УДК 004.04

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В ПРОЦЕССЕ АНОДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

Яковцева В.А., Шиманович Д.Л., Гусинский А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, yakovtseva@yahoo.com

Аннотация: выполнено моделирование макроскопических температурных полей в системе "электролит – алюминиевый образец", возникающих при электрохимическом анодировании алюминия. Определена зависимость макроскопической однородности температуры от технологических и геометрических параметров процесса. На основе полученных данных разработан алгоритм автоматического управления тепловым режимом анодирования, что обеспечивает стабилизацию условий процесса и позволяет формировать алюмооксидные покрытия с требуемыми свойствами.

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, ванна анодирования, алюминий, моделирование температурных полей.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для формирования пленок оксида алюминия с заданными свойствами на алюминиевых подложках наиболее распространенным и изученным методом является электрохимическое анодирование. Варьируя параметры процесса – состав электролита, режимы анодирования (постоянный, переменный или импульсный ток), температурные условия, а также применяя ультразвуковое воздействие и последующую постобработку (термообработку или наполнение пор) – можно получать оксидные пленки с необходимыми характеристиками. Данная технология позволяет создавать покрытия толщиной от нескольких микрометров до сотен микрометров.

Контроль температуры в процессе анодирования является обязательным: от температуры зависит плотность тока и скорость растворения пленки, что в свою очередь оказывает прямое влияние на характеристики покрытия. Для процесса анодирования поверхности образца важными параметрами являются: (1) макроскопическая тепловая однородность электролита в ванне; (2) мезоскопическая однородность вблизи поверхности образца; (3) микроскопическое распределение потоков вещества и тепла в порах и на масштабах основных концентрационных градиентов. Под макроскопическим масштабом понимается размер порядка самого образца, под мезоскопическим – масштаб, соответствующий тепловому или гидродинамическому пограничному слою, а под микроскопическим – масштаб микроскопических дефектов поверхности и пор травления. Следует отметить, что в данном исследовании температурные и концентрационные поля на микроскопическом уровне не рассматриваются. Целью исследования является моделирование *макроскопических* температурных полей для определения оптимальных геометрических и технологических параметров процесса, обеспечивающих максимальную однородность анодирования.

## II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Процесс анодирования характеризуется сложным взаимодействием тепло- и массообменных процессов в системе "ванна – образец – внешняя среда", которые формируют температурные поля. Ключевыми факторами, определяющими тепловую картину, выступают: конвективные потоки электролита, тепловое воздействие стенок и дна ванны, выделение джоулева тепла на поверхности анодируемого изделия, теплопроводность электролита и самого изделия, а также теплообмен зеркала электролита с окружающим воздухом.

При моделировании системы принят ряд допущений:

1. *Гидродинамика*: Поверхностные волны электролита не учитываются; на твердых границах (стенки, образец) заданы условия прилипания. Электролит рассматривается как ньютоновская жидкость. Влияние элементов крепления (подвеса, консоли) на поток исключено из рассмотрения.
2. *Теплообмен:* Стенки и дно ванны считаются изотермическими ($T_0$), тепловые процессы в материале стенок не моделируются. Теплообмен свободной поверхности с воздухом ($T_{amb}$) описывается законом свободной конвекции с постоянным коэффициентом $h_{surf}$.
3. *Энергетика:* Тепловыделение на образце принимается равномерным. Джоулевым нагревом электролита и самого образца пренебрегаем ввиду его малости по сравнению с электрохимическим источником; электростатическая задача не решается.

4. *Механика:* Деформации ванны и образца не учитываются.Расчетная область имеет форму прямоугольного параллелепипеда, заполненного электролитом с известными гидродинамическими и теплофизическими характеристиками. В него погружен анодируемый образец в форме параллелепипеда с однородными теплофизическими свойствами. Граничные условия для гидродинамики и теплообмена заданы в соответствии с Табл. 1. На поверхности образца учитывается условие прилипания жидкости и конвективный теплообмен с эффективными коэффициентами. Нижняя грань образца рассматривается как источник тепла, мощность которого определяется плотностью тока анодирования.

Таблица 1. Технические характеристики системы ванна-образец

| | Наименование параметра | Ед.изм. | Значение |
|---|---|---|---|
| 1 | Внешние: ширина | мм | 600 |
| | высота | мм | 300 |
| | глубина | мм | 250 |
| 2 | Внутренние: ширина | мм | 500 |
| | высота | мм | 260 |
| | глубина | мм | 190 |
| 3 | Рабочий объем электролита | л | 14 |
| 4 | Типичный состав электролита | | |
| | вода | | 90 |
| | щавелевая кислота | % масс | 10 |
| 5 | Площадь поверхности анодирования | мм×мм | 48×60 до 100×100 |
| 6 | Номинальная плотность тока анодирования | мА/см$^2$ | 50 – 100 |
| 7 | Мощность подогревателя термостатата | Вт | 500 |
| 8 | Скорость вращения лопастей перемешивателя | Об/мин | 200 |
| 9 | Характерное время выхода на температурный режим | мин | 10 |
| 10 | Рабочая температура электролита | ºС | 20 |
| 11 | Точность термостатической регулировки средней температуры | ºС | ±1 |
| 12 | Площадь образца | см$^2$ | 30 – 100 |
| 13 | Мощность электрохимического тепловыделения (мах) | Вт | 1500 |
| 14 | Температура охлаждающей воды | ºС | 10 |

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа температурной неоднородности электролита была выполнена тепловизионная съемка его поверхности (рис. 1). Погрешность измерения относительных температур составляет ±0,05 ºС. Учитывая, что водный раствор электролита является оптически непрозрачным для длинноволнового ИК-излучения, полученные данные характеризуют температурное поле поверхностного слоя толщиной около 0,1 мм.

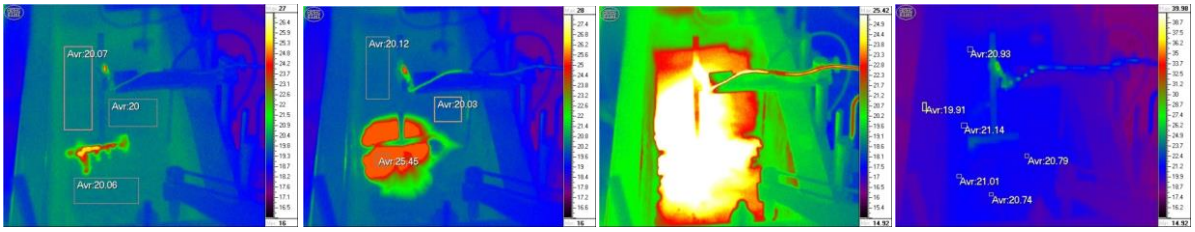



Рисунок 1. Тепловизионное изображение поверхности ванны анодирования алюминия в последовательные моменты времени после включения тока анодирования (слева направо): 1 – через 5 с, 2 – через 10 с, 3 – через 100 с, 4 – через 100 с после включения лопастного перемешивателя при том же токе анодирования

Как видно из рис. 1, начальная температура системы составляет 20 ºС. При достижении квазистационарного режима перемешивания (см. последний кадр) неоднородность температурного поля не превышает 0,5 ºС.

В рамках работы была проведена оптимизация системы для обеспечения равномерного распределения температуры как во всем объеме электролита, так и в прианодной области. Для анализа последней введено понятие «рабочей зоны» ($V_0$) – плоского слоя электролита толщиной $h_0$, прилегающего к поверхности образца. Выбор величины $h_0$ основан на следующих критериях: (а) наличие достаточного количества расчетных ячеек (не менее 10); (б) локализация области вблизи анода ($h_0 \ll H$); (в) сглаживание микроскопических неоднородностей поверхности; (г) учет влияния гидродинамических и тепловых пограничных слоев.

С учетом геометрии образца и указанных требований, оптимальной толщиной слоя выбрано значение $h_0$ = 5 мм (при условии локального сгущения расчетной сетки), которое при необходимости может быть увеличено до 10 мм.

Для оценки эффективности оптимизации введены две целевые функции:

1. $\sigma_v$ - среднеквадратичное отклонение температуры по всему объему ванны:

$$\sigma_v = \frac{1}{N}\sum_i^N \frac{(T_i - \hat{T}_v)^2}{\hat{T}_v};$$

2. $\sigma_r$ – среднеквадратичное отклонение температуры в пределах рабочей зоны:

$$\sigma_r = \frac{1}{N_r}\sum_i^{N_r} \frac{(T_i - \hat{T}_r)^2}{\hat{T}_r},$$

где $N$ – общее число ячеек жидкой фазы (электролита), $N_r$ – число ячеек рабочей зоны электролита, $\hat{T}_V = \frac{1}{N\sum v_i}\sum_i^N v_i T_i$ – среднемассовая температура электролита, $v_i$ - объем $i$ – й расчетной ячейки; $\hat{T}_r = \frac{1}{N_r V_r}\sum_i^{N_r} v_i T_i$- среднемассовая температура рабочей зоны электролита.

Расчетная сетка для моделирования ванны анодирования была создана в программном комплексе GAMBIT [1]. Для имитации возвратно-поступательного движения пластины в электролите применен метод скользящих сеток (sliding mesh). Общая расчетная область была разделена на два домена: стационарный (основной) и подвижный (непосредственно вокруг пластины), для каждого из которых генерировалась собственная сетка. Их последующее объединение выполнялось с помощью специализированных скриптов. Итоговая конфигурация сетки (Рис. 2) позволила корректно учесть динамику движения погруженной пластины.

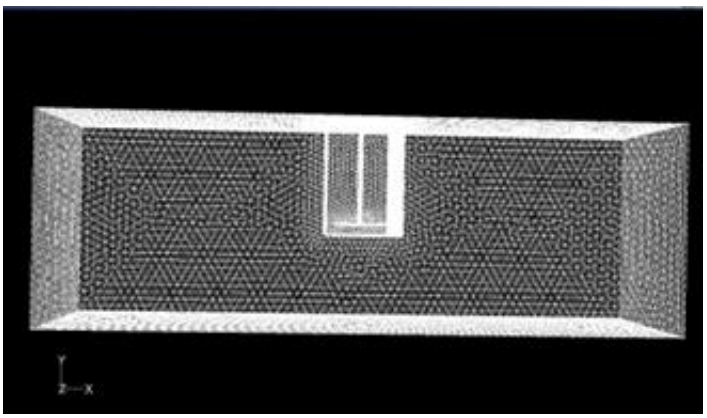


Рисунок 2. Общий вид расчетной сетки тестовой камеры

Моделирование процесса теплообмена между жидкостью и твердым телом было выполнено в программном комплексе Fluent 6.0 [2]. Математическая модель включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости, а также уравнение теплопроводности для твердой фазы. Полученная система связанных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, как правило, не имеет аналитического решения, поэтому для ее анализа применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD). Численная реализация задачи была осуществлена итерационными методами во Fluent 6.0 [2] с предварительной генерацией расчетной сетки в среде Gambit [1].

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, моделирование *макроскопических* полей температуры в ванне электрохимического анодирования алюминия и анодируемом образце позволило определить алгоритм поддержания температурных режимов электрохимического анодирования при изготовлении алюмооксидных подложек, что обеспечивает стабилизацию условий процесса и позволяет формировать алюмооксидные покрытия с требуемыми свойствами.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при частичной поддержке ГПНИ РБ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма 7.2 «Наноструктуры, наноматериалы и технологии», задания 2.15 и 2.6; «Фотоника и микроэлектроника»; подпрограмма 5.2 «Опто- и СВЧ-электроника для развития технологий машино- и приборостроения», задание 5.2.20 и подпрограмма 5.3 «Микроэлектрониака. Перспективные материалы и технологии», задание 5.3.08.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] “*Gambit 1.3.2* Users and Reference Manual”. Fluid Dynamics International, Fluid Dynamics Analysis Package Revision 1.3.2, Fluent Inc., 2000.

[2] “*FLUENT 6.0* Users and Reference Manual”. Fluid Dynamics International, Fluid Dynamics Analysis Package, Fluent Inc., 2001.

## MODELING HEAT LOADS IN THE ALUMINUM ANODIZING PROCESS

V. Yakovtseva, D. Shimanovich, A. Gusinsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
yakovtseva@yahoo.com

Abstract: macroscopic temperature fields in the "electrolyte – aluminum sample" system that occur during electrochemical anodizing of aluminum have been modeled. The dependence of the macroscopic uniformity of temperature on the technological and geometric parameters of the process has been determined. Based on the data obtained, an algorithm for the automatic control of the thermal regime of anodizing has been developed, which ensures stabilization of process conditions and allows the formation of aluminum oxide coatings with the required properties.

Keywords: electrochemical anodizing, anodizing bath, aluminum, modeling of temperature fields.