

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООТДАЧИ НА АЛЮМИНИЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПУТЕМ ОКСИДИРОВАНИЯ ИХ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОЛИТАМИ

А.А. Гравин¹, Ю.В. Литовка¹, Е.Н. Туголуков²,
А.Г. Ткачёв², И.А. Дьяков¹, А.Н. Пахомов³

Кафедры: «Системы автоматизированного проектирования» (1);
nagval_89@mail.ru;

«Техника и технологии производства нанопродуктов» (2),
«Технологические процессы и аппараты» (3), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко

Ключевые фразы и фразы: гальванические процессы; интенсификация теплообмена; обратная задача нестационарной теплопроводности; увеличение шероховатости; углеродные нанотрубки.

Аннотация: Рассмотрен способ увеличения шероховатости и интенсификации теплообмена. Подробно обоснована целесообразность использования нанодисперсных материалов для достижения поставленной цели и выявлен положительный результат их применения. Экспериментально проверена гипотеза возникновения данного эффекта.

Обозначения

a – коэффициент температуропроводности материала пластины, м ² /с;	w – скорость воздуха при проведении экспериментов, м/с;
$C_{УНТ}$ – концентрация УНТ «Таунит», мг/л;	w_i – скорость воздуха в i -м эксперименте, м/с;
$C_{УНТ_i}$ – концентрация УНТ «Таунит» в i -м эксперименте, мг/л;	x – пространственная координата, м;
n – количество экспериментов;	α_1, α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи от внешней поверхности сверху пластины и снизу пластины в окружающую среду соответственно, Вт/(м ² ·К);
R – толщина пластины, м;	$\alpha_{экс_i}$ – коэффициент теплоотдачи в i -м эксперименте, Вт/(м ² ·К);
T – температура при проведении экспериментов, °С;	λ – коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·К);
T_i – температура в i -м эксперименте, °С;	τ – время, с.
$t(x, \tau)$ – температурное поле пластины, К;	
t_{c1}, t_{c2} – температура окружающей среды над пластиной и под пластиной соответственно, К;	

Тепловые процессы продолжают играть важную роль в промышленности, энергетике и многих других областях деятельности человека в наше время. В связи с этим, исследования в данной области активно продолжаются [1–7], и одним из наиболее важных направлений является интенсификация теплообмена. Теплоотдающие поверхности должны обеспечивать эффективность, компактность, технологичность изготовления, малую материалоемкость и низкие гидродинамические потери производственного оборудования различного назначения.

Для интенсификации теплоотдачи могут применяться различные методы, использующие разнообразные конструктивные решения, эффективные режимные параметры, соответствующие характеристики теплоносителя и некоторые другие. В данной работе исследуется возможность изменения свойств поверхностей, в частности увеличение шероховатости, для интенсификации теплообменных процессов. Особенность исследуемого метода заключается в использовании нанодисперсных материалов при нанесении оксидированных покрытий на поверхность теплообмена.

Основной целью данной работы является повышение степени шероховатости теплоотдающих поверхностей для увеличения теплоотдачи от поверхности теплообмена к воздуху с помощью применения нанодисперсных материалов, в частности углеродных нанотрубок, в электролите оксидирования. В данной работе проводилось исследование алюминиевых поверхностей и оценивалось изменение их теплоотдачи к воздуху при различных условиях.

Авторами данной работы была выдвинута гипотеза, заключающаяся в том, что добавление нанодисперсных материалов в электролит оксидирования позволяет получить специфический микрорельеф покрытия, состоящий из выпуклостей с формой, близкой к конической. При этом данные выпуклости распределяются по поверхности равномерно и внутри каждой из них находятся углеродные нанотрубки. При этом увеличение шероховатости поверхности обеспечивает увеличение коэффициента теплоотдачи.

В данной работе в качестве нанодисперсного материала используются фуллереноподобные углеродные нанотрубки (УНТ) – наноуглеродный материал, зарегистрированный под торговой маркой «Таунит», который производится в ООО «НаноТехЦентр». УНТ «Таунит» представляет собой длинные полые волокна, состоящие из графеновых слоев фуллереноподобной конструкции. Количество графеновых слоев не более 30, диаметр УНТ 10...60 нм, доля структурированного углерода не менее 95 %.

Нанотрубки «Таунит» имеют развитую поверхность и поэтому чрезвычайно активны и склонны к коагуляции. В связи с этим большое внимание при организации процесса нанесения наномодифицированного гальванического покрытия необходимо уделять диспергированию исходного материала и равномерному распределению его в электролите. Измельчение исходных нанотрубок «Таунит» осуществлялось с использованием механических вальцов и просеиванием через сито. Диспергирование и равномерное распределение нанотрубок в электролите осуществлялось с помощью ультразвука.

При этом для получения на поверхности наномодифицированного оксидированного покрытия выступов конусообразной формы необходимо, чтобы в гальваническом электролите присутствовали агломераты углеродных нанотрубок «Таунит» определенных размеров. Концентрация УНТ «Таунит» в электролите должна превышать порог коагуляции, составляющий 50 мг/л.

При анодировании использовались круглые плоские образцы из алюминия АМг3 диаметром 28 мм, толщиной 1,6 мм с хвостами-держателями (которые после оксидирования отпиливаются) и массой $2,6 \cdot 10^{-3} \dots 2,65 \cdot 10^{-3}$ кг.

Процесс нанесения оксидированного покрытия отличается от традиционного введением в водный раствор 100...1600 мг/л порошка УНТ «Таунит» (эксперименты проводились при разных концентрациях в данном диапазоне с шагом 300 мг/л). Перемешивание порошка производилось в ультразвуковом диспергаторе в течение 5 мин.

Исследование морфологии поверхностей осуществлялось с помощью микроскопа с увеличением $\times 850$. На рисунке 1 представлены фотографии поверхностей без покрытия, с чистым оксидированным покрытием и с наномодифицированным оксидированным покрытием (при добавлении в электролит УНТ «Таунит» в количестве 100 и 700 мг/л).

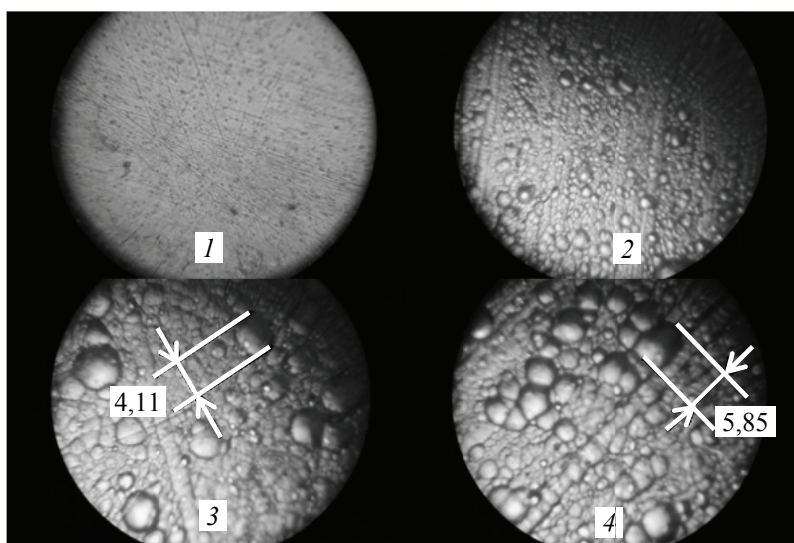


Рис. 1. Фотографии поверхностей, сделанные с увеличением $\times 850$, без покрытия (1), с чистым оксидированным покрытием (2), с наномодифицированным оксидированным покрытием при добавлении УНТ «Таунит» в количестве 100 мг/л (3), 700 мг/л (4)

При фотографировании поверхностей было использовано боковое освещение, которое визуально подтвердило наличие на них конусообразных выпуклостей. Было выявлено визуальное отличие алюминиевых поверхностей без оксидированного покрытия, алюминиевых поверхностей с чистым оксидированным покрытием и алюминиевых поверхностей с наномодифицированным оксидированным покрытием. Также при помощи бокового освещения было обосновано, что на фотографиях присутствуют именно выпуклости, имеющие диаметр $4,11 \cdot 10^{-5} \dots 5,88 \cdot 10^{-5}$ м.

Следующим этапом исследований являлось экспериментальное определение значений шероховатости поверхностей образцов с разного рода покрытиями. Оценка шероховатости производилась портативным измерителем шероховатости TR210 по четырем параметрам: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам; Rq – среднеквадратическое отклонение профиля; Rt – общая высота между наибольшими пиком и впадиной профиля.

В ходе экспериментов было выявлено, что значения всех параметров в значительной степени увеличиваются. За определяющий параметр был выбран Ra , максимальное увеличение которого составило 88 % у алюминиевых поверхностей с наномодифицированным оксидированным покрытием с добавлением УНТ «Таунит» в количестве 700 мг/л в сравнении с поверхностями без оксидированного покрытия. Зависимость процентного увеличения параметра Ra относительно количества добавленных УНТ «Таунит» в электролит оксидирования представлена на рис. 2. При этом толщина оксидной пленки на всех образцах с нанесенным оксидированным покрытием (как наномодифицированным, так и чистым) приблизительно на 40 % больше, чем на образцах без нанесения соответствующего покрытия ($0,0114 \cdot 10^{-3} \dots 0,0122 \cdot 10^{-3}$ м). Измерения производились многофункциональным толщиномером «Константа К5».

Для исследования процесса теплоотдачи алюминиевых образцов к воздуху была разработана многорежимная установка, схема которой представлена на рис. 3. Разработанная экспериментальная установка позволяет производить измерение

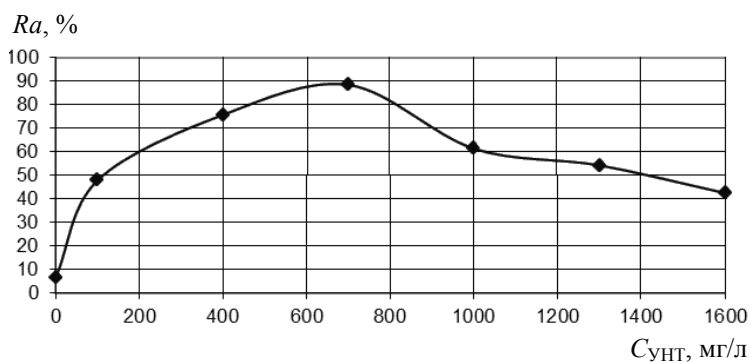


Рис. 2. Зависимость увеличения параметра Ra от концентрации УНТ «Таунит» в электролите оксидирования

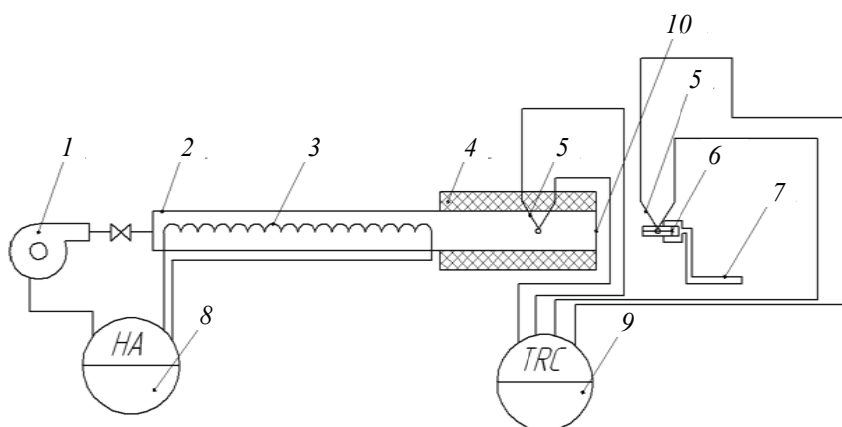


Рис. 3. Схема многорежимной экспериментальной установки:
 1 – вентилятор; 2 – кожух защитный; 3 – электронагреватель; 4 – слой теплоизоляционного материала; 5 – термопары; 6 – контрольный и испытуемый образцы; 7 – держатель;
 8 – система управления и регулирования температуры и скорости потока воздуха;
 9 – электронный самопишущий регулятор температуры; 10 – точка, где происходит измерение скорости потока воздуха

теплоотдачи в диапазоне температур 40...280 °С. Мощность установленного теплоэнергонагревателя 2 кВт. Скорость обдува материала может варьироваться в диапазоне 0,5...25 м/с. В сущности, эксперимент представлял собой нагревание образцов до определенной температуры и снятие графиков нагрева с помощью электронного самописца для дальнейшего применения этих данных в расчетах значений коэффициента теплоотдачи. На рисунке 4 приведен пример сравнительных экспериментальных графиков нагревания образцов с различными покрытиями.

Заключительным этапом данной работы явилось вычисление значений коэффициентов теплоотдачи на основе аналитического решения обратной задачи нестационарной теплопроводности в однослойной неограниченной пластине [8]. При этом были приняты следующие допущения:

- 1) расчет велся для плоской неограниченной пластины в связи с тем, что теплоотдача с торцов образцов пренебрежимо мала;
- 2) коэффициенты теплопроводности и температуропроводности образца не зависят от температуры окружающей среды и условий оксидирования его поверхности;
- 3) температура потока, контактирующего с образцом, не изменяется вдоль поверхности контакта.

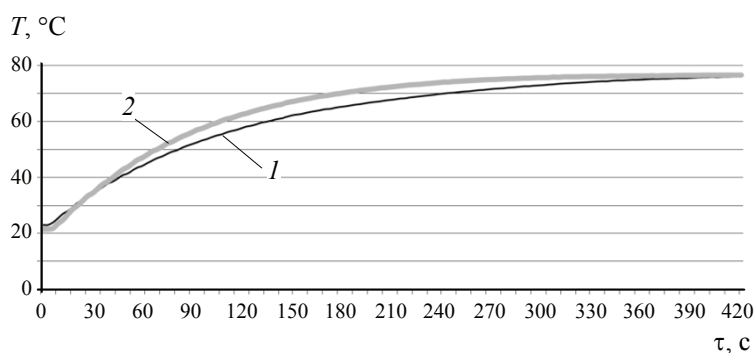


Рис. 4. Пример графиков нагрева образцов с чистым оксидированным покрытием (1) и наномодифицированным оксидированным покрытием при концентрации УНТ «Таунит» в электролите оксидирования 700 мг/л (2)

Нестационарное температурное поле плоской неограниченной пластины является решением следующей задачи теплопроводности:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq R, \quad \tau > 0; \quad (1)$$

$$t(x, 0) = f(x); \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} - \alpha_1 (t(0, \tau) - t_{c1}) = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 (t(R, \tau) - t_{c2}) = 0. \quad (4)$$

Решение задачи (1) – (4) имеет вид

$$t(x, \tau) = Ax + B + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(\mu_n, \tau) W(x, \mu_n)}{Z_n}, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{t_{c2} - t_{c1}}{\lambda \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{R}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}, \quad B = t_{c1} + \frac{\lambda}{\alpha_1} A; \quad (6)$$

$$Z_n = \frac{1}{2\mu_n} (R\mu_n - \sin(\mu_n R + \varphi_n) \cos(\mu_n R + \varphi_n) + \sin(\varphi_n) \cos(\varphi_n)); \quad (7)$$

$$\varphi_n = \arctg \left(\frac{\lambda \mu_n}{\alpha_1} \right); \quad (8)$$

μ_n – n -й положительный корень уравнения

$$\frac{\lambda \mu_n}{\alpha_2} \cos(\mu_n R + \varphi_n) + \sin(\mu_n R + \varphi_n) = 0; \quad (9)$$

$$W(x, \mu_n) = \sin(\mu_n x + \varphi_n); \quad (10)$$

$$U(\mu_n, \tau) = U(\mu_n, 0) \exp(-a \mu_n^2 \tau); \quad (11)$$

$$U(\mu_n, 0) = \int_0^R (f(x) - Ax - B) W(x, \mu_n) dx. \quad (12)$$

Таким образом, выражение (5) определяет решение задачи (1) – (4). В частном случае начальные условия задаются безградиентными, то есть $f(x) = t_0 = \text{const}$. В этом случае интеграл в выражении (12) берется аналитически.

Для определения коэффициента теплоотдачи при известной зависимости $t(x, \tau)$ необходимо решить обратную задачу минимизации среднеквадратичного отклонения расчетной кривой $t(x, \tau)$ от экспериментально полученной. Для этого при решении задачи (1) – (4) задается некоторое начальное приближение значения коэффициента теплоотдачи $\alpha = \alpha_n$ и решается задача оптимизации с варьированием значений α при имеющихся экспериментальных значениях $t_3(x, \tau)$: необходимо найти такую функцию $t(x, \tau)$, для которой критерий $K = \max_{x_0 \leq x \leq x_1} |t(x, \tau) - t_3(x, \tau)| \rightarrow \min$.

Эксперимент и решение обратной задачи каждый раз производились при заданных температуре, скорости потока среды и шероховатости поверхности.

В результате проведенных вычислений были получены следующие результаты (рис. 5): при добавлении в электролит оксидирования УНТ «Таунит» концентрацией 700 мг/л наблюдается увеличение коэффициента теплоотдачи до 16 % при скорости потока воздуха 1 м/с, до 19 % – при скорости потока воздуха 3 м/с и до 22 % – при скорости потока воздуха 5 м/с по сравнению с образцами без оксидированного покрытия.

После проведения ряда экспериментов были обработаны полученные табличные данные и аппроксимированы методом наращивания [9]. В результате получено следующее аппроксимирующее выражение

$$\alpha(w, T, C_{\text{УНТ}}) = -3,393 + 32,853w + 0,2037T + 0,0198C_{\text{УНТ}} - 3,6968w^2 - 1,106 \cdot 10^{-5} C_{\text{УНТ}}^2 \quad (13)$$

Погрешность аппроксимации, вычисленная по формуле

$$\Delta = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=0}^n (\alpha(w_i, T_i, C_{\text{УНТ}i}) - \alpha_{\text{экс}i})^2}, \quad (14)$$

составила 5 %, что соизмеримо с погрешностью измерения переменных в процессе эксперимента.

Аппроксимирующее выражение (13) справедливо в диапазонах изменения: $40 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq w \leq 5 \text{ м/с}$; $0 \text{ мг/л} \leq C_{\text{УНТ}} \leq 1600 \text{ мг/л}$.

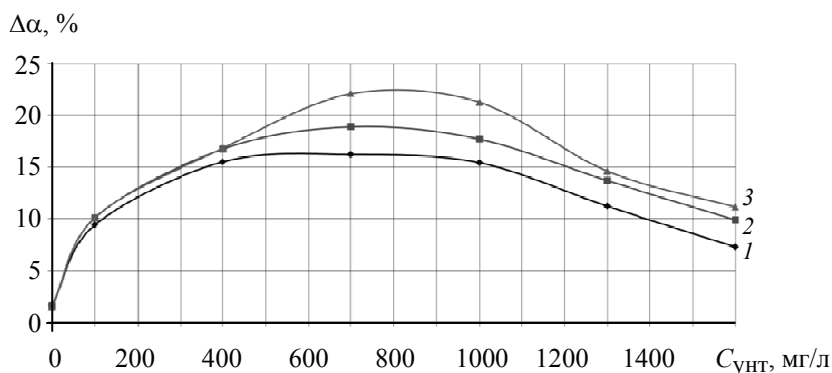


Рис. 5. Зависимость изменения значения коэффициента теплоотдачи от концентрации УНТ «Таунит» при скорости потока воздуха 1 (1), 3 (2), 5 (3) м/с у поверхностей с оксидированным покрытием по сравнению с поверхностями без оксидированного покрытия

Выводы

1. Нанесение наномодифицированного оксидированного покрытия на алюминиевую поверхность изменяет ее свойства. В частности, увеличивается шероховатость.

2. Экспериментально установлено увеличение значения коэффициента теплоотдачи у наномодифицированных оксидированных покрытий в сравнении с чистыми неоксидированными покрытиями.

3. Максимальные улучшения шероховатости и коэффициента теплоотдачи достигаются при добавлении в электролит оксидирования УНТ «Таунит» концентрацией 700 мг/л. Шероховатость поверхности, в частности среднее арифметическое отклонение профиля, увеличивается на 88 %; значение коэффициента теплоотдачи от полученных поверхностей к воздуху при обдуве 1...5 м/с увеличивается на 22 % по сравнению с чистыми не оксидированными покрытиями.

4. Проверена гипотеза возникновения данного эффекта: полученный в результате оксидирования микрорельеф поверхности влияет на увеличение шероховатости теплоотдающей поверхности, а это, в свою очередь, влияет на увеличение значения коэффициента теплоотдачи.

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. Кунтыш, В.Б. Исследование теплоотдачи и сопротивления шахматных пучков воздухоохлаждаемых теплообменников из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты / В.Б. Кунтыш, А.Б. Сухоцкий, А.Э. Пиир // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 12. – С. 3–5.

2. Лашутина, Н.Г. Техническая термодинамика с основами теплопередачи и гидравлики / Н.Г. Лашутина. – М. : Машиностроение. – 1988. – 336 с.

3. Исследование теплообмена при импульсном нагреве модельных фрагментов оболочек ТВЭЛов / А.А. Стаханова [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 7. – С. 65–72.

4. Галушак, И.В. Метод численного моделирования теплового состояния трубы с просечным спирально-ленточным оребрением / И.В. Галушак, В.Я. Горбатенко, А.А. Шевелев // Теплоэнергетика. – 2011. – № 5. – С. 72–76.

5. Исследования теплообмена в энергетических установках и аппаратах в объединенном институте высоких температур РАН (к 50-летию института) / Ю.А. Зейгарник [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 2–6.

6. Письменный, Е.Н. Эффективные теплообменные поверхности из плоскоовальных труб с неполным оребрением / Е.Н. Письменный // Теплоэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 7–12.

7. Телевный, А.М. Экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена в трубчатых оребренных теплообменных аппаратах с орошаемой поверхностью / А.М. Телевный, А.Б. Гаряев, И.В. Сынков // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 2. – С. 49–51.

8. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа. – 1967. – 600 с.

9. Литовка, Ю.В. Алгоритм векторной аппроксимации экспериментальных данных / Ю.В. Литовка // Методы кибернетики химико-технологических процессов : тез. докл. IV Междунар. науч. конф. / Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева. – М., 1994. – С. 159–160.

Heat Transfer Enhancement on the Aluminum Surface by their Oxidation with Nanomodified Electrolytes

A.A. Gravin¹, Yu.V. Litovka¹, E.N. Tugolukov²,
A.G. Tkachyov², I.A. Dyakov¹, A.N. Pakhomov³

Departments: “Systems of Computer Aided Design” (1);
nagval_89@mail.ru;

“Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing” (2),

“Technological Processes and Apparatuses” (3), TSTU

Key words and phrases: carbon nanotubes; electroplating processes; heat transfer intensification; inverse problem of non-stationary heat conductivity; roughness increase.

Abstract: The method to increase the roughness and heat transfer has been considered. The appropriateness of using nanosized materials to achieve this goal has been verified; positive effect of their application has been revealed. The hypothesis of the effect has been experimentally tested.

Intensivierung der Wärmeabgabe auf den Aluminiumoberflächen mittels ihres Oxidierens von den nanomodifizierten Elektrolyten

Zusammenfassung: Es ist die Weise der Vergrößerung der Unebenheit und der Intensivierung des Wärmeaustausches betrachtet. Es ist die Zweckmäßigkeit der Nutzung der nano-dispersen Materialien für die Errungenschaft des gestellten Ziels detailliert rechtfertigt und es ist das positive Ergebnis ihrer Anwendung gezeigt. Es ist die Hypothese der Entstehung des gegebenen Effektes experimental geprüft.

Intensification de l'abandon de chaleur sur les surfaces d'aluminium par leur oxydation par les ions nanomodifiés

Résumé: Est examiné le moyen de l'augmentation de la rigidité et de l'intensification de l'échange de chaleur. Est argumentée en détail la rationalité de l'emploi des matériaux nanodispersés pour l'obtention du but posé, et déduit le résultat positif de leur application. Est vérifiée par expérience l'hypothèse de l'apparition de l'effet donné.

Авторы: *Гравин Артем Андреевич* – аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования»; *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования»; *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Ткачёв Алексей Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Дьяков Игорь Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования»; *Пахомов Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии продовольственных продуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».