

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК: 621.794.61
doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-87-93

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ
С ОКСИДОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ,
ПОЛУЧЕННЫМИ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

Алексей Олегович Кривенков^{1✉}, Виктор Михайлович Батрашов², Илья Викторович Киселев³, Антон Алексеевич Акимов⁴

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

² shift150887@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

³ kisvikil@yandex.ru

⁴ fanfcban@mail.ru

Аннотация

Целью исследования является оценка влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на теплофизические свойства (коэффициент теплопроводности) МДО-покрытий, полученных на образцах из титанового (BT20) и алюминиевого (Д16) сплавов. Задача исследований: установление взаимосвязи характеристик МДО-покрытия (толщины, пористости, состава), вида электролита с коэффициентом теплопроводности получаемых оксидокерамических покрытий. Для формирования оксидных покрытий на поверхности экспериментальных образцов из сплавов BT20 и Д16 использовали запатентованную технологию микродугового оксидирования. Новизна работы заключается в применении

оригинальных технических решений, позволяющих создавать композиционные металлические материалы с оксидокерамическим покрытием микродуговым оксидированием. Исследования установили, что разработанные материалы являются эффективными и позволят расширить области возможного применения традиционных конструкционных материалов и изделий из них. Актуальным направлением в области создания материалов с высокими теплоизоляционными свойствами является микродуговое оксидирование (МДО).

Ключевые слова: режимы оксидирования, композиционный материал, раствор, электролит, МДО-покрытие, коэффициент, теплопроводность.

Ссылка для цитирования:

Кривенков А.О. Теплопроводность материалов с оксидокерамическими покрытиями, полученными микродуговым оксидированием / А.О. Кривенков, В.М. Батрашов, И.В. Киселев, А.А. Акимов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 12. – С. 87-93. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-87-93.

Original article
Open Access Article

**THERMAL CONDUCTIVITY OF MATERIALS
WITH OXIDE-CERAMIC COATINGS, OBTAINED
BY MICROARC OXIDATION**

Aleksey Olegovich Krivenkov^{1✉}, Viktor Mikhailovich Batrashov², Ilya Viktorovich Kiselev³, Anton Alekseevich Akimov⁴

^{1,2,3,4,5} Penza State University University, Penza, Russia

¹ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

² shift150887@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

³ kisvikil@yandex.ru

⁴ fanfcban@mail.ru

Abstract

The study objective is to evaluate the influence of the technological parameters of microarc oxidation on the thermophysical properties (thermal conductivity coefficient) of MAO coatings obtained on samples of titanium (VT20) and aluminum (D16) alloys. The study task is to find the interconnections between the characteristics of MAO coating (thickness, porosity, composition), the type of electrolyte, and the thermal conductivity coefficient of the resulting oxide-ceramic coatings. A patented microarc oxidation technology was used to form oxide coatings on the surface of experimental samples made of VT20 and D16 alloys. The

novelty of the work is in the application of original technical solutions that make it possible to create composite metal materials with an oxide-ceramic coating by microarc oxidation. The study shows that the developed materials are effective and will expand the scope of possible applications of traditional structural materials and products made from them. A relevant area in the field of creating materials with high thermal insulation properties is microarc oxidation (MAO).

Keywords: oxidation modes, composite material, solution, electrolyte, MAO coating, coefficient, thermal conductivity.

Reference for citing:

Krivenkov AO, Batrashov VM, Kiselev IV, Akimov AA. Thermal conductivity of materials with oxide-ceramic coatings obtained by microarc oxidation. *Transport Engineering*. 2025;12:87-93. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-87-93.

Введение

Такие конструкционные материалы, как алюминий, титан и сплавы на их основе применяются в различных областях производства. Изделия из указанных материалов часто работают в тяжелых условиях эксплуатации, в том числе в условиях воздействия значительных тепловых нагрузок. Известно, что оксиды алюминия и титана, по сравнению с чистыми металлами, обладают низкой теплопроводностью и достаточной стойкостью к высоким температурам, что позволяет использовать их, например, для получения высокоогнеупорных изделий, жаростойких эмалей, тугоплавких стекол, для элементов теплообменной аппаратуры, для футеровки сталеразливочных ковшей и различных огнеупорных деталей в процессе непрерывной разливки стали [1, 2]. В этой связи, актуальным является разработка технического решения, обеспечивающего повышение теплозащитных свойств указанных выше материалов. Авторами разработки предла-

гается использовать технологию микродугового оксидирования (МДО) для решения указанной ранее проблемы. МДО обеспечивает формирование на поверхности исследуемых образцов оксидных покрытий различной толщины, пористости и состава, наличие которых, благодаря их низкой теплопроводности, должно предупреждать перегрев металлической основы изделия. Указанные характеристики МДО-покрытий зависят от состава применяемого электролита и режимов МДО экспериментальных образцов. Рентгеноструктурным анализом установлено, что МДО-покрытия, полученные в разработанных электролитах, состоят из оксидов алюминия, титана, кремния, стеклофаз и соединений, входящих в состав электролита [3, 4]. Технология МДО позволяет, варьируя режимы обработки, изменять состав, толщину и пористость формируемых покрытий, а, следовательно, изменять теплопроводность материала в целом.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Конструкционные материалы на основе сплавов алюминия (Д16, АМГ, В95 и пр.) и титана (ВТ1-0, ВТ20, ВТ23 и пр.) применяются в различных областях производства и часто, благодаря их высокому комплексу свойств, изделия из указанных материалов работают в тяжелых условиях эксплуатации (высокая температура, наличие агрессивной среды и т.д.). Для дополнительного повышения эксплуатационных характеристик изделий из указанных спла-

вов их надежности и долговечности проводятся работы по модифицированию их поверхности и созданию эффективных защитных покрытий, которые позволяют расширить область применения и условия эксплуатации данных сплавов [4-6].

Решением данной задачи может стать создание композиционного материала с защитным оксидокермическим покрытием с регулируемой толщиной и пористостью с использованием современной и эф-

фективной технологии микродугового оксидирования. Покрытия получали микродуговым оксидированием в разработанных водных растворах электролитов, со-

ставы которых приведены в табл. 1, 2. В качестве экспериментальных образцов для МДО выбрали квадратные пластины толщиной 2 мм, размер пластин 20×20 мм.

Таблица 1

Электролиты для МДО титанового сплава VT20

Table 1

Electrolytes for MAO of titanium alloy VT20

Электролит	Концентрация компонентов электролита, г/л					
	K ₂ SiO ₃	KOH	Al ₂ (SO ₄) ₃	Na ₂ SO ₄	Na ₂ BO ₇	C ₂ H ₂ O ₄
Раствор 1	8...10	3...5	–	–	–	–
Раствор 2	–	–	35...40	8..10	3...5	–
Раствор 3	–	–	–	–	–	40...45

Таблица 2

Электролиты для МДО алюминиевого сплава Д16

Table 2

Electrolytes for MAO of aluminum alloy D16

Электролит	Концентрация компонентов электролита, г/л			
	K ₂ SiO ₃	KOH	H ₃ BO ₃	C ₂ H ₂ O ₄
Раствор 1	10...20	3...5	–	–
Раствор 2	–	–	15...20	–
Раствор 3	–	–	–	15...20

Экспериментальные образцы подвергали МДО в разработанных электролитах на различных токовых режимах. Режимы МДО экспериментальных образцов из титанового и алюминиевого сплавов приведены в табл. 3, 4. После МДО покрытия

образцы промывали в дистиллированной воде и просушивали при температуре 50...60 °С в течение 10...15 мин. Количество образцов каждой серии составляло 5 шт.

Таблица 3

Режимы МДО экспериментальных образцов из сплава VT20

Table 3

MAO modes of experimental samples made of VT20 alloy

Электролит	Время τ, мин	Режимы МДО			
		Плотность тока, А/дм ²	Напряжение, В	Температура электролита, °С	Род тока
Раствор 1	40...60	15...18	470...520	20...30	Перемен.
Раствор 2	25...30	5...10	390...420	20...25	Постоян.
Раствор 3	50...60	2...3	330...350	15...20	Постоян.

Таблица 4

Режимы МДО экспериментальных образцов из сплава Д16

Table 4

MAO modes of experimental samples made of D16 alloy

Электролит	Время τ, мин	Режимы МДО			
		Плотность тока, А/дм ²	Напряжение, В	Температура электролита, °С	Род тока
Раствор 1	45...60	18...20	480...490	20...30	Перем.
Раствор 2	90...120	4...6	130...140	15...20	Перем.
Раствор 3	60...90	1...2	320...370	15...20	Постоян.

В результате проведенных исследований выполнена оценка коэффициента теплопроводности полученного оксидокерамического покрытия на поверхности образцов из сплавов титана (BT20) и алюминия (D16). Установлена взаимосвязь между коэффициентом теплопроводности, толщиной, пористостью и составом покрытий, полученных в различных электролитах. Для определения толщины оксидных слоев изготавливали микрошлифы на поперечных срезах образцов, обработанных МДО в различных электролитах. Измерение толщины выполняли по стандартной методике на прямом металлографическом микроскопе модульной конструкции с цифровой камерой Альтами MET 6С. Пористость оксидных покрытий оценивали на экспериментальных образцах, полученных МДО в различных электролитах и на различных режимах, по ГОСТ 9.302-88 с использова-

нием метода оценки степени окраски при взаимодействии с реагентом. Оценку коэффициента теплопроводности проводили по стандартной методике с использованием измерителя теплопроводности LFA 427/7/G по методу лазерной вспышки. При оценке коэффициента теплопроводности покрытий, полученных МДО на сплаве BT20, учитывали значительную разницу коэффициентов термического расширения металла и оксидного слоя. В этой связи, образцы на основе сплава BT20 нагревали до температуры не более 780...800 °С, что не вызывало растрескивания и отслоения оксидного слоя от материала подложки. Образцы из сплава D16 при оценке коэффициента теплопроводности МДО-покрытий нагревались до температуры 440...450 °С, что не вызывало оплавления границ зерен металла подложки.

Результаты

Результаты изменения толщины покрытий, полученных МДО в различных электролитах, приведены в табл. 5, 6. Результаты исследования коэффициента теп-

лопроводности композитов на основе титана BT20 и алюминия D16, полученных МДО в разработанных водных растворах электролитов, приведены на рис. 1, 2.

Таблица 5

Значения толщины оксидных покрытий на сплаве BT20

Table 5

Thickness values of oxide coatings on VT20 alloy

Характеристика МДО-покрытия	Силикатно-щелочной				Сульфатный электролит				Щавелевокислый			
	Режимы МДО											
	$j=16 \text{ A/дм}^2, t=25 \text{ }^\circ\text{C}$				$j=8 \text{ A/дм}^2, t=20 \text{ }^\circ\text{C}$				$j=2 \text{ A/дм}^2, t=20 \text{ }^\circ\text{C}$			
	Время МДО τ , мин											
	10	20	40	60	5	10	20	30	10	20	40	60
Толщина δ , мкм	10...12	18...20	34...36	62...65	12...14	22...25	46...48	78...82	2...3	7...9	14...16	20...22

Таблица 6

Значения толщины оксидных покрытий на сплаве D16

Table 6

Thickness values of oxide coatings on D16 alloy

Характеристика МДО-покрытия	Силикатно-щелочной				Борный электролит				Щавелевокислый			
	Режимы МДО											
	$j=18 \text{ A/дм}^2, t=25 \text{ }^\circ\text{C}$				$j=5,0 \text{ A/дм}^2, t=20 \text{ }^\circ\text{C}$				$j=2 \text{ A/дм}^2, t=20 \text{ }^\circ\text{C}$			
	Время МДО τ , мин											
	10	20	40	60	20	40	60	80	10	20	40	60
Толщина δ , мкм	18...20	34...38	60...64	100...110	4...5	10...12	18...20	30...32	5...7	12...15	24...26	36...40

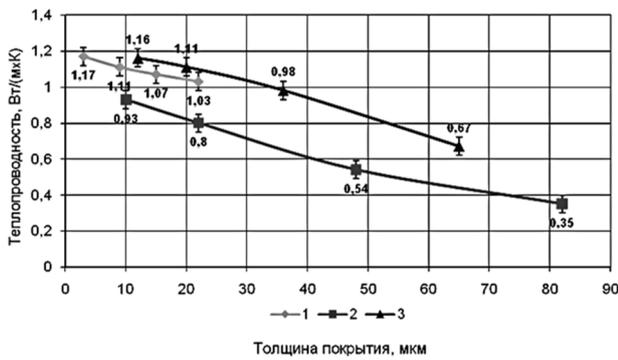


Рис. 1. График зависимости коэффициента теплопроводности от толщины МДО-покрытий, полученных на образцах из титана VT20 в щавелевокислом (1), сульфатном (2), силикатно-щелочном (3) электролитах

Fig. 1. Graph of the dependence of the thermal conductivity coefficient on the thickness of MAO coatings obtained on VT20 titanium samples in oxalic acid (1), sulfate (2), and silicate-alkaline (3) electrolytes

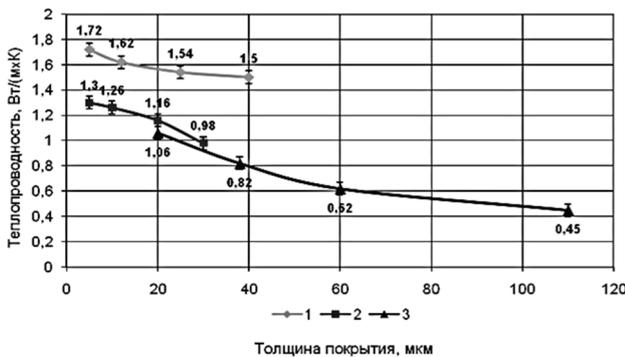


Рис. 2. График зависимости коэффициента теплопроводности от толщины МДО-покрытий, полученных на образцах из алюминия D16 в щавелевокислом (1), борном (2), силикатно-щелочном (3) электролитах

Fig. 2. Graph of the dependence of the thermal conductivity coefficient on the thickness of MAO coatings obtained on D16 aluminum samples in oxalic acid (1), boric acid (2), and silicate-alkaline (3) electrolytes

Проведенный комплекс исследований позволил установить, что для обоих типов композитов с оксидными покрытиями, сформированными в щавелевокислом электролите характерно получение аморфного оксидного покрытия, обладающего низкой пористостью (1...2 %) и сравнительно небольшой толщиной (до 36...40 мкм) [3]. Для данных типов покрытий наблюдается незначительное изменение коэффициента теплопроводности с увеличением времени обработки (λ

1,17...1,03 Вт/(м·К) – для VT20 и 1,72...1,5 Вт/(м·К) – для D16).

Установлено, что для композита на основе сплава VT20 с оксидными покрытиями, сформированными в сульфатном электролите, характерно получение покрытий, состоящих из кристаллических модификаций диоксида титана TiO_2 (анатаз, рутил) и оксида алюминия $\alpha-Al_2O_3$ (корунд) [3], [4]. Исследования установили, что увеличение времени МДО приводит к росту толщины и пористости формируемого покрытия, что приводит к снижению коэффициента теплопроводности материала. Для данного типа покрытия наблюдается существенное снижение коэффициента теплопроводности с увеличением времени обработки (λ 0,93 Вт/(м·К) – при минимальных значениях толщины покрытия 10...12 мкм и пористости 2...3% и 0,35 Вт/(м·К) – при толщине 78...82 мкм и пористости 8...10%).

Установлено, что оксидные покрытия, полученные МДО в силикатно-щелочном электролите, на образцах из сплавов VT20 и D16 состоят из стеклофаз на основе силикатов алюминия и титана и обладают низким коэффициентом теплопроводности λ [3]. Установлено, что данные МДО-покрытия имеют максимальную толщину и значительную пористость (толщина 62...65 мкм, пористость 10...12% - для VT20 и толщина 100...110 мкм, пористость 12...14% - для D16). Коэффициент теплопроводности при этом составляет λ 0,67 Вт/(м·К) – для VT20 и λ 0,45 Вт/(м·К) – для D16.

Установлено, что для композита на основе сплава D16 с оксидными покрытиями, сформированными в борном электролите, характерно получение покрытий, состоящих из кристаллических модификаций оксида алюминия [3]. Исследования установили, что при толщине оксидного слоя 30...32 мкм пористость составляет 3...4 %. Для данного типа покрытия наблюдается незначительное снижение коэффициента теплопроводности с увеличением времени обработки (λ 1,3 Вт/(м·К) – при толщине покрытия 4...5 мкм и пористости 1...2 % и 0,98 Вт/(м·К) – при толщине 30...32 мкм и пористости 3...4 %).

Заключение

Установлено, что в результате МДО титанового (BT20) и алюминиевого (D16) сплавов на поверхности формируются оксидные покрытия, имеющие существенно более низкий коэффициент теплопроводности λ по сравнению с основным материалом (BT20 – $\lambda \sim 15,1$ Вт/(м·К); D16 – $\lambda \sim 130$ Вт/(м·К)). Проведенный комплекс ис-

следований подтвердил эффективность применения микродугового оксидирования для получения оксидокерамических материалов с высокими теплоизоляционными характеристиками, что позволит существенно расширить диапазон функциональных свойств указанных материалов в условиях теплового воздействия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
2. Krishtal M.M. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing / M.M. Krishtal // *Advanced Materials Research*, 2009, Vol. 59, 204–208.
3. Казанцев И.А., Кривенков А.О. Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием: монография / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007. 240 с.
4. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.

5. Шандров, Б. В. Основы технологии микродугового оксидирования: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150200 - "Машиностроительные технологии и оборудование", специальности 050206 - "Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов" / Б.В. Шандров, Е.В. Морозов, А.В. Жуковский. Москва: Альянс, 2008. 76 с.
6. Казанцев И.А., Кривенков А.О., Чугунов С.Н., Крюков Д.Б. Теплофизические свойства материалов, полученных микродуговым оксидированием / *Thermophysical properties of microarc oxide coated materials* // *Материаловедение*, изд-во «Наука и технологии». 2011 г. №3. С. 22–27.

REFERENCES

1. Grigoriev IS, Meilikhov EZ, editors. Physical quantities. Moscow: Energoatomizdat; 1991.
2. Krishtal MM. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing *Advanced Materials Research*. 2009;59:204-208.
3. Kazantsev IA, Krivenkov AO. Technology for obtaining composite materials by micro-arc oxidation: monograph. Penza: Information and Publishing Center of PSU; 2007.

4. Suminov IV, Epelfeld AV, Lyudin VB, Krit BL, Borisov AM. Microarc oxidation (theory, technology, equipment). Moscow: EKOMET; 2005.
5. Shandrov BV, Morozov EV, Zhukovsky AV. Fundamentals of microarc oxidation technology: textbook for students of higher educational institutions. Moscow: Allians; 2008.
6. Kazantsev IA, Krivenkov AO, Chugunov SN, Kryukov DB. Thermophysical properties of microarc oxide coated materials. *Materialovedenie: Nauka i Tekhnologii*. 2011;3:22-27.

Информация об авторах:

Кривенков Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент. кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел.: 89053652342.

Батрашов Виктор Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент. кафедры КиИМ Пензенского государственного университета, тел.: 89273663056.

Krivenkov Aleksey Olegovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Penza State University, phone: 89053652342.

Batrashov Viktor Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Penza State University, phone: 89273663056.

Киселев Илья Викторович – аспирант кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел.: 89991210346.

Акимов Антон Алексеевич – студент кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел.: 89272874507.

Kiselev Ilya Viktorovich – Postgraduate Student of Penza State University, phone: 89991210346.

Akimov Anton Alekseevich – Student of Penza State University, phone: 89272874507.

**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 24.09.2025; одобрена после рецензирования 27.10.2025; принята к публикации 26.09.2025. Рецензент – Химухин С.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 24.09.2025; approved after review on 27.10.2025; accepted for publication on 27.11.2025. The reviewer is Khimukhin S.N., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.



***В Брянском государственном техническом университете в 2026 году продолжается приём на новую специальность
23.05.03 – Подвижной состав железных дорог,
специализация «Технология производства и ремонта подвижного состава»***

Подготовка предусматривает освоения фундаментальных основ конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог с применением предиктивной аналитики, систем искусственного интеллекта и работы с большими объемами данных. Обучение организовано в интересах крупнейших предприятий в области обслуживания и ремонта подвижного состава таких, как ООО «Локотех», ОАО «РЖД», ООО «Новая вагоноремонтная компания» и другие.

Начиная со второго курса обучения студентам предоставляется возможность оплачиваемой стажировки на структурных подразделениях компаний с целью приобретения практических навыков необходимых для освоения профессий технолога и инженера. В рамках освоения программы значительное внимание уделяется современным методам прогнозирования технического состояния подвижного состава, системам массового обслуживания и ремонта сложных технических систем, прогнозирования фактического состояния ответственных узлов подвижного состава и оценке рисков возникновения аварийных ситуаций.

Приобретённые по программе специалитета компетенции позволят обучающимся стать высококвалифицированными специалистами, которые смогут применить полученные знания и навыки на практике, участвуя в реализации стратегических проектов по развитию железнодорожной инфраструктуры страны.