

Технологические аспекты определения температуры в металле при формировании покрытий методом гетерофазного переноса и микродугового оксидирования

^{*}Ю. А. Кузнецов^a, М. А. Марков^b, ^{**}И. Н. Кравченко^{c,d},
А. В. Красиков^b, С. А. Величко^e, П. В. Чумаков^e, К. В. Кулаков^f

^aФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»,
г. Орёл, 302019, Россия, *e-mail: kentury@yandex.ru

^bНИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
г. Санкт-Петербург, 191015, Россия

^cФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»,
г. Москва, 127550, Россия, **e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

^dИнститут машиноведения имени А.А. Благодирова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
г. Москва, 101990, Россия

^eФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»,
г. Саранск, 430005, Республика Мордовия, Россия

^fФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный университет»,
г. Балашиха, 143907, Московская область, Россия

Поступила в редакцию 05.04.2020

После доработки 15.05.2020

Принята к публикации 18.05.2020

Рассмотрены технологические аспекты оценки температуры в алюминиевом образце при возможном формировании на его поверхности алюминийсодержащего покрытия с использованием комбинированной технологии: холодного газодинамического напыления и микродугового оксидирования. Приведены экспериментальные результаты исследования распределения температурного потока по толщине напыляемой металлической поверхности при холодном газодинамическом напылении. Температура теплового потока при напылении варьировалась от 200 до 600°C. Установлено, что рабочая температура алюминиевой подложки толщиной 8 мм на стандартных тепловых режимах напыления не превышает 120°C, что является одним из преимуществ по сравнению с известными способами плазменного и магнетронного напыления. Дана оценка температурного воздействия микродугового оксидирования на поверхность оксидируемого образца в зависимости от различных технологических режимов. Установлено, что температура поверхности образца, оксидируемого в щелочном электролите с добавками жидкого стекла при плотностях тока 20–30 А/дм², не превышает 90°C, что показывает отсутствие термических превращений.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, метод гетерофазного переноса, холодное газодинамическое напыление, оксидно-керамический слой, комбинированная технология

УДК 62-408.2:519.85

DOI: 10.5281/zenodo.4455849

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс науки и техники в современном мире обуславливает необходимость существенного повышения физико-механических свойств функциональных материалов с целью эффективного расширения области их практического применения.

Наиболее актуальные проблемы и задачи возникают при упрочнении поверхностей алюминиевых деталей, работающих в ответственных узлах механизмов морской и ракетно-авиационной техники. Во многих случаях именно свойства поверхности определяют область использования изделия в целом, его устойчивость к внешнему механическому или химическому воздействию [1–4]. Весьма перспективными для получения защитных покрытий на широком спектре материалов являются методы холодного газодинамического

напыления (ХГДН) и микродугового оксидирования (МДО), а также их комбинирование.

Сущность ХГДН заключается в том, что напыляемые частицы разгоняются до высокой скорости благодаря сверхзвуковому потоку нагретого сжатого воздуха, вследствие чего они осаждаются из-за интенсивной пластической деформации при ударе в твердом состоянии [5–12].

Микродуговое оксидирование относится к электрохимическим процессам и осуществляется в гальванических ваннах. При пропускании тока большой плотности через границу раздела металл-электролит создаются условия, когда на поверхности металла возникают микроплазменные разряды с высокими локальными температурами. Результатом действия разрядов в условиях интенсивного теплоотвода в электролит является формирование тонко-

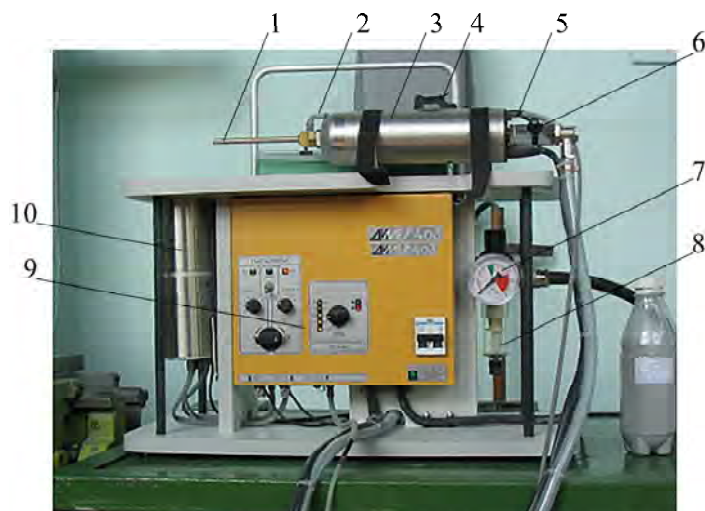


Рис. 1. Установка ДИМЕТ-403: 1 – сопло; 2 – силиконовый переходник; 3 – напылитель; 4 – кнопка подачи порошка; 5 – трубка подачи порошка; 6 – пневмокран; 7 – манометр; 8 – фильтр-регулятор; 9 – блок контроля и управления; 10 – питатель.

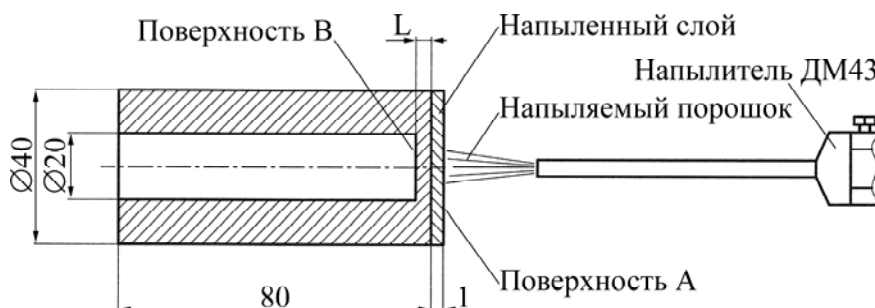


Рис. 2. Схема определения температуры на напыляемой поверхности металла в процессе ХГДН.

слоя оксидно-керамического покрытия с высокой износостойкостью.

Оба метода в той или иной степени приводят к разогреву материала детали, что может отражаться на его структурном состоянии. Особенно это актуально для МДО, при котором температура отдельных микродуг может достигать 6000 К. Поэтому с технологической точки зрения важно знать, как распределяется температурное поле в материале при нанесении покрытий [13–15].

Цель работы – экспериментальная оценка распределения температур при холодном газодинамическом напылении и микродуговом оксидировании на примере алюминиевого сплава А5.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Холодное газодинамическое напыление осуществляли на установке ДИМЕТ-403 (рис. 1). Для напыления использовали алюминиевый порошок А-80-13. Микродуговое оксидирование образцов проводили на установке ИПТ-1000 в электролите состава: КОН – 3 г/л, Na_2SiO_3 – 5 г/л, остальное – дистиллированная вода.

В качестве подложки в обоих случаях использовали пластины из алюминиевого сплава А5.

Для исследования характера распределения температуры по толщине напыляемого образца

при ХГДН было разработано технологическое приспособление (рис. 2).

Согласно представленной схеме (см. рис. 2), напыление происходило на металлическую пластину с заведомо известной толщиной. При этом температура нагрева сжатого воздуха варьировалась от 200 до 600°C, что соответствует стандартным технологическим режимам напыления. Пластина прочно устанавливалась на цилиндрическое металлическое полое основание. С помощью инфракрасного термометра производились замеры температуры одновременно как со стороны напыляемого слоя (поверхность А), так и с обратной стороны подложки (поверхность В). В процессе эксперимента происходила замена пластин-подложек с известными толщинами при фиксированных технологических режимах ХГДН.

Для определения температуры алюминиевого образца в процессе микродугового оксидирования с заданной плотностью тока использовали специальное технологическое приспособление (рис. 3).

Согласно схеме, температура оксидируемого образца цилиндрической формы с заданной толщиной стенки 4 мм определялась с помощью термопары. Термопара устанавливалась с внутренней стороны цилиндрического оксидиру-

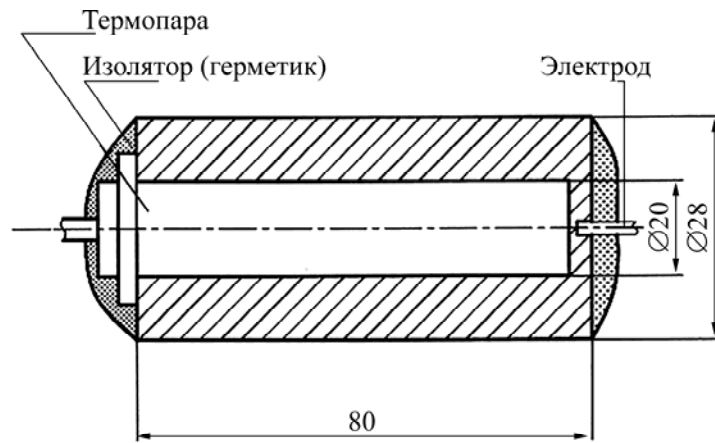


Рис. 3. Схема определения температуры металла в процессе МДО.

Таблица 1. Условия эксперимента

№ опыта	Толщина подложки L , мм	Температура нагрева в напылительном блоке, °С			Давление воздуха в установке ХГДН, МПа
		T_1	T_2	T_3	
1	2	200	400	600	0,7
2	6				
3	10				

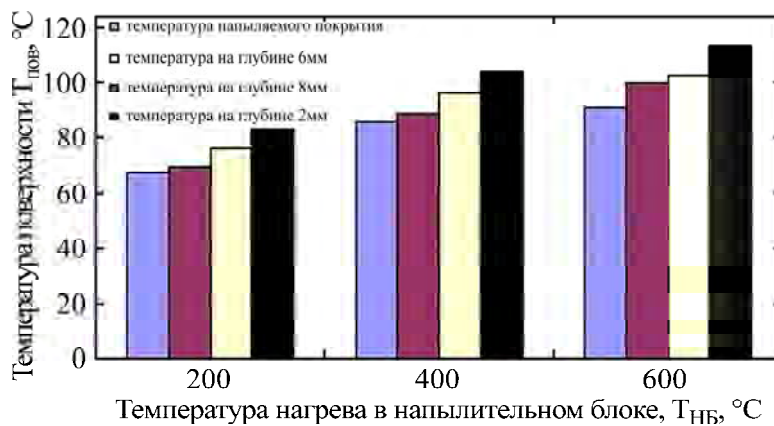


Рис. 4. Распределение температуры при воздействии теплового потока ХГДН на алюминиевый образец в диапазоне толщин 2–6 мм.

емого образца и изолировалась с помощью герметика.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка распределения температуры по толщине подложки в процессе ХГДН

Основные характеристики условий проведения эксперимента представлены в табл. 1.

В результате проведенных исследований дана оценка характеру распределения температуры по толщине напыляемой поверхности алюминиевого образца в диапазоне от 2 до 8 мм (рис. 4).

Анализ полученных данных показал, что температура подложки была существенно ниже, чем на напыляемой поверхности. Вероятно, это следует связать с охлаждением поверхности

из-за наличия сверхзвукового воздушного потока. Наибольшая температура наблюдалась в приповерхностном слое напыляемого объекта, что составляет толщину 2 мм, исходя из условий опыта. Дальнейшее распространение тепла по толщине пластины сопровождается охлаждением. Экспериментально подтверждено, что рабочая температура в процессе ХГДН на примере использования алюминиевой подложки толщиной 8 мм на стандартных тепловых режимах напыления не превышает 120°С. Данный эксперимент позволяет говорить об основном преимуществе ХГДН по сравнению с методами плазменного и магнетронного напыления, согласно которому свойства создаваемых покрытий возможно регулировать, учитывая характеристики исходных порошковых материалов, из-за отсутствия термических эффектов в процессе синтеза покрытий.

Таблица 2. Условия определения температуры на образце в процессе МДО

№ опыта	Плотность тока, А/дм ²	Продолжительность МДО, Т, мин			
		30	60	90	120
1	20	30	60	90	120
2	25				
3	30				



Рис. 5. Определение температуры образца в процессе МДО: 1 – термопровод, передающий температуру на датчик; 2 – подвеска; 3 – образец.

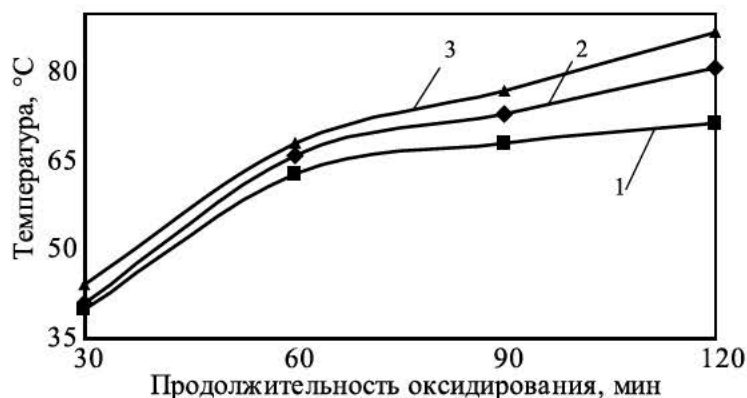


Рис. 6. Зависимость температуры образца в процессе МДО от плотности тока: 1 – 20 А/дм²; 2 – 25 А/дм²; 3 – 30 А/дм².

Оценки температуры металла в процессе микродугового оксидирования

Технологические режимы МДО для осуществления эксперимента представлены в табл. 2.

На рис. 5 показан процесс оксидирования алюминиевого образца с установленной термопарой.

Изменение температуры оксидируемого образца в зависимости от заданной плотности тока при МДО показано на рис. 6. В ходе исследований установлено, что его температура повышается с увеличением продолжительности процесса.

Максимальной температуры нагрева образец достигает при плотности тока около 30 А/дм². Это объясняется тем, что повышение токовых характеристик приводит к быстрому росту толщины покрытия, вследствие чего уменьшается количество плазменных каналов (пор) и увеличиваются мощность и температура возникающих единичных искровых разрядов, приводящих к разогреву оксидируемого образца.

Результаты исследований показали, что температура оксидируемых образцов с толщиной стенки 4 мм на повышенных плотностях тока в диапазоне 20–30 А/дм² не превышает 90°C. Это позволяет говорить об отсутствии возможности термических превращений в оксидируемом материале.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили сделать следующие заключения.

1. Предложен метод оценки температуры теплового потока на металлической поверхности в процессе холодного газодинамического напыления. Экспериментально установлено, что рабочая температура напыляемого образца при холодном газодинамическом напылении на стандартных тепловых режимах не превышает 120°C.

2. Представлен метод оценки температуры изделий при микродуговом оксидировании. Установлено, что температура образцов при микродуговом оксидировании на повышенных

плотностях тока в диапазоне 20–30 А/дм² не превышает 90°C.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Представленный материал получен в рамках реализации гранта РНФ по соглашению № 18-73-00025 (второй год выполнения исследований).

ЛИТЕРАТУРА

1. Markov, M.A., Vyukova, A.D., Krasikov, A.V., Farmakovskii, B.V., et al., Formation of Wear- and Corrosion-Resistant Coatings by the Microarc Oxidation of Aluminum, *Refractories and Industrial Ceramics*, 2018, vol. 5, no. 2. p. 207.
2. Суминов, И.В., Эпельфельд, А.В., Людин, В.Б., Крит, Б.Л., и др., Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование), М.: ЭКОМЕТ, 2005. С 100–105.
3. Kuznetsov, Yu.A., Markov, M.A., Krasikov, A.V., Byustrov, R.Yu., et al., Formation of Wear- and Corrosion-Resistant Ceramic Coatings by Combined Technologies of Spraying and Micro-Arc Oxidation, *Russ. J. Appl. Chem.*, 2019. vol. 92, no. 7, p. 875.
4. Марков, М.А., Красиков, А.В., Быкова, А.Д., Кузнецов, Ю.А., и др., Технологические особенности формирования пористых функциональных керамических покрытий на алюминии методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах, *Сварочное производство*, 2020, № 3, с. 23.
5. Алхимов, А.П., Клинков, С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М., Холодное газодинамическое напыление, Новосибирск: *Физматлит*, 2010. 536 с.
6. Аввакумов, М.Е., Руфицкий, М.В., Надежность и качество покрытия при использовании метода «холодного» газодинамического напыления, *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*, 2013. т. 2, с. 112.
7. Алхимов, А.П., Клинков, С.В., Косарев, В.Ф., Место холодного газодинамического напыления среди газотермических методов нанесения покрытий, Новосибирск: ИТПМ, 1995. 53 с.
8. Геращенко, Д.А., Васильев, А.Ф., Фармаковский, Б.В., Машек, А.Ч., Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий, *Вопросы материаловедения*, 2014, № 1, с. 87.
9. Irissou, E., Legoux, J.-G., Ryabinin, A.N., Jodoin, B., et al., Review on Cold Spray Process and Technology: Part I – Intellectual Property, *Therm. J. Spray Technol.*, 2008, vol. 17, p. 495.
10. Lee, H.Y, Yu, Y.H, Lee, Y.C, Hong, Y.P, et al., Thin Film Coatings of WO₃ by Cold Gas Dynamic Spray: A Technical Note, *Therm. J. Spray Technol.*, 2005, vol. 14, p. 183.
11. Gabel, H., Kinetic metallization compared with HVOF, *Adv. Mater. Proces.*, 2004, vol. 162, p. 47.
12. Cavaliere, P., Cold-Spray Coatings, Recent Trends and Future Perspectives, Ed. Cavaliere, P., Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.
13. Кузнецов, Ю.А., Кравченко, И.Н., Гончаренко, В.В., Глинский, М.А., Особенности механической обработки оксидно-керамических покрытий, полученных плазменно-электролитическим оксидированием, *Технология металлов*, 2017, № 10, с. 18.
14. Yerokhin, A.L., Snisko, A.L., Gurevina, N.L., Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2003, vol. 36, p. 2110.
15. Ракоч, А.Г., Хохлов В.В., Баутин В.А., Лебедева Н.А., и др., Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом, *Защита металлов*, 2006, т. 42, № 2, с. 173.

Summary

The article considers the technological aspects of temperature estimation in an aluminum sample with a possible formation of an aluminum-containing coating on its surface using a combined technology of cold gas dynamic deposition and microarc oxidation. Experimental studies results of the temperature flow distribution over the thickness of the metal surface under cold gas-dynamic spraying are presented. The temperature of the heat flow during spraying varied from 200°C to 600°C. It was found that the operating temperature of an aluminum substrate with a thickness of 8 mm at standard thermal deposition modes does not exceed 120°C, which is one of the advantages of the used here technology over the known methods of plasma and magnetron sputtering. The estimation of the temperature effect of microarc oxidation on the surface of a sample depending on various technological modes is given. It was found that the surface temperature of the sample oxidized in an alkaline electrolyte with liquid glass additives at current densities of 20–30 A/dm² does not exceed 90°C, which shows the absence of thermal transformations.

Keywords: microarc oxidation, heterophase transfer method, cold gas-dynamic deposition, oxide-ceramic layer, combined technology