

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.794.61

doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-14-22

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Сергей Владимирович Захаров^{1✉}, Михаил Тимофеевич Коротких²

¹ ООО «Гальванза», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ terapeft@mail.ru

² kmt46@mail.ru

Аннотация

Целью работы: показать разнообразие возможных методов оксидирования деталей из алюминиевых сплавов, разнообразие свойств оксидных покрытий, возможные рациональные области их применения. Приведено сравнение принципиально различных методов оксидирования – анодного и микродугового. Показано, что свойства таких покрытий могут принципиально различаться. Работа основана на опыте промышленного гальванического производства, связанного с различными метода-

ми гальванического оксидирования алюминиевых сплавов и лабораторных исследованиях микродугового оксидирования.

Основным выводом работы является необходимость более широких исследований по рациональному применению различных оксидных покрытий деталей из алюминиевых сплавов в зависимости от условий их эксплуатации.

Ключевые слова: сплавы, оксидирование, методы, машиностроение, свойства.

Ссылка для цитирования:

Захаров С.В. Повышение эксплуатационных свойств деталей из алюминиевых сплавов / С.В. Захаров, М.Т. Коротких // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 8. – С. 14-22. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-14-22.

Original article

Open Access Article

IMPROVING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF PARTS MADE OF ALUMINUM ALLOYS

Sergey Vladimirovich Zakharov^{1✉}, Mikhail Timofeevich Korotkikh²

¹ LC Galvanza, St. Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

¹ terapeft@mail.ru

² kmt46@mail.ru

Abstract

The study objective is to show the variety of possible methods of oxidating aluminum alloy parts, the variety of properties of oxide coatings, and possible rational areas of their application. A comparison of fundamentally different oxidation methods, i.e. anode and microarc ones is given. It is shown that the properties of such coatings can differ fundamentally. The work is based on the experience of industrial electroplating related to various methods of electroplating

aluminum alloys and laboratory studies of microarc oxidation.

The main conclusion of the paper is the need for broader research on the rational use of various oxide coatings of aluminum alloy parts, depending on their operating conditions.

Keywords: alloys, oxidation, methods, mechanical engineering, properties.

Reference for citing:

Zakharov SV, Korotkikh MT. Improving the operational properties of parts made of aluminum alloys. Transport Engineering. 2026;8:14-22. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-14-22.

Введение

Во многих отраслях машиностроения и приборостроения все более широко применяются алюминиевые сплавы. Алюминий и его сплавы обладают такими преимуществами, как низкая плотность, хорошие механические свойства, коррозионная устойчивость в ряде сред.

Однако алюминиевые сплавы не обладают рядом свойств, необходимых для

работы в некоторых агрессивных средах, в парах трения и при внешних абразивных воздействиях.

Поэтому разработка технологических методов упрочнения, увеличения износостойкости и защиты поверхности таких деталей является актуальной технологической задачей.

Гальванические методы оксидирования

В отличие от стальных деталей детали из алюминиевых сплавов могут подвергаться ограниченному набору методов модификации поверхности, в которые входит как химическая, так и электрохимическая

обработка. В части химической обработки применяют методы функционального (Хим.Окс) и электропроводного (Хим.Окс.э) оксидирования (рис.1).

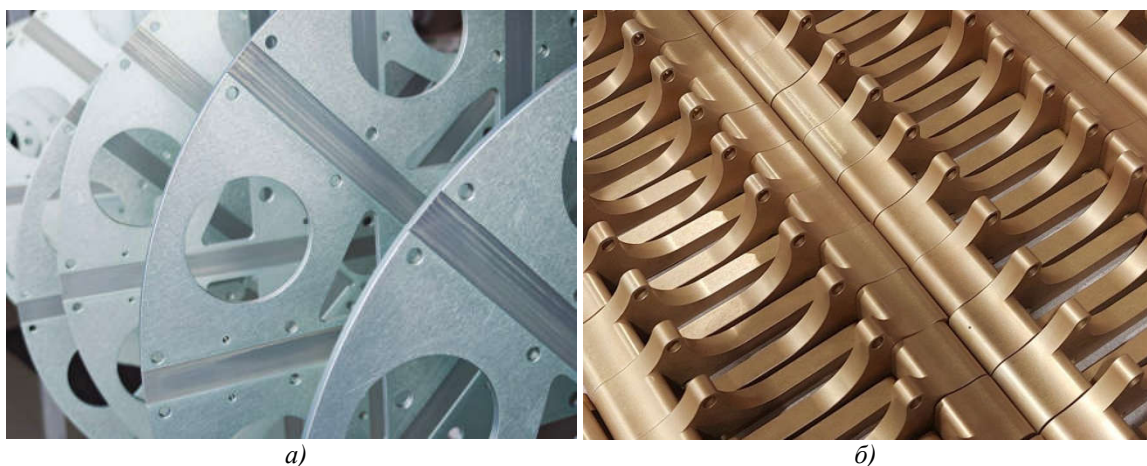


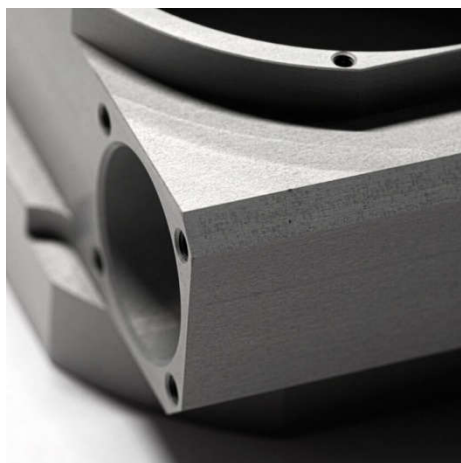
Рис. 1. Пример внешнего вида покрытия Хим.Окс (а) и Хим.Окс.э (б)
Fig. 1. Example of the appearance of the Khim.Oks (a) and Khim.Oks.e (b) coatings

По сравнению с электрохимическими химические методы обработки сравнительно менее требовательны к оборудованию в связи с отсутствием электрического тока, поэтому не требуют специальной оснастки, так как обработка поверхности инициируется погружением активированной поверхности в рабочий раствор. Образующиеся плёнки, в зависимости от конкретного состава и режима, имеют толщину от 0,1 до 2 мкм, достаточно выраженную пористость и не контролируются на твёрдость. По этой причине как самостоятельные защитные покрытия не применяются.

Существенно шире применяются методы анодного оксидирования [1] в соче-

тании с последующей обработкой и могут быть классифицированы по функциональному назначению на защитные, износостойкие, декоративные, химически стойкие и специальные.

Наибольшее распространение получил процесс Ан.Окс.нв при котором на поверхности образуется тонкая от 2 до 40 мкм [2, 3] пленка окислов, которая на некоторых режимах из-за повышенной пористости и толщины покрытия обладает высокой сорбционной способностью, в частности, может быть наполнена органическими или неорганическими солями металлов, пропитана маслами, лаками или окрашена в различные цвета (рис.2).



а)



б)

Рис. 2. Пример внешнего вида покрытия Ан.Окс - а; Ан.Окс.ч - б
Fig. 2. Example of the appearance of the An.Ox (a) and An.Ox.ch (b) coatings

Пористость этих пленок определяется условиями их получения, образованием новых слоев окислов непосредственно на границе металл-электролит. Эта пористость является в ряде случаев благоприятным фактором, позволяющим наносить гальванические покрытия [4, 5].

Это позволяет существенно повысить как функциональные, так и декоративные свойства деталей, что широко применяется при производстве изделий массового потребления. Однако такие пленки не всегда в достаточной степени защищают поверхность от продолжительного воздействия агрессивных факторов окружающей среды, а также термического, абразивного или контактного износа при активном воздействии на поверхность.

В зависимости от технических требований к защитным свойствам покрытия, для получения более износостойких и в свою очередь толстых или твердых оксидных пленок на поверхности деталей из алюминиевых сплавов применяется метод твердого анодного оксидирования Ан.Окс.тв. Метод позволяет получать в зависимости от анодируемого сплава и режимов обработки покрытия толщиной от 10 до 150 мкм и микротвердостью от 100 до 450 HV.

Сущность метода заключается в формировании искусственного оксидного слоя с определенными целевыми характеристиками на поверхности алюминиевого сплава в растворе электролита при про-

хождении электрического тока. Под воздействием электрического тока происходит окисление алюминия с образованием кристаллической фазы Al_2O_3 .

В свою очередь под воздействием электролита оксидная плёнка на поверхности растворяется с постоянной скоростью, способствуя образованию как структуры пор, так и их свойств. В зависимости от соотношения скорости растворения и скорости роста плёнки и могут наблюдаться разные сценарии роста, однако в общем случае, при эффективных режимах обработки объёмные отношения толщины оксидной плёнки к утолщению образца относительно исходной поверхности находятся в соотношении от 1:1 до 2:1 в зависимости от гидратированности поверхности. Покрытие растёт изнутри, а образующиеся новые слои находятся между покрытием и поверхностью металла, выходя за пределы изначальной поверхности в большую сторону.

Несмотря на высокую твердость покрытия и его прочное соединение с поверхностью его защитные антикоррозионные свойства обычно повышают, адсорбируя в поры различные составы. Например, в процессе хромирования под воздействием высокой температуры в водном растворе дихромата калия в порах формируются химически стойкие минералы в зависимости от pH – оксидхромат алюминия или оксихромат алюминия. По химической стойкости и фрикционным свой-

ствам с таким методом модификации поверхности может конкурировать наполнение пор фторопластовым лаком с термиче-

ским отверждением или конденсация фторопласта на поверхности (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид покрытия Ан.Окс.нхр – а; Ан.Окс с фторопластом - б
Fig. 3 External appearance of the An.Ox.nhr coating (a) and An.Ox with fluoroplastic (b)

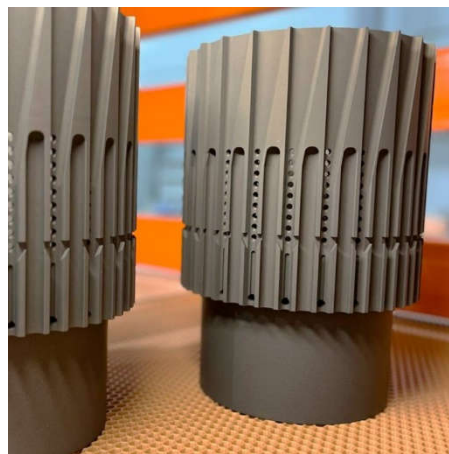
Процесс глубокого оксидирования отработан и активно применяется в промышленности. Имеются режимы этапов процесса, свойства и методы контроля, зафиксированные в ГОСТ. Технологический процесс содержит от 8 до 12 стадий обработки общей продолжительностью от 50 до 150 мин, в зависимости от размеров изделия и толщины покрытия, что требует

построения оборудования гальванической линии на высоком уровне технологического обеспечения.

В настоящее время имеется оборудование позволяющее покрывать изделия из алюминиевых сплавов габаритами до 1400×500×500 мм (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Изделие Ø500x1200 – а; изделие Ø450x700 – б
Fig. 4. Product Ø500x1200 (a), product Ø450x700 (b)

К недостаткам процесса Ан.Окс.тв можно отнести:

1. Крайнюю степень зависимости качества получаемых плёнок от химического состава алюминиевого сплава. На одних и тех же режимах обработки разные сплавы

формируют разные по качеству и свойствам плёнки.

2. Относительно высокую энергоёмкость процесса на конечном этапе обработки (до 15...48 кВт/м²).

3. Необходимость проведения процесса при низких температурах ($-8...-5^{\circ}\text{C}$) в режиме точного термостатирования $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

4. Относительно высокую длительность процесса от 30 до 90 минут в обычном режиме в зависимости от требуемых свойств и до 180 минут при обработке крупногабаритных изделий (для больших деталей применяется коэффициент уменьшающий ток и увеличивающий время обработки).

Материалы, модели, эксперименты и методы

Альтернативным методом создания на поверхности деталей слоя окислов является процесс микродугового оксидирования. Предложенный еще в 1969 году, но до сих пор не нашедший широкого практического применения.

Несмотря на научные публикации по исследованию этого метода [6–8] технологический процесс микродугового оксидирования до сих пор не вышел на конкретные практические рекомендации, что затрудняет его промышленное применение.

Имеющиеся литературные данные об условиях, режимах протекания процесса, состава и концентрации электролита весьма противоречивы.

Так, например, в одних источниках рекомендуется проводить процесс на растворах органических кислот, таких как лимонная, борная или щавелевая на постоянном токе высокого напряжения $U=380...600\text{ В}$ [6], а в других – на электролите, состоящем из дистиллированной воды с добавлением KOH и Na_2SiO_3 различной концентрации при импульсном или переменном токе частотой 50 Гц при напряжении $U=220...1000\text{ В}$ [7].

Приводятся данные о возможности применения переменного тока, постоянного тока, импульсного тока. Однако все приводимые данные свидетельствуют о применении источников тока высокого напряжения вплоть до 1000 В. При этом указывается о возможности создания окисных покрытий толщиной до 400 мкм, причем не отмечается их функциональное назначение и примеры применения таких толстых покрытий.

5. Необходимость в автоматическом оборудовании отслеживания отклонений режима анодирования. В случае отсутствия такого оборудования многократно возрастает вероятность безвозвратной утери детали в случае концентрирования локальных флуктуаций плотности тока на интерметаллидных кристаллах в сплавах на основе легирующих добавок (медь, кремний и др.).

Практическое применение процесса требует определения параметров, при которых процесс направлен на создание покрытия, имеющего заданное назначение, протекает стабильно, известна зависимость его результатов от управляющих параметров.

Поэтому дополнительно были проведены лабораторные исследования, основанные на имеющихся литературных рекомендациях и для определенной области практического применения для деталей небольших габаритов (менее 100 мм) и покрытий толщиной до 0,05 мм.

При этом задачами исследования были:

- определить подходящий электролит для реализации процесса, отличающийся высокой экологичностью, низкой стоимостью и достаточной производительностью;
- определить простой и доступный источник электрического тока для реализации процесса;
- определить рациональные режимы обработки, позволяющие получать покрытия заданной толщины за приемлемое время;
- определить зависимость толщины покрытия от времени обработки;
- определить свойства образующегося покрытия;
- проанализировать изменение шероховатости поверхности.

В качестве источника тока был выбран переменный ток промышленной частоты напряжением 220 В, как наиболее доступный в любых производственных условиях.

Результаты

Было установлено, что процесс оксидирования устойчиво происходит в растворе натриевой соли кремниевой кислоты (техническое жидкое стекло) при концентрации 160 г/л.

При обработке в этой среде плотность тока значительно ниже, чем при обработке в растворах органических кислот (лимонная кислота), а скорость нарастания покрытия выше. При обработке на других рекомендованных электролитах органических кислот – борной, щавелевой и уксусной, процесс образования микродуг и последующая обработка не происходит. Это видимо связано с низким напряжением источника тока. Было отмечено, что при оксидировании в растворе концентрированного технического жидкого стекла не происходит выделения каких-либо газов, кроме испарения электролита.

При реализации этого процесса возникает явление искрового пробоя образующейся пленки окислов, при этом канал пробоя зарастает образующимися окислами таким образом, что следующий пробой происходит в месте, где пленка окислов наиболее тонкая. Визуально обрабатываемая поверхность покрыта перемежающи-

мися светящимися искровыми разрядами, которые автоматически возникают в местах более тонкой пленки, что и обеспечивает ее в конечном результате равномерную толщину. Процесс при этих условиях носит искровой характер и название его в этом случае как микродуговой представляется не корректным, а его можно было бы характеризовать как электролитно-искровой. На образующейся поверхности окислов при увеличении видны следы заполненных окислами кратеров искрового пробоя (рис.5,а). Поэтому данный процесс следует относить и к электрофизическим и к электрохимическим. Так как электрический пробой происходит между электролитом и поверхностью алюминиевого сплава, то покрытие происходит равномерно на всех поверхностях контакта заготовки с электролитом, что позволяет покрывать и внутренние поверхности (рис.5,б). Таким образом, принцип образования оксидной пленки на поверхности сплава принципиально отличается от анодного оксидирования, что подтверждается и исследованием свойств таких покрытий [9,10].

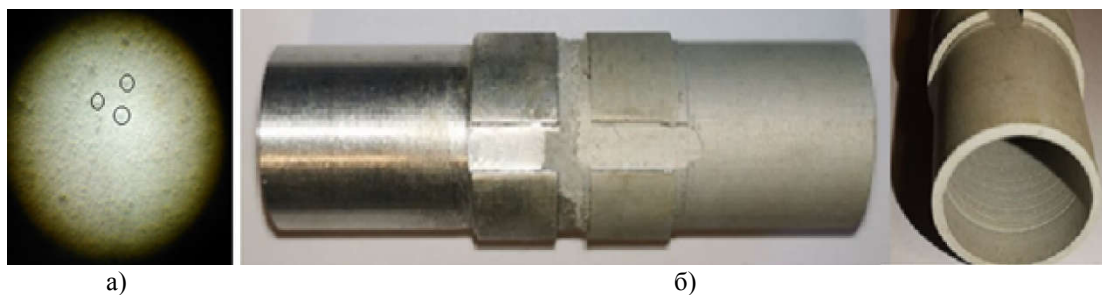


Рис. 5. Поверхность с кратерами искрового пробоя – а; вид покрытой поверхности сплава АМг6 – б
Fig. 5. Surface with spark breakdown craters (a) and view of the coated surface of AMg6 alloy (b)

Особенностью протекания процесса микродугового оксидирования являются условия протекания электрического тока. В начальный момент времени сила тока может быть весьма высока, что связано с первоначальным отсутствием окисной пленки и малым сопротивлением в электрической цепи. Это требует применять источник тока с ограничением величины тока в начале процесса. По мере образова-

ния пленки окислов сопротивлению резко увеличивается, и сила тока падает, стабилизируясь около значения $0,1 \text{ А/см}^2$ (рис. 6).

Как оказалось, при этих условиях увеличение размера заготовки за счет образования оксида быстро вырастает до 0,04мм (рис. 7) после чего дальнейшее увеличение ее толщины покрытия не происходит независимо от марки обрабатыва-

емого материала. Это связано с малой величиной напряжения, недостаточного для пробоя более толстой пленки.

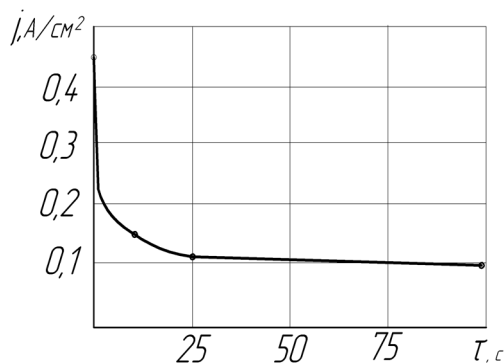


Рис.6. Зависимость плотности тока от времени оксидирования.

Na_2SiO_3 . $n=160$ г/л, $U=220$ В

Fig. 6. Current density as a function of oxidation time.

Na_2SiO_3 . $n=160$ g/l, $U=220$ V

При этом отмечается, что пленка оксида нарастает как от номинальной поверхности наружу, так и внутрь путем превращения слоев металла в оксид.

В то же время надо отметить, что глубокое оксидирование деталей из алюминиевых сплавов по функциональному назначению и не требует большей глубины оксидного слоя, а при требуемой большей его толщине неизбежно повышение напряжения питания, иногда даже до 1000 В.

Заключение

1. Существующие методы анодного оксидирования поверхности деталей из алюминиевых сплавов позволяют получать твердые, толщиной до 0,4 мм покрытия, отличающиеся высокой пористостью.

2. Для получения защитного покрытия пористость заполняют различными методами, целесообразность и надежность каждого из них может подтверждаться результатами эксплуатации в тех или иных условиях.

3. Процессы анодного оксидирования весьма энергоемки и продолжительны и применение конкретного вида покрытия должно быть функционально и экономически обосновано.

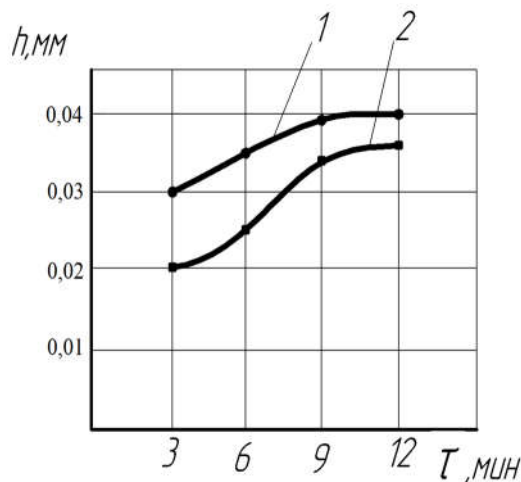


Рис.7. Зависимость толщины слоя покрытия от номинальной поверхности заготовки во времени обработки на разных материалах. 1 – АМг2; 2 – Д16

Fig. 7. Dependence of the coating layer thickness on the nominal surface area of the workpiece over the processing time on different materials. 1 – AMg2; 2 – D16

Было установлено, что при покрытиях в указанных диапазонах толщин шероховатость поверхности сохраняется на исходном уровне, а предложенные условия реализации процесса электролитно-искрового оксидирования позволяют получать на деталях из алюминиевых сплавов оксидные пленки высокой твердости толщиной более 0,04 мм за время, не превышающее 12 минут, при этом требуется стадий процесса не более 3-х (промывка, обработка, промывка).

4. В настоящее время отсутствуют обобщенные накопленные эксплуатационные данные о целесообразности применения тех или иных оксидных покрытий и методах их модификации на деталях из алюминиевых сплавов.

5. Существуют новые методы электрофизического покрытия (микродугового), находящиеся в стадии практического применения, отличающиеся большей производительностью и простотой оборудования.

6. Широкое применение микродугового оксидирования сдерживается из-за отсутствия конкретных технологических рекомендаций об условиях реализации

процессов обработки, о связи этих условий со свойствами покрытий, накопленного

опыта в рациональных областях применения и результатах их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9.305-84. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий. Межгосударственный стандарт. Единая система защиты от коррозии и старения. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 14.12.84 №4424
2. Н.Д. Томашов, М.Н. Тюкина, Ф.П. Заливалов. Толстослойное оксидирование алюминия и алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1968. 157.
3. Мирзоев Р. А. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов : учеб.пособие / Р. А. Мирзоев, А. Д. Давыдов. СПб. :Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 382 .
4. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов для получения качественных гальванических покрытий/ Девяткина Т.И., М.М. Спасская М.М., Москвичев А.Н. [и др.] ; Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. Нижний Новгород, 2013, №4
5. Скопинцев В.Д. Развитие технологии анодного оксидирования алюминия и его сплавов / Скопинцев В.Д., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. // Гальванотехника и обработка поверхности, т.27,2, 2019.

6. Жуковский А. В. Технология и оборудование упрочнения поверхностей деталей методом микродугового оксидирования / Жуковский А. В., Морозов Е. М., Шандров Б. В. М.: МГТУ «МАМИ», 2011. 130с.;
7. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом/ Ракоч А.Г., Хохлов В.В., Баутин В.А. [и др.] // Защита металлов. 2006. Т. 42, № 2. С. 173-184.
8. Изучение микродугового оксидирования алюминия, модифицированного частицами карбида кремния / М. А. Марков М.А., С. Н. Перевислов С.Н., А. В. Красиков А.В. [и др.] // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91. Вып. 4
9. Коррозионная стойкость сплава Д16 с оксидно-керамическими покрытиями, полученными методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах/ Хохлов В.В., Жаринов П.М., Ракоч А.Г. [и др.] // Коррозия: Материалы, Защита. 2007. № 4. С. 23-27.
10. Пономарев И. С. Механические характеристики оксидированной поверхности при различных режимах оксидирования/ Пономарев И. С., Кривоносова Е. А., Горчаков А. И. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 469-472.

REFERENCES

1. GOST 9.305-84. Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Technological process operations for coating production. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 2003
2. Tomashov ND, Tyukina MN, Zalivalov FP. Thick-layer oxidation of aluminum and aluminum alloys. Moscow: Mashinostroenie; 1968.
3. Mirzoev RA, Davydov AD. Anodic processes of electrochemical and chemical processing of metals: textbook. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic University; 2013.
4. Devyatkina IN, Spasskaya MM, Moskvichev AN. Anodic oxidation of aluminum and its alloys for obtaining high-quality electroplating. Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. 2013;4(1):109-114.
5. Skopintsev VD, Margolin LN, Farafonov VV. Development of the technology of anodic oxidation of aluminum and its alloys. Electroplating and Surface Treatment. 2019;27(2).
6. Zhukovsky AV, Morozov EM, Shandrov BV. Technology and equipment for hardening surfac-

es of parts by microarc oxidation. Moscow: MSTU "MAMI"; 2011.

7. Rakoch AG, Khokhlov VV, Bautin, VA. Model concepts of microarc oxidation of metallic materials and control of this process. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2006;42(2):173-184.
8. Markov MA, Perevislov SN, Krasikov AV. Study of microarc oxidation of aluminum modified with silicon carbide particles. Russian Journal of Applied Chemistry. 2018;91(4).
9. Khokhlov VV, Zharinov PM, Rakoch AG. Corrosion resistance of D16 alloy with oxide-ceramic coatings obtained by microarc oxidation in silicate electrolytes. Corrosion: Materials, Protection. 2007;4:23-27.
10. Ponomarev IS, Krivonosova EA, Gorchakov AI. Mechanical characteristics of an oxidized surface under various oxidation modes. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013;15(6-2):469-472.

Информация об авторах:

Захаров Сергей Владимирович – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Гальванза», тел. 89006241050.

Zakharov Sergey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, General Director at LC Galvanza; phone: 89006241050.

Коротких Михаил Тимофеевич – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, тел. 89516532871.

Korotkikh Mikhail Timofeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; phone: 89516532871.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 27.04.2026; одобрена после рецензирования 07.07.2026; принята к публикации 27.07.2026. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 27.04.2026; approved after review on 07.07.2026; accepted for publication on 27.07.2026. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.