ЭКОМЕТ, 2005. — 368 с.

2. **Хенли, В. Ф.** Анодное оксидирование алюминия и его сплавов ; под ред. В. С. Синявского ; пер. с англ. / В. Ф. Хенли. — М. : Металлургия, 1986. — 152 с.

3. **Kumruoglu, L. C.** Micro arc oxidation of wire arc sprayed Al-Mg₆, Al-Si₁₂, Al coatings on low alloyed steel / L. C. Kumruoglu, F. Ustel, A. Ozel, A. Mimaroglu // Engineering. — 2011. — № 3. — P. 680–690. DOI: 10.4236/eng.2011.37081.

4. **Xue, W.-B.** Growth dynamics and performance analysis of MAO ceramic coating of 6061 aluminum alloy [J] / W.-B. Xue, X.-L. Jiang // Function Materials. — 2008. — № 39/4. — P. 603–606 (in Chinese).

5. **Барыкин, Н. В.** Разработка технологии восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Барыкин Николай. — М., 1994. — 19 с.

6. **Kuznetsov, Yu. A.** Formation of wear- and corrosion-resistant ceramic coatings by combined technologies of spraying and micro-arc oxidation / Yu. A. Kuznetsov, M. A. Markov, A. V. Krasikov [et al.] // Russ. J. Appl. Chem. — 2019. — Vol. 92, № 7. — P. 875–882. DOI: 10.1134/S1070427219070012.

7. **Markov, M. A.** Investigation of the characteristics of ceramic coatings obtained by microarc oxidation on direct and alternating currents in an alkaline silicate electrolyte / M. A. Markov, Yu. A. Kuznetsov, A. V. Krasikov [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2020. — Vol. 49, № 8. — P. 21–28. DOI: 10.1007/s11148-018-0207-3.

8. **Perevislov, S. N.** Evaluation of the crack resistance of reactive sintered composite boron carbide-based materials / S. N. Perevislov // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 3. — P. 168–173. DOI: 10.1007/s11148-019-00330-0.

Перевислов, С. Н. Структура, свойства и области применения графитоподобного гексагонального нитрида бора/ С. Н. Перевислов // Новые огнеупоры. — 2019. — № 6. — С. 35–40.

9. **Perevislov, S. N.** Hot-pressed ceramic SiC-YAG materials / S. N. Perevislov, A. S. Lysenkov, D. D. Titov, M. V. Tomkovich // Inorg. Mater. — 2017. — Vol. 53, № 2. — P. 220–225. DOI:10.1134/S0020168517020091.

10. **Perevislov, S. N.** Production of ceramic materials based on SiC with low-melting oxide additives / S. N. Perevislov, A. S. Lysenkov, D. D. Titov [et al.] // Glass and Ceramics. — 2019. — Vol. 75, № 9/10. — P. 400–407. DOI: 10.1007/s10717-019-00094-6.

11. **Гордиенко, П. С.** Образование покрытий на анодно-поляризованных электродах в водных электролитах при потенциалах искрения и пробоя / П. С. Гордиенко. — Владивосток : Дальнаука, 1996. — 216 с.

12. **Yerokhin, A. L.** Plasma electrolysis for surface engineering / A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland [et al.] // Surface and Coating Technology. — 1999. — Vol. 122. — P. 73–93. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00441-7.

13. **Ракоч, А. Г.** Анодирование легких сплавов при различных электрических режимах. Плазменно-электролитическая нанотехнология / А. Г. Ракоч, А. В. Дуб, А. А. Гладкова. — М. : Старая Басманная, 2012. — 496 с.

14. **Гордиенко, П. С.** Микродуговое оксидирование металлов и сплавов / П. С. Гордиенко, В. А. Достовалов, А. В. Ефименко. — Владивосток : ДВФУ, 2013. — 522 с. ■

Получено 10.05.21

© Ю. А. Кузнецов, М. А. Марков,
И. Н. Кравченко, А. В. Красиков,
А. Д. Быкова, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**13-я международная конференция
«Углерод: фундаментальные проблемы науки,
материаловедение, технология»
(CFPMST 2021)**

25–27 октября 2021 г.
г. Троицк, Россия

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА:

- последние достижения в области синтеза алмазов
- методы исследования и компьютерного моделирования структуры и свойств алмазов и новых форм углерода (наноалмазов, фуллеренов, нанотрубок, онионов, карбинов, графенов и др.)
- углеродсодержащие композиты функционального и конструкционного назначения, перспективы создания и применения в разных областях
- новые физические и химические подходы при создании углеродных материалов, изучение взаимосвязи структуры и свойств, применение в биологии и медицине
- сорбционные и каталитические свойства углеродных, в том числе наноструктурированных, материалов
- методы синтеза наноструктурированных углеродных материалов

www.ruscarbon.org/2021