



# ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛОСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ С УГЛЕРОДНОЙ НИТЬЮ В КАЧЕСТВЕ РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

К. Чернякова, И. Врублевский, В. Видеков, Т. Динь

**Резюме:** Настоящая работа представляет результаты исследований тепловых характеристик алюминиевых нагревателей со слоем анодного оксида алюминия. В качестве нагревательного элемента использовалась электропроводящая углеродная нить. Для герметизации конструкции нагревателя применяли силиконовый компаунд. Термограммы поверхности нагревателя получали с помощью тепловизионной камеры MobIR M4.

**Ключевые слова:** алюминиевые нагреватели, углеродная нить, анодный оксид алюминия, тепловые характеристики, термограмма.

## 1. Введение

В настоящее время плоские нагреватели благодаря своей конструкции и требованиям к материалам, а также применению для широкого ряда технических задач в области нагрева выделены в отдельный класс нагревателей. Большое разнообразие видов и форм плоских нагревателей позволяет применять их в различных технических устройствах, связанных с использованием тепловых процессов.

Переход плоских нагревателей к конструкциям с малой толщиной потребовал применения новых микроэлектронных технологий для изготовления элементов нагревателя. Такой подход обеспечил возможность получения равномерного теплового потока по всей поверхности нагревательного элемента при сохранении необходимых эксплуатационных характеристик. Среди плоских нагревателей наиболее эффективными являются металлические нагревательные элементы [1,2]. Основными задачами при разработке таких нагревателей является обеспечение надежной изоляции контура электрической цепи сопротивления, как от металлической основы, так и от окружающей среды. В [3] описана конструкция плоского нагревательного элемента на основании из анодированного алюминия, показывающая значительные преимущества предложенной конструкции для повышения тепловой эффективности. Однако применение в такой конструкции герметизирующего полимера на основе эпоксидного компаунда ограничивает верхнюю рабочую температуру значением 120 °С. Для повышения рабочей температуры до 200 °С в настоящей работе предложена конструкция плоского нагревателя с использованием силиконового компаунда в качестве герметизирующего полимера. Приведены результаты исследований тепловых характеристик таких нагревателей.

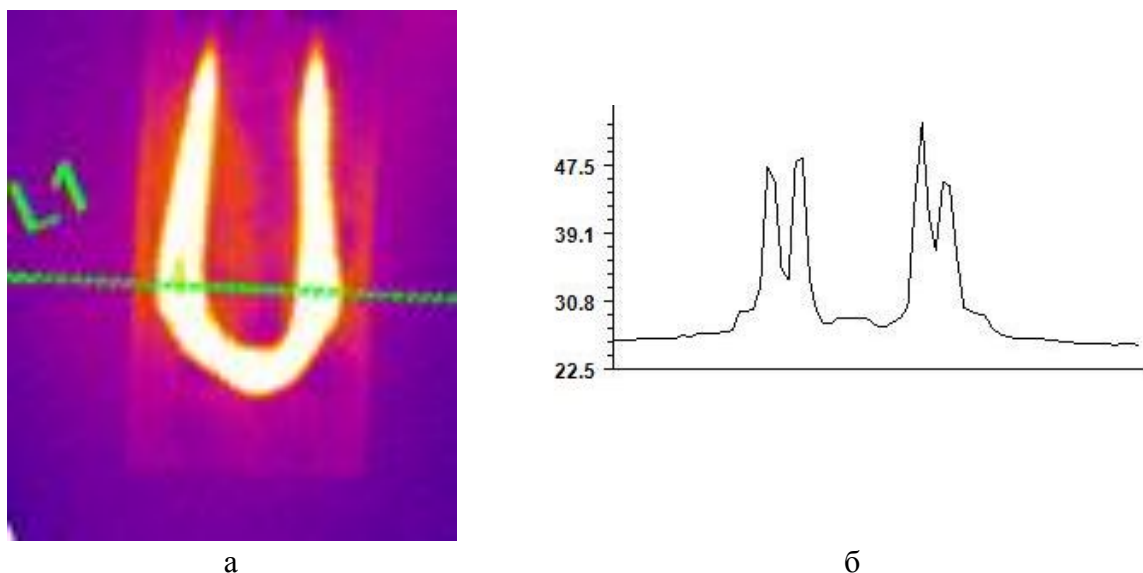
## 2. Экспериментальная часть

Плоский нагревательный элемент имел размеры 60x24 мм. Толщина основания из анодированного алюминия составляла 0,5 мм. На образцах анодированного алюминия слой пористого анодного оксида алюминия, сформированный методом анодирования алюминия, имел толщину не менее 20 мкм. Такая толщина пористого анодного оксида алюминия обеспечивала необходимую изоляцию нагревательного элемента от металлического основания. В конструкции нагревателя из алюминия с нанопористым оксидом алюминия углеродная электропроводящая нить на основе вискозной технической нити использовалась в качестве нагревательного элемента.

Для изготовления резистивных элементов использовали нить из углеродного волокна с размерами 80 мкм (толщина)\*4 мм (ширина)\*170 (длина). Концы нити из углеродного волокна металлизировались слоем меди (толщина 30 мкм, гальваническое осаждение) для последующей пайки в процессе сборки электрического нагревателя. Фиксацию углеродной нити на поверхности анодного оксида алюминия и затем ее герметизацию осуществляли с помощью силиконового компаунда. Электрический нагреватель с нитью из углеродного волокна имел электрическое сопротивление 30 Ом и мощность 13,5 Вт (рабочее напряжение 20 В). Измерение сопротивления диэлектрической изоляции проводилось с помощью мегаомметра Ф4101. Для получения термограмм поверхности нагревателя использовали тепловизионную камеру MobIR M4.

### 3. Результаты и их обсуждение

Для плоских нагревателей наиболее важными характеристиками являются обеспечение равномерного нагрева по площади нагревателя и быстрый выход на заданную температуру. Поэтому в данной работе эти характеристики были подробно исследованы на различных стадиях нагрева.



**Рис. 1** Термограмма лицевой поверхности нагревателя из алюминия с пористым оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 5 с нагрева

На рисунке 1 представлены термограмма лицевой поверхности нагревателя (Рис.1 а) и профиль распределения температуры вдоль заданной линии, пересекающей нагреватель из углеродной нити (Рис.1 б) на 5 с нагрева.

Как видно из профиля распределения температуры, температура нагревательного элемента приблизительно на 21,5 °С выше температуры поверхности анодного оксида алюминия. В то же самое время рабочая (теплоотдающая) сторона нагревателя, как видно из термограммы поверхности нагревателя (Рис.2 а) и профиля распределения температуры вдоль заданной линии (Рис.2 б), имеет равномерное распределение температуры по поверхности со средней температурой 51,2 °С.

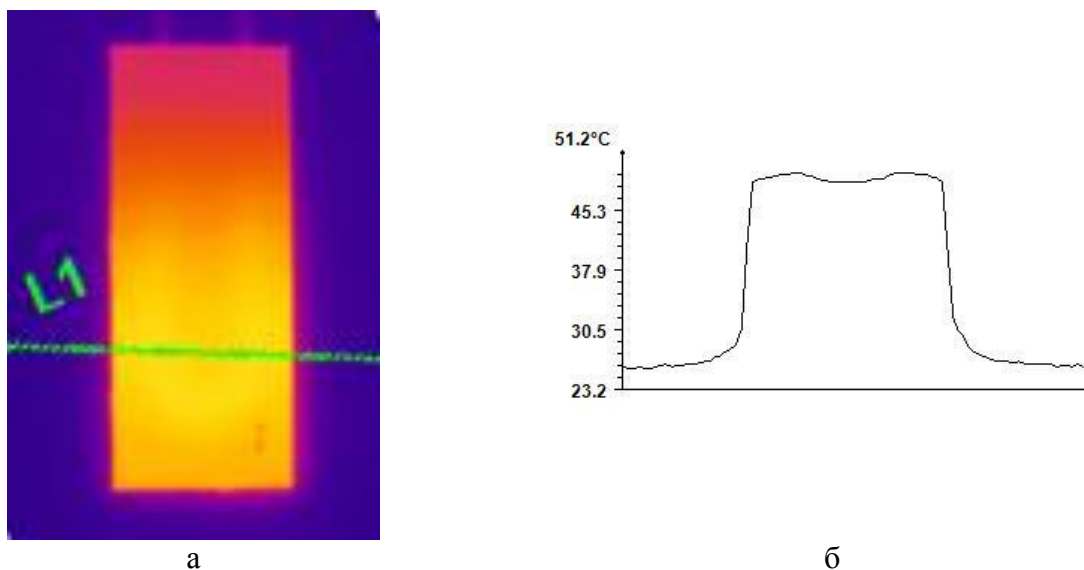


Рис. 2 Термограмма рабочей (теплоотдающей) поверхности нагревателя из алюминия с пористым оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 5 с нагрева

Термограмма лицевой поверхности нагревателя (рис.3 а) и профиль распределения температуры вдоль заданной линии, пересекающей нагреватель из углеродной нити (Рис.3 б) на 10 с нагрева показана на рисунке 3.

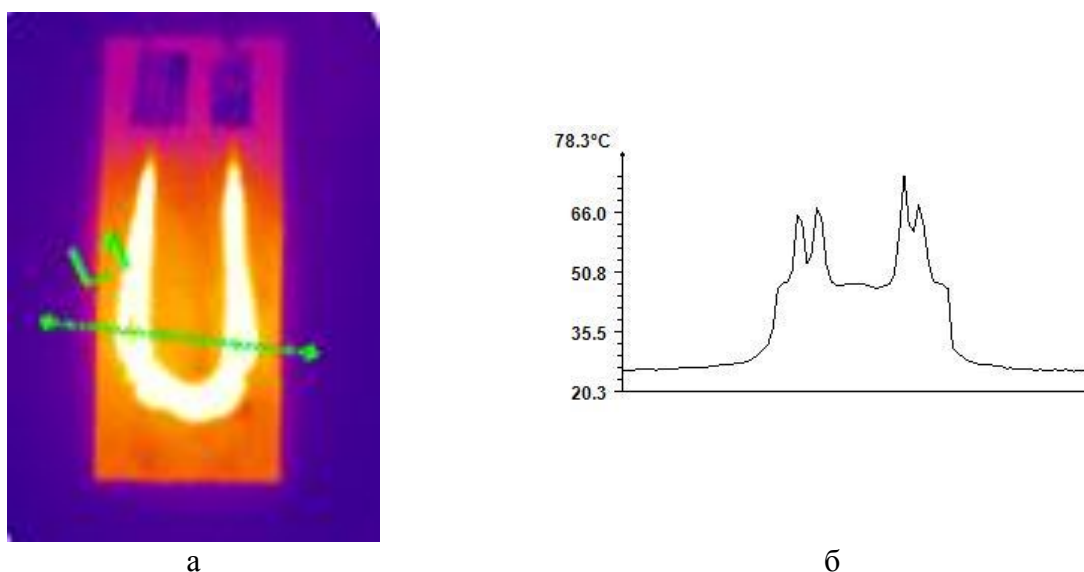
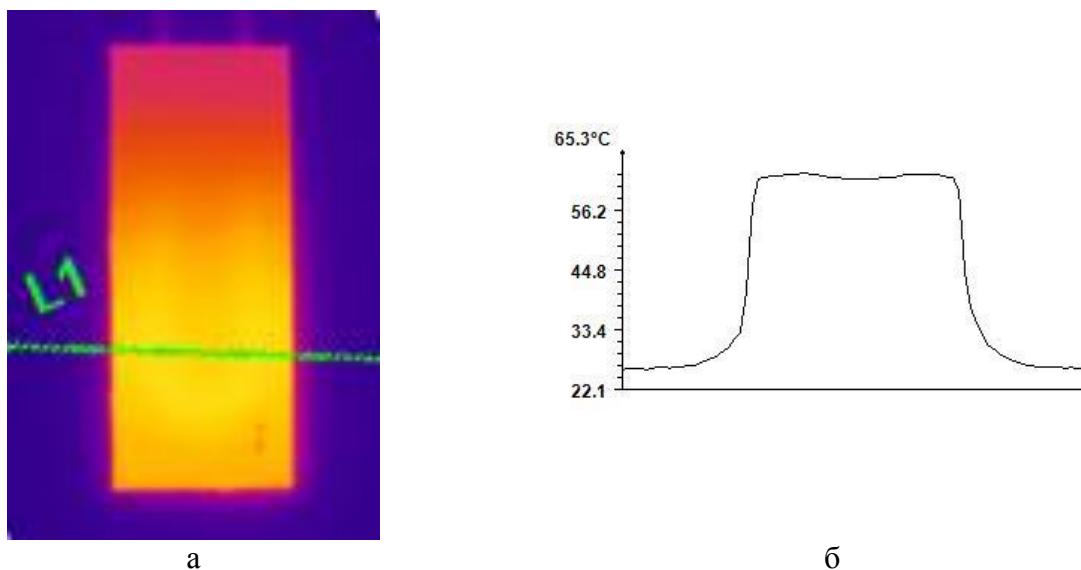


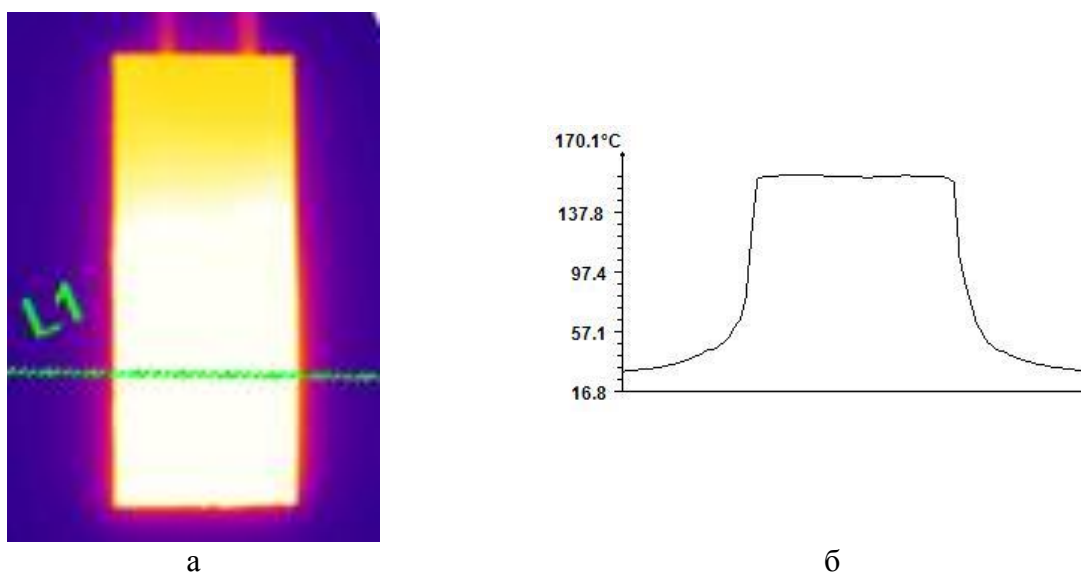
Рис. 3 Термограмма лицевой поверхности нагревателя из алюминия с пористым оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 10 с нагрева

В этом случае температура нагревательного элемента приблизительно на 15,2 °С выше температуры поверхности анодного оксида алюминия, что указывает на уменьшение температурного перепада с ростом температуры. Рабочая (теплоотдающая) сторона нагревателя, как видно из термограммы поверхности нагревателя (Рис.4 а) и профиля распределения температуры вдоль заданной линии (Рис.4 б), сохраняет равномерное распределение температуры по поверхности со средней температурой 65,5 °С.

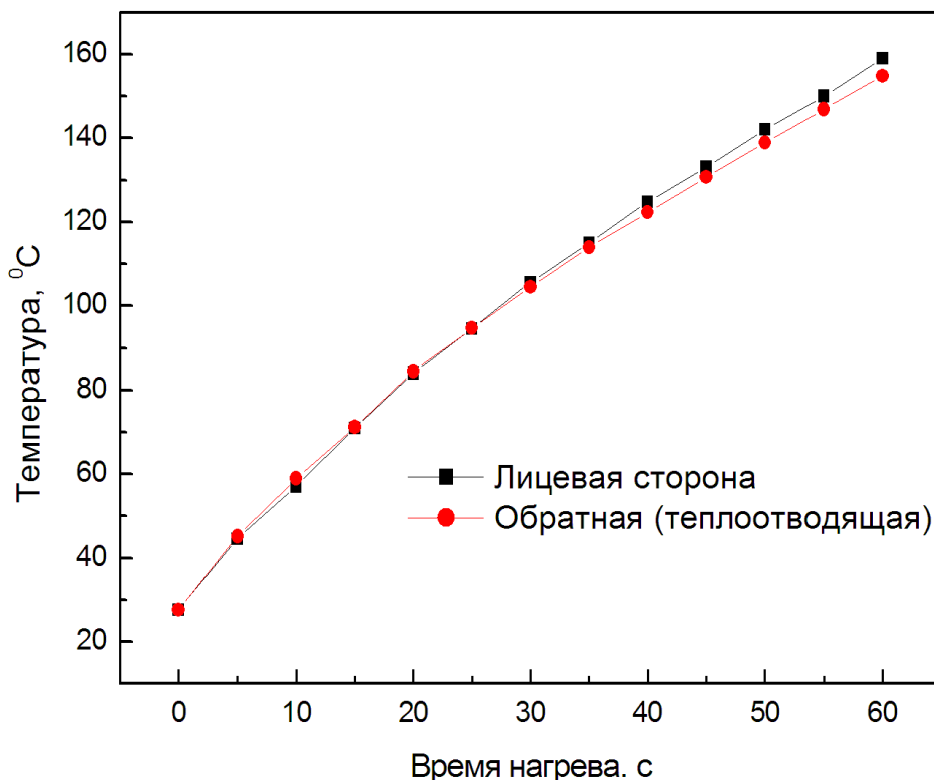


**Рис. 4** Термограмма рабочей (теплотдающей) поверхности нагревателя из алюминия с пористым оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 10 с нагрева

На 60 с нагрева плоский нагреватель выходит на температуру 170 °С для теплоотдающей поверхности. Рисунок 5 показывает термограмму рабочей поверхности нагревателя (Рис.5 а) и профиль распределения температуры вдоль заданной линии (Рис.5 б) на 60 с нагрева.



**Рис. 5** Термограмма рабочей (теплотдающей) поверхности нагревателя из алюминия с пористым оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 60 с нагрева



**Рис. 6** Изменение температуры на лицевой и обратной (теплоотдающей) стороне электронагревателя от времени нагрева (мощность нагревателя 13,5 Вт)

Равномерное распределение температуры по поверхности при достижении температуры 170 °С сохраняется. Зависимости изменения температуры во времени на поверхности нагревателя с резистивным элементом и на обратной стороне (теплоотдающей) показаны на рисунке 6. Результаты исследований показывают, что температура на поверхности нагревателя с резистивным элементом и на обратной стороне имеют очень близкие значения на всех стадиях нагрева. Следовательно, благодаря высокой теплопроводности алюминия генерируемое тепло успевает равномерно рассеиваться по всему объему алюминия, обеспечивая равномерный профиль распределения температуры по поверхности как на лицевой, так и на обратной стороне нагревателя.

#### 4. Выводы:

- Применение силиконового компаунда в качестве герметизирующего полимера позволило повысить верхнюю рабочую температуру плоского алюминиевого нагревателя до 200 °С.
- Плоский электронагреватель на основании из анодированного алюминия характеризуется быстрым выходом на максимальную рабочую температуру и достигает температуры 200 °С за время 60 с (мощность 13,5 Вт).
- Несмотря на односторонний нагрев с использованием линейчатого нагревательного элемента из углеродной нити на всех этапах нагрева на обратной (теплоотводящей) стороне нагревателя обеспечивался равномерный профиль распределения температуры по поверхности.



**Литература:**

1. Чернякова, К. и др. Применение наноструктурированного анодного оксида алюминия при изготовлении теплонагруженных плат для силовых модулей. XXV МНТК “АДП 2016”, Созопол, 2016, стр.257–263.
2. Врублевский, И. и др. Сравнительный анализ работы плоского нагревательного элемента на основании из анодированного алюминия. XXIV МНТК “АДП 2015”, Созопол, 2015, стр.422–428.
3. Vrublevsky, I., et al. Improvement of the thermal characteristics of the electric heater in the architecture with aluminum, nanoporous alumina and resistive component of carbon fiber. Nanoscience & Nanotechnology, 16, № 1, 2016.

**CHARACTERISTICS AND THERMAL PROPERTIES OF ALUMINUM THIN FLAT HEATING ELEMENTS WITH CARBON FIBER AS A RESISTOR**

**K. Chernyakova, I. Vrublevsky, V. Videkov, T. Dinh**

***Abstract:** This paper presents the results of studies of the thermal characteristics of aluminum heaters with a layer of anodic aluminum oxide. As the heating element, an electrically conductive carbon filament was applied. For hermetic sealing of the heater design, a silicone compound was used. Thermograms of the surface of the heater were obtained by a thermal imaging camera MobIR M4.*

**Данни за авторите:**

Катерина В. Чернякова, д-р фмн., водещ научен сотрудник НИС Беларуски държавен университет по информатика и радиоелектроника, Беларус, Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: katerinach\_85@mail.ru

Игорь А. Врублевский, доцент д-р инж., водещ научен сотрудник НИС Беларуски държавен университет по информатика и радиоелектроника, Беларус, Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: vrublevsky@bsuir.edu.by

Валентин Христов Видеков, доц. д-р в катедра „Микроелектроника” при ФЕТТ, Технически Университет–София, Р. България, София, бул. “Кл. Охридски” No8, тел.: 965 3101, e-mail: videkov@tu-sofia.bg

Тай Х. Динь, докторант, Беларуски държавен университет по информатика и радиоелектроника, Беларус, Минск, ул. П. Бровки, 6, e-mail: taidh75@gmail.com