

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛООТДАЧУ

А. А. Гравин, Ю. В. Литовка

*Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; nagval_89@mail.ru*

Ключевые фразы и фразы: анодирование алюминия; интенсификация теплообмена; электрохимические процессы.

Аннотация: Рассмотрены свойства электролита анодирования алюминия при добавлении нанодисперсных материалов. Исследованы параметры процесса нанесения модифицированных электрохимических оксидированных покрытий для интенсификации теплообмена и выявлены их оптимальные значения.

Обозначения

$C_{\text{УНТ а}}$ – концентрация УНТ «Таунит» в электролите анодирования, мг/л;	m, n – число точек исследуемой площади по горизонтали и вертикали соответственно;
E – оптическая плотность, Б;	R – критерий неравномерности покрытия;
i, j – координаты точки на оксидированной поверхности;	$\delta(i, j)$ – толщина покрытия в данной точке, мкм;
	δ_{\min} – минимальная толщина покрытия, мкм.

Проблема интенсификации теплообменных процессов на элементах химико-технологических схем является актуальной. Решая поставленную задачу, многие исследователи [1 – 3] предлагают различные научные подходы. В работах [4 – 5] предложен принципиально новый метод изменения теплоотдающих свойств поверхностей алюминия, заключающийся в прикреплении множества микротурбулизирующих частиц на теплоотдающие поверхности, используя связывающую среду. При этом в качестве микротурбулизирующих частиц применяют углеродные нанотрубки (УНТ) «Таунит» [6], а в качестве связывающей среды – оксидные электрохимические покрытия. Получены результаты [7] в виде интенсификации теплоотдачи при нанесении на алюминиевые поверхности модифицированных наноматериалом электрохимических оксидных покрытий. При проведении процесса анодирования с добавлением в электролит 600 мг/л УНТ «Таунит» образуются покрытия с наибольшим (по отношению к другим концентрациям) значением коэффициента теплоотдачи (его увеличение у таких покрытий достигает 24 % по отношению к непокрытым поверхностям при скорости потока воздушной среды до 5 м/с). Проведены измерения по классической методике [8] значений коэффициента теплоотдачи модифицированных наноматериалом электрохимических оксидированных покрытий алюминия при естественной конвекции, а также получены результаты, согласующиеся с предыдущими (покрытия, полученные при добавлении в электролит 600 мг/л УНТ «Таунит» имеют значение коэффициента теплоотдачи на 16 % выше, чем у непокрытых поверхностей).

Схема экспериментальной установки определения коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции показана на рис. 1.

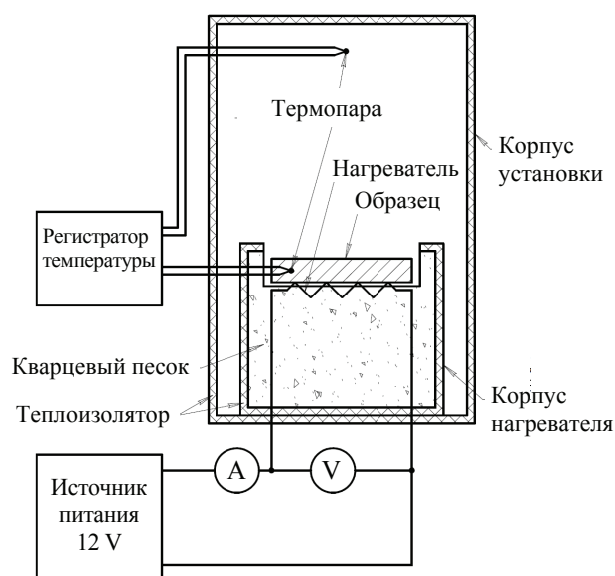


Рис. 1. Схема экспериментальной установки определения коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции

Проведены эксперименты по выявлению изменений, которые происходят с электролитом анодирования алюминия при добавлении УНТ «Таунит» различной концентрации. Исследованы такие параметры электролита, как электропроводность и оптическая плотность. Полученные зависимости приведены на рис. 2 и 3.

На основании разработанного ранее оптического метода измерения концентрации углеродного наноматериала «Таунит» в растворах электролитов [9] использована зависимость значений оптической плотности от концентрации

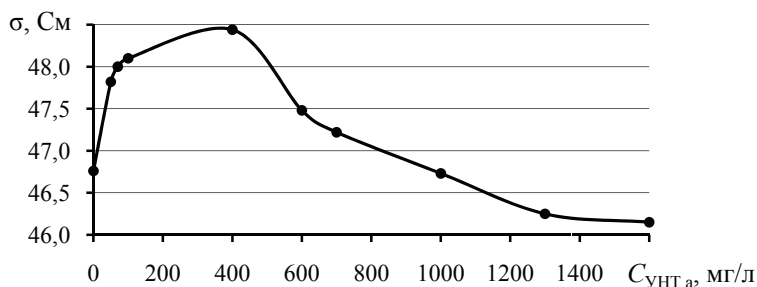


Рис. 2. Зависимость электропроводности от концентрации УНТ «Таунит» в электролите анодирования

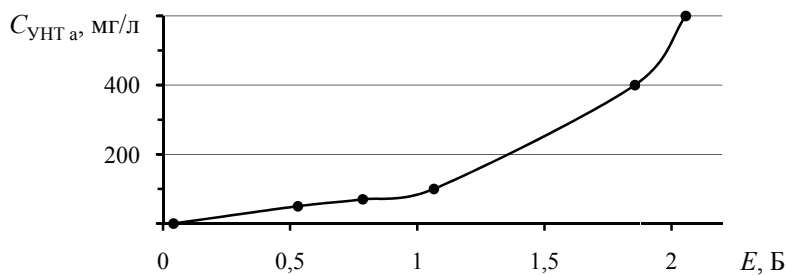


Рис. 3. Зависимость концентрации УНТ «Таунит» в электролите анодирования от его оптической плотности

УНТ «Таунит» в растворе электролита анодирования, которая аппроксимирована выражением

$$C_{\text{УНТ}_a} = 176,86E^2 - 81,81E + 15,71.$$

Полученное выражение применяется для определения текущей концентрации и потребности добавления в раствор дополнительно наноматериала УНТ «Таунит» для поддержания нужной концентрации. Производится измерение значения оптической плотности раствора; далее вычисляется значение текущей концентрации УНТ «Таунит» в электролите; делается вывод о необходимости (или отсутствии необходимости) добавления в электролит порошка УНТ «Таунит».

Проведены исследования параметров процесса анодирования алюминия в целях интенсификации теплообменных процессов. В качестве критериев выбраны коэффициент теплоотдачи α [7] и критерий неравномерности покрытия

$$R = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\delta(i,j) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} \right) \frac{1}{m+n}.$$

Исследованы параметры:

- плотность тока;
- вид дисперсного материала;
- способ распределения в электролите дисперсного материала.

Значение коэффициента теплоотдачи оценивалось при вынужденной конвекции (скоростях обдува поверхностей 1 и 5 м/с).

При исследовании плотности тока за контрольное принято значение 1,5 А/дм², которое чаще всего используется в исследуемом процессе [10]. Также проводились эксперименты при плотности тока 1 и 2 А/дм². На рисунке 4, а и в таблице представлено изменение значения коэффициента теплоотдачи у модифицированных наноматериалом покрытий (концентрация УНТ «Таунит» в электролите анодирования 600 мг/л) по сравнению с чистыми неоксидированными покрытиями. Установлено, что наибольшее изменение значения коэффициента теплоотдачи у поверхностей, полученных путем нанесения модифицированных наноматериалом электрохимических оксидных покрытий при плотности тока

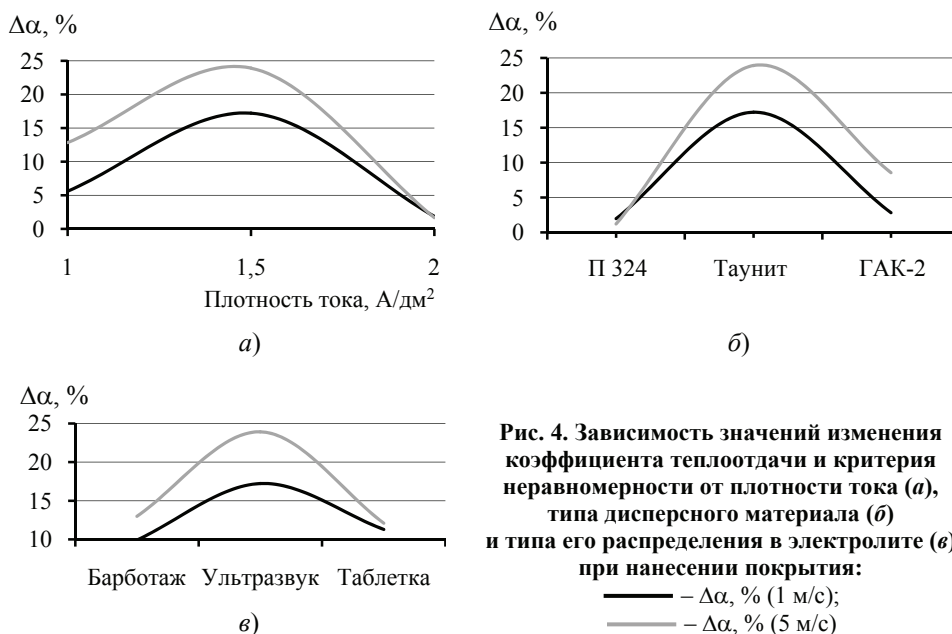


Рис. 4. Зависимость значений изменения коэффициента теплоотдачи и критерия неравномерности от плотности тока (а), типа дисперсного материала (б) и типа его распределения в электролите (в) при нанесении покрытия:

— $\Delta\alpha$, % (1 м/с);
 - - $\Delta\alpha$, % (5 м/с)

**Значения изменения коэффициента теплоотдачи и критерия
неравномерности при нанесении покрытия**

Параметр	Изменение значения коэффициента теплоотдачи, %		R
	1 м/с	5 м/с	
Плотность тока, А/дм ² :			
1	5,60	12,85	4,64
1,5	17,23	23,92	3,09
2	1,88	1,68	2,21
Тип дисперсного материала:			
П 324	1,99	1,21	1,71
УНТ «Таунит»	17,23	23,92	3,09
ГАК-2	2,84	8,57	1,89
Тип распределения:			
барботажное	9,92	12,98	1,92
ультразвуковое	17,23	23,92	3,09
таблетированное	11,28	12,11	2,26

1,5 А/дм²; наименьшее значение критерия неравномерности покрытий получено при 2 А/дм².

В качестве возможной альтернативы добавления в электролит анодирования УНТ «Таунит» исследовано добавление порошков технического углерода П 324 [11] и мелкодисперсного графита ГАК-2 [12]. Значение коэффициента теплоотдачи для полученных поверхностей оказалось меньше, чем при анодировании с использованием УНТ «Таунит» (рис. 4, б, таблица); значение критерия неравномерности ниже у полученных поверхностей. Концентрация всех углеродных материалов в данной серии экспериментов составляла 600 мг/л.

Проведен сравнительный анализ различных видов распределения в электролите нанодисперсного материала УНТ «Таунит». При этом для распределения наноматериала использовалась таблетированная форма добавления в электролит, барботажное перемешивание и ультразвуковая диспергация (см. рис. 4, в, таблица).

Таблетированная форма УНТ «Таунит» [13] представляет собой смесь, %:

- УНТ «Таунит» – 6,3;
- сода – 63,5;
- лимонная кислота – 15,1;
- поливинилпирролидон (ПВВ) – 15,1.

Параметры барботера:

- мощность – 12 Вт;
- производительность – 9 л/мин;
- диаметр отверстий в воздушной трубке – 1 мм;
- давление – 0,012 МПа.

Ультразвуковое распределение проводилась в диспергаторе с частотой 22 кГц. Интенсивность ультразвуковой обработки:

- амплитуда 80 мкм;
- интенсивность звука 786 Вт/см².

Полученные с применением различных способов распределения УНТ «Таунит» растворы анодирования алюминия использованы при нанесении на алюминиевые поверхности модифицированных наноматериалом покрытий. Значение

коэффициента теплоотдачи оказалось максимальным при использовании ультразвукового распределения, значение критерия неравномерности минимально при барботажном перемешивании.

В предыдущих работах [14, 15] экспериментально подтверждена прямая зависимость значения коэффициента теплоотдачи от шероховатости исследуемой поверхности. В описанных выше экспериментах данная зависимость не нарушается.

На рисунке 5 представлены фотографии получившихся поверхностей, сделанные с увеличением $850\times$.

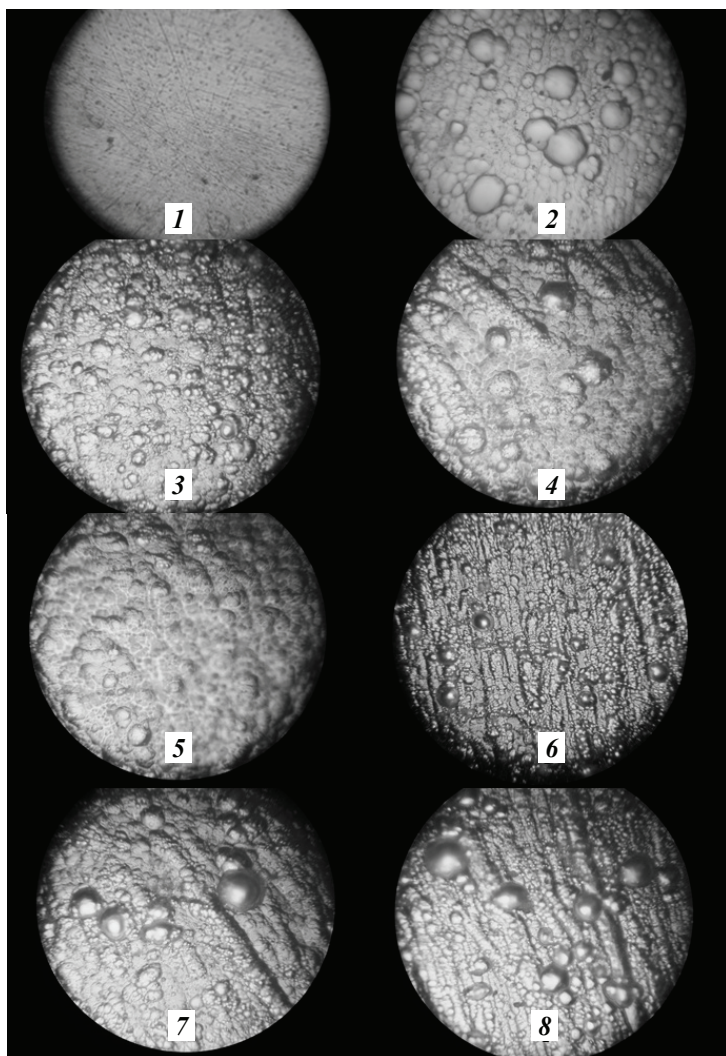


Рис. 5. Фотографии поверхностей без покрытия (1) и с электрохимическим оксидированным покрытием (2 – 8), модифицированным различными материалами (объем модифицирующей добавки – 600 мг/л):

2–4 – УНТ «Таунит» (ультразвуковое распределение, плотность тока при анодировании 1,5; 1; 2 А/дм² соответственно); 5, 6 – технический углерод или мелкодисперсный графит соответственно (ультразвуковое перемешивание, плотность тока при анодировании 1,5 А/дм²); 7, 8 – УНТ «Таунит» (барботажное или таблетированное распределение соответственно, плотность тока при анодировании 1,5 А/дм²)

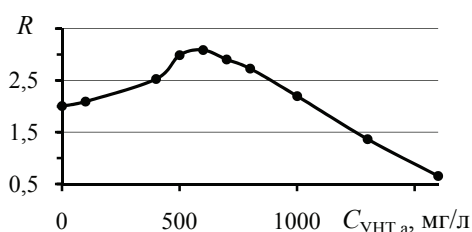


Рис. 6. Зависимость значения критерия неравномерности покрытия от концентрации УНТ «Таунит» в электролите анодирования алюминия

Проведена серия экспериментов по установлению зависимости значения критерия неравномерности покрытия от концентрации УНТ «Таунит» в электролите анодирования. Установлено, что наименьшее значение критерия неравномерности покрытия достигается при концентрации УНТ «Таунит» в растворе анодирования 1600 мг/л (рис. 6).

Выводы

1. Электропроводность и оптическая плотность электролита анодирования изменяются нелинейно (см. рис. 2, 3), что необходимо учитывать при разработке технологии нанесения модифицированных наноматериалом оксидных покрытий алюминия. Значение оптической плотности с помощью разработанного метода позволяет определить значение текущей концентрации УНТ «Таунит» в электролите анодирования.

2. Оптимальная плотность тока при проведении процесса нанесения модифицированных наноматериалом оксидированных покрытий алюминия для повышения теплоотдачи равна 1,5 А/дм². Изменения в большую или меньшую сторону этого значения влечет собой ухудшение качества получаемых покрытий с точки зрения теплоотдающих свойств.

3. Графит и технический углерод не способны заменить в качестве дисперсного материала наноматериал УНТ «Таунит» при проведении процесса нанесения модифицированных оксидированных покрытий алюминия для повышения теплоотдачи. Использование данных материалов ухудшает качество получаемых покрытий с точки зрения теплоотдающих свойств.

4. Оптимальным с точки зрения теплоотдающих получаемых покрытий является метод распределения нанодисперсного материала в электролите анодирования, использующий ультразвуковой диспергатор. Использование барботажного перемешивания и таблетированной формы распределения дали худшие результаты.

5. Критерий неравномерности покрытия достигает своего минимума при нанесении на алюминиевые поверхности модифицированных наноматериалом оксидных покрытий с концентрацией УНТ «Таунит» в электролите анодирования 1600 мг/л.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы при поддержке Государственного контракта № 14.740.11.1372.

Список литературы

1. Письменный, Е. Н. Эффективные теплообменные поверхности из плоско-овальных труб с неполным оребрением / Е. Н. Письменный // Теплоэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 7 – 12.
2. Carbon Nanotube Composites for Thermal Management / M. J. Biercuk [et al.] // Appl. Phys. Lett. – V.80 – 2002 – P. 2767 – 2769.

3. Interface Effect on Thermal Conductivity of Carbon Nanotube Composites / Ce-Wen Nan [et al.] // *Appl. Phys. Let.* – 2004. – V. 85. – P. 3549.
4. Интенсификация теплообмена при нанесении наномодифицированных гальванических покрытий на теплоотдающие поверхности / Ю.В. Литовка [и др.] // *Хим. и нефтегазовое машиностроение.* – 2012. – № 9. – С. 10 – 13.
5. Интенсификация теплоотдачи от поверхностей с наномодифицированными гальваническими покрытиями / Ю.В. Литовка [и др.] // *Тепловые процессы в технике.* – 2013 – Т. 5, № 4. – С. 170 – 176.
6. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачёв. – М. : Машиностроение – 2008. – 320 с.
7. Интенсификация теплоотдачи на алюминиевых поверхностях путем оксидирования их наномодифицированными электролитами / А. А. Гравин [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 928 – 934.
8. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе – М. : Атомиздат. – 1979. – 416 с.
9. Оптические методы измерения концентрации углеродного наноматериала «Таунит» в растворах электролитов / И. А. Дьяков [и др.] // *Завод. лаб. Диагностика материалов.* – 2013. – Т. 79, № 2. – С. 35 – 38.
10. Хенли, В. Ф. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов : пер. с англ. / В. Ф. Хенли. – М. : Металлургия, 1986. – 152 с.
11. ГОСТ 7885–86. Углерод технический для производства резины. Технические условия. – Введ. 1998–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 19 с.
12. ГОСТ 17022–81. Графит. Типы, марки и общие технические требования. – Взамен ГОСТ 17022–76 ; введ. 1982–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 15 с.
13. Пат. 2477341 Российская Федерация, МПК С 25 D 15/00 В 8 2В 1/00. Способ приготовления электролита для получения композиционных покрытий на основе металлов / Ткачёв А. Г., Литовка Ю. В., Пасько А. А., Дьяков И. А., Кузнецова О. А., Ткачёв М. А. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Наногальваника» (ООО «Наногальваника»). – № 2011109524/02 ; заявл. 14.03.2011 ; опубл. 10.03.2013, Бюл. №7 – 7 с.
14. Интенсификация теплообмена за счет изменения шероховатости поверхностей наномодифицированными электрохимическими покрытиями / А. А. Гравин [и др.] // *Нанотехника.* – 2012 – № 4(32). – С. 21 – 24.
15. Гравин, А. А. Изменение шероховатости алюминиевых поверхностей с помощью нанесения наномодифицированных гальванических покрытий / А. А. Гравин // *Мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. «Тенденции и инновации современной науки».* – Краснодар, 2013. – С. 60.

Investigation of the Process of Application of Modified Electrochemical Oxidized Coatings and their Impact on Emissivity

A. A. Gravin, Yu. V. Litovka

*Department “Automated Systems for Decision-Making Support”, TSTU;
dima@simagin.ru; polychem@list.ru; nanogalvanotech@mail.ru*

Key words and phrases: aluminum anodic treatment; electrochemical processes; heat transfer intensification.

Abstract: Chemical properties of the aluminum anodic treatment electrolyte by nanodispersed material addition have been considered. The parameters of the process of applying the modified electrochemical oxidized coatings for the enhancement of heat transfer have been studied; their optimal values have been identified.

**Forschung des Prozesses des Auftragens
der modifizierten elektrochemischen Oxiddeckungen
und ihr Einfluss auf die Wärmeabgabe**

Zusammenfassung: Es sind die Eigenschaften des Elektrolytes des Anodisierens des Aluminiums bei der Ergänzung der nanodispersen Materialien betrachtet. Es sind die Parameter des Prozesses des Auftragens der modifizierten elektrochemischen oxidierten Deckungen für die Intensivierung des Wärmeaustausches untersucht und es sind ihre optimalen Bedeutungen enthüllt.

**Etude du processus de la mise
des revêtements électrochimiques oxydiques
et leur influence sur le transfert thermique**

Résumé: Sont examinées les propriétés de l'électrolyte de l'anodisation de l'aluminium lors de l'addition des matériaux nanodispersés. Sont examinés les paramètres du processus de l'addition des revêtements électrochimiques oxydiques modifiés pour l'intensification du transfert thermique, sont montrées leurs grandeurs optimales.

Авторы: *Гравин Артём Андреевич* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Вигдорович Владимир Ильич* – доктор химических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
