

УДК 621.793.6:669.056.9

*Медведев Денис Львович,
ООО ЗВО ИННОВЕНТ, технолог*

140170, Россия, Московская область, г. Бронницы, ул. Советская 155

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ В ЦЕЛЯХ РЕГУЛИРОВКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

***Аннотация:** Развитие области полупроводниковой упаковки происходит стремительно вследствие возросших требований рынка к повышению функциональности, производительности, миниатюрности, надёжности и снижению стоимости продукции. Долговечность и стабильность характеристик твердотельных устройств во многом зависят от температуры активной зоны (T_j).*

***Ключевые слова:** коррозионная стойкость, алюминиевые сплавы, покрытия, поверхности металлов, защитные покрытия на алюминии.*

Medvedev Denis Lvovich,

ZVO INNOVENT LLC, process engineer

155 Sovetskaya str., Bronnitsy, Moscow Region, 140170, Russia

TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF ANODE ALUMINA USING AN ORTHOGONAL MATRIX FOR TEMPERATURE CONTROL

***Abstract:** The development of the field of semiconductor packaging is taking place rapidly due to the increased market requirements for increasing functionality, productivity, miniature, reliability and reducing product costs. The*

durability and stability of the characteristics of solid-state devices largely depend on the core temperature (T_j).

***Keywords:** corrosion resistance, aluminum alloys, coatings, metal surfaces, protective coatings on aluminum.*

Введение

Управление термическими параметрами источников тепла в электронных упаковках представляет собой ключевую задачу инженерных разработок. Обычно такие системы включают в себя источник тепла (например, IC-чип), материал теплопередачи (ТИМ) и основание либо радиатор, соединённые между собой. После сборки данные компоненты сталкиваются с рядом трудностей при контроле температурного режима. Ключевыми факторами, ограничивающими эффективность работы, выступают температура перехода (T_j) в рабочей зоне и суммарное тепловое сопротивление (R_{th}) всей конструкции — эти показатели должны минимизироваться. С учётом растущих требований к мощности и компактности электроники повышение T_j сверх допустимых пределов провоцирует перегрев, что может привести к серьёзному выходу оборудования из строя [1–3]. Установлено, что каждый дополнительный $2\text{ }^\circ\text{C}$ повышения пороговой температуры снижает срок службы упаковки примерно на 10%. Это обстоятельство усиливает потребность в развитии передовых технологий терморегуляции, особенно в условиях стремительного роста спроса на высокопроизводительные твердотельные устройства [4]. В рамках исследований рассматривается применение различных теплопроводящих наполнителей — таких как оксид магния (MgO), гидроксид алюминия ($\text{Al}(\text{OH})_3$), оксид алюминия (Al_2O_3), оксид бериллия (BeO), нитрид алюминия (AlN) и оксид цинка (ZnO) — которые диспергируют в полимерном матрице или формируют тонкие плёнки с целью оптимизации теплоотведения от электронных элементов к внешней среде [5, 6]. Например,

эпоксидная смола с добавлением наночастиц Al_2O_3 продемонстрировала лучшие результаты по снижению теплового сопротивления по сравнению с аналогичными составами, содержащими частицы Al_2O_3 размером 10 мкм (7,24 кВт) и 44 мкм (6,65 кВт) [1].

Камьяр и соавторы [7] изучили зависимость характеристик теплообмена у замкнутой гравитационной тепловой трубы, наполненной нанofluidами на основе воды с оксидом алюминия (Al_2O_3) и титановым силикатом ($TiSiO_4$), от концентрации частиц и установили, что оба типа нанofluidов повысили эффективность теплоотвода на 65% и 57% соответственно. Более того, ряд работ свидетельствует о повышении интенсивности теплоотведения при применении термоинтерфейсных материалов на основе оксида алюминия (Al_2O_3), нитрида алюминия (AlN), бора азотистого (BN) и нитрида кремния (Si_3N_4), а также эпоксидных композитов в системах электронной упаковки. Таким образом, оксид алюминия демонстрирует ключевое значение при оптимизации теплопроводности и стабильности температурных режимов в таких конструкциях. Тем не менее, использование ТИМов сталкивается с рядом проблем — высокие энергозатраты и трудозатраты при производстве, дороговизна исходных материалов для оксидов и нитридов, а также невысокая теплопроводность эпоксидных матриц представляют собой серьёзные ограничения [5, 8]. Дополнительно, большинство ТИМов имеют полутвердкую форму, подвержены утечкам при повышенном давлении и склонны пересыхать при длительном воздействии высоких температур, что приводит к ухудшению их тепловых свойств [9]. С учётом указанных ограничений, данный исследовательский подход фокусируется на модификации подложки, а не на материалах ТИМ. Для формирования структуры анодного нанопористого оксида алюминия (ААО-пр) на алюминиевой основе применяется двухэтапный метод анодирования. Оксид алюминия может иметь две разновидности. Первая — это тонкий, прочный,

износостойкий и диэлектрический барьерный слой, не содержащий пор. Как отмечалось Цинцатуром [10], мембраны, полученные на этапе первого анодирования, демонстрировали хаотичную расстановку пор: в верхних участках — беспорядочная структура, тогда как в нижней зоне наблюдались регулярные поры. Второй вид — это массивный слой ААО с большим отношением толщины к диаметру, характеризующийся пористой композицией. Такие структуры широко используются в инженерных решениях благодаря способности эффективно рассеивать тепло от электронных компонентов, выходящее сквозь хорошо упорядоченную систему пор [11, 12]. Применение ААО-пр, сформированного по двойному методу анодирования, на внутренней поверхности стенки испарительного элемента гравитационной тепловой трубки позволило существенно повысить её эффективность передачи тепла.

Общий показатель теплового сопротивления и перепад температур у обработанной тепловой трубы оказался на 58,68% и 46,12% меньше по сравнению с аналогичными параметрами необработанной трубы; при этом созданные нанопоры имели диаметр около 35 нм и высоту порядка 6 мкм [11]. По данным Cui et al. [13], в системах с использованием жидких металлов — галлий-индий — на основе пленок из оксида алюминия (ААО) наблюдается повышение эффективной теплопроводности ААО при увеличении суммарной толщины материала. Толщина слоёв ААО составляла примерно $5-10 \times 10^{-6}$ м, которые дополнительно закреплялись слоем ацетата никеля толщиной $2-10 \times 10^{-6}$ м. Согласно результатам расчётов и моделирования, влияние теплопроводности пористой структуры становится минимальным при общей толщине, превышающей 5×10^{-3} м.

При расчётах принимались во внимание диаметр пор — 26,44 нм и толщина слоя ААО — 5 мкм. Размеры нанопористой структуры ААО напрямую зависели от условий анодирования, что, в свою очередь, обусловлено выбором электролита, его концентрацией, температурой

процесса и величиной приложенного напряжения [10, 14]. Большинство работ по изготовлению нанопор в диапазоне от 10 до 240 нм используют щавелевую, фосфорную либо серную кислоты в качестве электролитов [15]. Метод Тагучи позволяет эффективно решать задачи оптимизации с минимальными затратами времени, ресурсов и финансовых средств. В отличие от других подходов в рамках ДОЭ — таких как полный факторный эксперимент, требующий двукратных повторений в каждом цикле, или регрессионные модели, часто трудоёмкие при адаптации к данным — метод Тагучи демонстрирует высокую эффективность, простоту реализации и надёжность [16, 17]. Он широко применяется учёными и специалистами благодаря способности выявлять наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на выходной показатель, обеспечивая качественное управление технологическими процессами [17–19]. Так, Сунита и соавторы [19] использовали ортогональную матрицу Тагучи (L9) для максимизации выхода побочного продукта карданола в производстве кешью, достигнув точности подтверждённого эксперимента в пределах от 2,75 до 7,53%. Подобным образом Ма и коллеги [20] применили модель L9 для оптимизации электроискрового плазменного оксидирования с целью формирования защитного керамического покрытия на магниевых сплавах против коррозии. В данном исследовании основное внимание уделялось минимизации тепловых потерь за счёт оптимизации характеристик слоёв ТИМ, заполнителей зазоров, термоинтерфейсных материалов, а также состава и технологии нанесения покрытий на подложку. Отсутствуют свидетельства того, что структура ААО-нр на алюминиевой подложке изначально разработана для улучшения теплоотводящих свойств в устройствах электронной упаковки. Как продемонстрировали Степниов и соавторы [21], начальная стадия анодирования оказывает влияние на финальную ориентацию нанопор в ААО, а также на формирование оксидного покрытия, выступающего в роли предварительной текстуризации алюминия. В данной

работе предлагается создать структуру ААО-np на алюминиевом основании с целью усиления теплоотдачи в электронных модулях за счет настройки условий первой стадии анодирования — выбора электролита, продолжительности обработки, температуры раствора и напряжения при двухэтапном анодировании с применением ортогонального плана экспериментов по Тагучи L9. Проведён анализ и интерпретация воздействия данных факторов и их уровней на морфологию ААО-np, а также на тепловое сопротивление (R_{th}) и рабочую температуру кристалла (T_j).

Экспериментальные

2.1 Материалы

В качестве катода применяли коммерчески доступные медные пластины толщиной 1 мм. Органические растворители — ацетон ([99,5 %], марка AR) и этанол (99,8 %, марка AR), а также электролиты, такие как щавелевая кислота (чистота 99%), фосфорная кислота (85%) и серная кислота (95%), все марок AR, поступили от Merck & Co. В качестве источника напряжения использовался блок питания постоянного тока с двумя выходами (Keysight Technologies, диапазон 0–35 В). Основную роль при анодировании мембран из оксида алюминия играют именно химические процессы [10]. При анодировании алюминия молекулы воды в электролите расщепляются с образованием положительных ионов водорода и отрицательных ионов кислорода или гидроксида.

Последовательность этапов анодирования представлена в таблице 1. После каждого этапа образцы промывались дистиллированной водой и тщательно просушивались перед началом следующего этапа. Затем провели анализ полученной подложки ААО-np с использованием термических измерений переходных процессов, при этом результаты (термическое сопротивление R_{th} и температура перехода T_j) были оценены и проанализированы.

Экспериментальные стадии, связанные с получением ААО-пр

Пункт	Параметры	Условия
Матер	Анод Катод	Al5052 сплав (2,5 x 2,5 x 0,6) мм медный лист (2,5 x 2,5 x 1) мм
1	отжиг	350 С в течение 3 часов для снятия внутренних напряжений
2	предварительная очистка	ацетон и этанол (1:1)
3	Предварительная полировка	Фосфорная, серная и дистиллированная вода (2:1:1)
4	Первый шаг Анодирование	Принятый ортогональный массив (L9) *
5	Удаление оксидного слоя	Фосфорная кислота и дистиллированная вода (9:1) при 60 °С в течение 15 минут
6	Второй этап анодирования	следует тем же условиям первой стадии анодирования (продолжительность второй стадии анодирования уменьшается до 50% от первой стадии анодирования, и ванна с электролитом поддерживается при комнатной температуре)
7	Расширение пор	Фосфорная кислота и дистиллированная вода (1:9) в течение 20 мин

2.3 Испытания и характеристики

2.3.1 Измерения температурных переходных процессов

Для обеспечения стабильной эксплуатации и максимальной эффективности электронных систем важнейшее значение имеют параметры

T_j и R_{th} , требующие минимизации с целью повышения общей производительности оборудования [3]. Анализ временных изменений температуры позволяет оценить нагрев тестируемого элемента при заданных уровнях потребляемой мощности. Полная термическая цепь охватывает весь путь передачи тепла — от точки его возникновения внутри соединения до полного рассеивания во внешнюю среду.

2.3.2 Метод Тагучи с ортогональным массивом

Метод Тагучи представляет собой структурированный способ проектирования и анализа экспериментов, направленный на повышение качества продукции. Он особенно эффективно применяется при исследовании воздействия различных факторов на показатели работоспособности, позволяя выявить, какие из них окажут наибольшее, а какие — наименьшее влияние [16, 19]. В данном ортогональном массиве использованы три уровня: 1, 2 и 3. Для выбора нужного ортогонального массива следует выполнить следующие шаги:

1. Следует определить число факторов и их уровни;
2. Следует определить степень свободы;
3. Необходимо выбрать ортогональный массив;

Эта работа имеет четыре важных фактора управления, которые приняты с L9 ортогональным массивом. Каждый параметр имеет три уровня, а именно низкий, средний и высокий, обозначаемые 1, 2 и 3 соответственно. С четырьмя факторами, каждый из которых имеет три уровня, полный факторный дизайн требует $3^4 = 81$ прогонов или экспериментов. В настоящем исследовании с помощью метода Тагучи была разработана ортогональная матричная L9 (OA L9) [23], которая включает только девять условий лечения (ТС).

2.3.3 Обоснование факторов и уровней их выбора

Метод Тагучи решает эту проблему за счет применения специально спроектированных ортогональных матриц, позволяющих эффективно

исследовать пространство параметров с минимальным числом опытов. По данным источников [10–14], качественная структура пористых оксидных нанопленок (ААО-пр) во многом определяется условиями анодирования — в частности, типом электролита, его концентрацией, температурой и величиной приложенного напряжения. В таблице 2 представлены четыре ключевых фактора и три их уровня, использованных для получения структуры ААО-пр на алюминиевой основе [10, 15].

Таблица 2.

**L9 ортогональных массивов
Факторы и их уровни**

Code	Control factors	Level		
A	Электролит	0,3 М фосфорная кислота	0,3 М серной кислоты	0,3 М щавелевая кислота
B	Время анодирования	1 ч	3 ч	5 ч
C	Температура ванны	15 С	20 С	24 С
D	Приложенное напряжение	20 V	25 V	30 V

2.3.4 Морфологическое наблюдение

Поверхностная морфология образцов ААО-пр была охарактеризована с использованием электронного микроскопа с экстремально высокой разрешающей эмиссией в поле (XHRFESEM, FEI Version 460L). Топография была исследована через фокусировку верхнего вида с увеличением 60 кХ при

ускоряющем напряжении 5 кВ, и поперечное сечение было исследовано через 20 кХ при том же самом ускоряющем напряжении.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Шаблон и результаты DOE

Первоначально неизолированный алюминиевый образец был испытан с использованием метода термического переходного процесса. При входной мощности 3,5 Вт при давлении 14 фунтов на квадратный дюйм при 900 с результаты наблюдались как $R_{th} = 9,562 \text{ К/Вт}$ и $T_j = 45,5 \text{ С}$. Эти результаты были зафиксированы в качестве базовой линии, и предстоящие результаты эксперимента по L9 ортогональной матрицы (ОА L9) были вычтены из базового значения и показаны в таблице 3.

Таблица 3.

Шаблон L9 ортогональных массивов (ОА L9) и его ответы

Пункт	электролит	Время (час)	Баня температура (С)	Напряжение (V)	DRth (К/ W)	DTj (С)
ТС 1	0,3 МЛН фосфорный	1	15	20	1,41	2,32
ТС 2	0,3 МЛН фосфорный	3	20	25	1,27	2,96
ТС 3	0,3 МЛН фосфорный	5	24	30	4,04	9,46
ТС 4	0,3 М серной кислоты	1	20	30	1,04	2,55
ТС 5	0,3 М серной кислоты	3	24	20	2,57	5,87

ТС 6	0,3 М серной кислоты	5	15	25	2,94	6,81
ТС 7	0,3 М щавелевая	1	24	25	2,20	6,78
ТС 8	0,3 М щавелевая	3	15	30	4,81	11,22
ТС 9	0,3 М щавелевая	5	20	20	4,16	9,83
Средняя					2,72	6,44

3.2 Термическое сопротивление и температура соединения по результатам анализа переходных процессов

Цель создания структур ААО-пр на алюминиевой подложке — повышение эффективности отвода тепла в узле электронной упаковки. Таким образом, конструкции ААО-пр на образцах из алюминия разрабатывались с учётом различных режимов термического контроля по методике ОА L9. Для последующего исследования был использован программный комплекс Minitab 18, а также ручные вычисления [16, 17, 24].

3.3 Анализ Тагучи

Метод Тагучи применяет показатель отношения сигнал/шум (S/N), оценивающий воздействие помеховых факторов на параметры работы системы. Под сигналом понимается среднее значение процесса, а под шумом — дисперсия полученного результата. Зависимости по отношению S/N можно условно разделить на три типа: минимизация показателя, максимизация или достижение оптимального значения. В данном исследовании, учитывая стремление к увеличению обоих показателей

отклика — R_{th} и T_j , используется цель «чем больше, тем лучше», характерная для отношения S/N [19].

Таблица 4.

Таблица ответов для термостойкость

Пункт	Электролит (М)	Время (час)	Температура ванны (С)	Напряжение (В)
1	5,74	3,4	8,68	7,87
2	5,98	7,98	4,94	6,11
3	10,96	11,3	9,07	8,7
Дельта	5,21	7,9	4,12	2,59

Таблица 5.

Таблица ответов для температура соединения

Пункт	Электролит (М)	Время (час)	Температура ванны (С)	Напряжение (В)
1	12,08	10,69	14,99	14,18
2	13,39	15,27	12,47	14,24
3	19,16	18,68	17,17	16,22
Дельта	7,07	7,99	4,7	2,04

3.4 Оптимизация условий реагирования методом Тагучи

Анализ данных по таблицам 4 и 5 позволяет определить иерархию факторов, оказывающих наибольшее воздействие на показатели R_{th} и T_j . В обоих случаях ключевым параметром является продолжительность анодирования, за которым следуют состав электролита, температура раствора и величина приложенного напряжения. Оценка степени влияния каждого фактора осуществляется через расчет отношения сигнал/шум (S/N) на различных уровнях. Так, среднее значение S/N для времени анодирования на

первом уровне получается путём усреднения соответствующих значений S/N по экспериментам 1, 4 и 7; аналогично вычисляются средние значения для остальных уровней и всех других факторов. Снижение температуры ванны до 20 °С, поднимает вопросы о сложности механизмов, управляющих поведением отношения S/N при альтернативных сочетаниях параметров — таких как напряжение, тип электролита и длительность процесса формирования ААО-пр, требующих дальнейшего исследования [20]. Графики взаимодействия позволяют судить о совместном действии факторов на выходной ответ. Параллельность линий на таком графике говорит об отсутствии заметного взаимодействия между рассматриваемыми переменными. При наличии пересечения или сближения линий можно предполагать наличие некоторого эффекта, хотя вероятность случайного совпадения также остаётся.

3.5 Подтверждение результатов испытаний

Испытание на подтверждение проводилось при оптимизированных условиях, при этом значения T_j и R_{th} фиксировались с применением метода переходных процессов. Результаты снижения R_{th} с 5,30 К/Вт до 3,81 К/Вт и уменьшение T_j с 11,56 °С до 7,56 °С по сравнению с голой подложкой. Значительное расхождение между расчетными и экспериментальными данными при подтверждающем тестировании, зафиксированное в таблице 9, может быть вызвано влиянием неконтролируемых факторов высших порядков, а также деформацией пористого слоя ААО под действием внешнего давления, что негативно сказывается на точности измерений электронного модуля. При этом образец L9-TC8 продемонстрировал погрешности 3,69% по T_j и 9,24% по R_{th} . В отличие от этого, исследователи Sunita и соавторы [19] зафиксировали ошибки 2,75% и 7,53% соответственно при проверке оптимизированных условий с целью максимизации выхода продукции. Для последующего анализа были выбраны морфологические

характеристики ААО-нр L9-ТС8 (при комнатной температуре) и контрольные образцы, используемые для верификации.

Заключение

Метод ОА L9 Taguchi позволяет эффективно оптимизировать технологический параметр ААО-нр в контексте термического контроля электронных упаковок. Нанопористые структуры ААО, полученные при концентрации щавелевой кислоты 0,3 М, продолжительности анодирования 3 часа, напряжении 30 В и температуре ванны, соответствующей комнатной, демонстрируют повышение коэффициента теплового сопротивления R_{th} на 24,58% по сравнению с базовой подложкой. При тех же условиях наблюдается снижение температуры перехода T_j на 24,66%, что свидетельствует об улучшении теплового режима в упаковке. Установлено, что размеры пор — диаметр 40–55 нм и высота 6–7 мкм — оказывают существенное влияние на выходной отклик системы, в то время как увеличение высоты пор до 12 мкм не приводит к заметному изменению этого показателя. Однако имеются основания полагать, что в интервале высот от 7 до 12 мкм может быть достигнуто дополнительное улучшение теплоотвода. Таким образом, последующие исследования, направленные на достижение более точной регулировки высоты нанопор, способны обеспечить еще больший рост тепловых характеристик.

Список литературы:

1. Besterfield D. H., Besterfield-Michna C., Besterfield G. H., Besterfield-Sacre M., Urdhwareshe H., Urdhwarshe R. *Total quality management*. 3rd ed. New Delhi: Pearson Education India, 2011.
2. Chung C. K., Tsai C. H., Hsu C. R., Kuo E. H., Chen Y., Chung I. C. Impurity and temperature enhanced growth behaviour of anodic aluminium oxide from AA5052 Al-Mg alloy using hybrid pulse anodization at room temperature // *Corrosion Science*. 2017. Vol. 125. P. 40–47. DOI: 10.1016/j.corsci.2017.05.027

3. Cui Y., Ding Y., Xu S., Wang Y., Rao W., Liu J. Study on heat transfer and corrosion resistance of anodized aluminum alloy in gallium-based liquid metal // *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*. 2019. DOI: 10.1115/1.4041665
4. Dar A. A., Anuradha N. An application of Taguchi L9 method in Black-Scholes model for European call option // *International Journal of Entrepreneurship*. 2018. Vol. 22, no. 1. P. 1–13.
5. Du F. P. et al. Enhancing the heat transfer efficiency in graphene-epoxy nanocomposites using a magnesium oxide-graphene hybrid structure // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. Vol. 7, no. 26. P. 14397–14403. DOI: 10.1021/acsami.5b03196
6. Heng C. W., Yang M. H. Heat transfer performance enhancement of gravity heat pipes by growing AAO nanotubes on inner wall surface // *Inventions*. 2018. DOI: 10.3390/inventions3030042
7. Kamaruddin S., Khan Z. A., Wan K. S. The use of the Taguchi method in determining the optimum plastic injection moulding parameters for the production of a consumer product // *Jurnal Mekanikal*. 2004. Vol. 18. P. 98–110.
8. Kamyar A., Ong K. S., Saidur R. Effects of nanofluids on heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 65. P. 610–618.
9. Kushwaha M. K. A comparative study of different electrolytes for obtaining thick and well-ordered nano-porous anodic aluminium oxide (AAO) films // *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5. P. 1266–1273. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.438
10. Lee W., Ji R., Gösele U., Nielsch K. Fast fabrication of long-range ordered porous alumina membranes by hard anodization // *Nature Materials*. 2006. Vol. 5, no. 9. P. 741–747. DOI: 10.1038/nmat1717
11. Madhavi S. K., Sreeramulu D., Venkatesh M. Evaluation of optimum turning process of process parameters using DOE and PCA Taguchi method //

Materials Today Proceedings. 2017. Vol. 4, no. 2. P. 1937–1946. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.039

12. Meyer K. E. et al. Crystalline coherence length effects on the thermal conductivity of MgO thin films // *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51, no. 23. P. 10408–10417. DOI: 10.1007/s10853-016-0261-5

13. Mohapatra S., Nando G. B. Chemical modification of natural rubber in the latex stage by grafting cardanol, a waste from the cashew industry and a renewable resource // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52, no. 17. P. 5951–5957. DOI: 10.1021/ie400195v

14. Montgomery D. C. *Design and analysis of experiments*. 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2012.

15. Muralidharan S., Balaji S., Raja M. P. Analyze and optimize the process parameters of electrochemical machining of Ti6Al4V using orthogonal array (OA8) // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2018. Vol. 55, no. 1. P. 16–20. DOI: 10.14445/22315381/ijett-v55p204

16. Permal A., Devarajan M., Hung H. L., Zahner T., Lacey D., Ibrahim K. Controlled high filler loading of functionalized Al₂O₃-filled epoxy composites for LED thermal management // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. Vol. 27, no. 3. P. 1296–1307. DOI: 10.1007/s11665-018-3151-y

17. Poinern G. E. J., Ali N., Fawcett D. Progress in nano-engineered anodic aluminum oxide membrane development // *Materials*. 2010. Vol. 4, no. 3. P. 487–526.

18. Ramar A., Mutharasu D., Puurnaraj N. Growth of star gooseberry-like nickel–phosphorus films on aluminium as thermal interface material for light-emitting diode application // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. Vol. 30, no. 15. P. 14156–14166. DOI: 10.1007/s10854-019-01783-2

19. Rahimi M. H., Saramad S., Tabaian S. H., Marashi S. P., Zolfaghari A., Mohammadalinezhad M. Study the effect of striping in two-step anodizing process on pore arrangement of nano-porous alumina // *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 256, no. 1. P. 12–16. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.04.155
20. Stepniowski W. J., Zasada D., Bojar Z. First step of anodization influences the final nanopore arrangement in anodized alumina // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 206, no. 6. P. 1416–1422. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.09.004
21. Sundararajan M., Subramani S., Devarajan M., Jaafar M. Synthesis and analysis of anodic aluminum oxide-nanopore structure on Al substrates for efficient thermal management in electronic packaging // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. DOI: 10.1007/s10854-020