

УДК 620.1

Д.Я. Баринов<sup>1</sup>, П.С. Мараховский<sup>1</sup>, Е.Ю. Мальцева<sup>1</sup>,  
Е.Д. Беспрозванный<sup>2</sup>, Е.Е. Алясова<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ И АЛЮМООКСИДНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-43-48

*Печатные платы на основе алюминиевой подложки и слоя диэлектрика широко применяются при производстве электроники со значительными тепловыделениями. Эксплуатационные свойства плат и требуемые элементы систем охлаждения будут зависеть от теплофизических свойств самой платы и слоя диэлектрика. В работе исследуется теплопроводность многослойных заготовок для печатных плат со сформированными на алюминиевой подложке покрытиями из оксида алюминия. Показана зависимость интегральной теплопроводности печатной платы от толщины подложки и количества покрытий. Приведена методика для оценки теплопроводности алюмооксидного покрытия.*

**Ключевые слова:** теплопроводность, термическое сопротивление, оксид алюминия, покрытие, подложка, многослойный пакет, печатные платы.

D.Ya. Barinov<sup>1</sup>, P.S. Marahovski<sup>1</sup>, E.Yu. Maltceva<sup>1</sup>,  
E.D. Besprozvanniy<sup>2</sup>, E.E. Aliasova<sup>2</sup>

## RESEARCH OF THERMAL CONDUCTIVITY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS BASED ON ALUMINUM SUBSTRATE AND ALUMINA DIELECTRIC

*Printed circuit boards (PCB) based on aluminum substrate with dielectric layer are widely used for production of electronic devices with significant heat generation. The performance properties of the boards and the required elements of the cooling systems will depend on the thermophysical properties of both the board itself and its dielectric layer. This article describes the thermal conductivity of multilayer printed circuit boards coated with aluminum oxide. The dependence of the integral thermal conductivity on the thickness of the substrate and the number of coatings is shown. A technique for estimating the thermal conductivity of alumina coatings is presented.*

**Keywords:** thermal conductivity, thermal resistance, alumina, coating, substrate, multilayer package, PCB.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Русалокс» [Limited Liability Company «Ruaslox»]; e-mail: info@rusalox.ru

### Введение

Сплавы на основе алюминия находят широкое применение в элементах летательных аппаратов и промышленности [1–3]. Одними из применяемых полуфабрикатов являются листы и пластины. В зависимости от условий эксплуатации и налагаемых на элемент конструкции требований могут применяться как незащищенные листы, так и листы с функциональными покрытиями: антифрикционными, теплозащитными, адгезионными, антикоррозионными, диэлектрическими и др. [4–8].

В электротехнических изделиях для изготовления печатных плат применяются листы из алюминиевых сплавов с диэлектрическим покрытием из нанопористого оксида алюминия. Сверху оксидного покрытия наносится слой металла (чаще

всего меди), после травления которого образуется непосредственно рисунок печатных плат. Такая конструкция плат характеризуется рядом преимуществ перед традиционными печатными платами на основе фольгированных стеклотекстолитов, керамики и гетинаксов. Так, платы на основе алюминия обладают гораздо большей теплопроводностью, чем полимерные ( $>200$  Вт/(м·К) – у алюминия, 0,2–0,3 Вт/(м·К) – у стеклотекстолита). Металлические печатные платы обладают эффективным отводом тепла от электронных компонентов, поэтому при креплении к радиаторам охлаждения это обеспечивает перспективы их применения в электрических цепях с большим тепловыделением. Алюминиевые печатные платы обладают высокой надежностью и долговечностью, при этом

отсутствуют ограничения по размерам изготавливаемых панелей [9]. Отсутствие полимерной составляющей в конструкции плат делает их экологически безопасными, а применение металлической подложки обеспечивает производство печатных плат любых форм в соответствии с требованиями заказчика.

Эксплуатационные свойства печатных плат, а также условия теплообмена зависят от теплофизических свойств материалов. Так, для расчета необходимой площади радиаторов охлаждения и установки активных охлаждающих систем необходимо учитывать количество теплоты, отводимой от электронных компонентов, которая напрямую зависит от теплопроводности печатной платы. Определить теплопроводность алюминиевой подложки возможно традиционными методами: лазерной вспышки, стационарными и др. Однако определенные проблемы возникают при исследовании достаточно тонкого алюмооксидного покрытия, толщина которого составляет 100–150 мкм. В чистом виде возможно определение теплопроводности тонких пленок методом лазерной вспышки при использовании оправок In-plane. Суть их применения состоит в кратковременном нагреве центральной области образцов в виде диска и регистрации изменения температуры на периферии. Однако следует отметить, что из-за особенностей производства характеристики материала значительно различаются в плоскости покрытия и поперек него.

Цель данной работы – исследование теплопроводности многослойных заготовок для печатных плат, состоящих из металлической подложки на основе алюминиевого сплава и покрытия из оксида алюминия.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10].

### Материалы и методы

Исследовали материалы, состоящие из алюмооксидного покрытия, сформированного на подложке из алюминия способом оксидирования. Применяли подложки различной толщины – от 1,5 до 3 мм, при этом толщина покрытия составляла 100–150 мкм. Проводили измерения образцов двух типов: с покрытием на одной стороне подложки и с покрытием, нанесенным с обеих сторон.

Для определения теплопроводности применяли метод лазерной вспышки (Laser Flash Analysis – LFA), для чего на трех приборах проводили измерения теплопроводности, теплоемкости и плотности [11–13]. Исследования теплопроводности проводили методом лазерной вспышки на приборе LFA457 Microflash фирмы Netzsch. Прибор позволяет проводить измерения одновременно трех образцов в диапазоне температур от -125 до +500°С. Суть метода заключается

в облучении одной стороны образца кратковременным импульсом лазера, при этом бесконтактным датчиком считывается изменение температуры на обратной стороне образца. По анализу этой зависимости определяют теплопроводность материала. Классическим методом Паркера определяют теплопроводность в соответствии с выражением

$$a = 0,138785 \cdot \frac{L^2}{t_{0,5}}, \quad (1)$$

где  $L$  – толщина образца, мм;  $t_{0,5}$  – половина времени нарастания температуры, с.

Измерения проводили в среде аргона, который продували через измерительную ячейку со скоростью 70 мл/мин, при этом подготовка атмосферы в измерительной ячейке состояла из двух циклов «откачка–заполнение».

При измерении использовали образцы в виде дисков диаметром 12,7 мм и толщиной от 1,5 до 3 мм. Для того чтобы создать одинаковые оптические свойства поверхностей образца, обеспечить равномерное поглощение энергии лазера поверхностью, необходимо наносить на образец специальное покрытие. С учетом типа образца и температурного диапазона измерений нанесено графитовое покрытие толщиной 5 мкм. Диаметр каждого образца определяли с помощью штангенциркуля по ГОСТ 166–89, для чего измеряли значения в пяти точках, при этом окончательное значение получали после осреднения полученных значений [14]. Толщину образцов определяли микрометром по ГОСТ 6507–90 в пяти точках по плоскости диска [15]. Значение толщины, вносимое в прибор, являлось средним арифметическим значением измерений.

Значение теплопроводности, полученное с помощью метода лазерной вспышки, зависит от способа обработки экспериментальных результатов. Классический метод Паркера пригоден для идеальных условий эксперимента, которые при реальных измерениях достичь невозможно. К таким условиям относятся следующие: строго одномерная задача теплопереноса в образце, полное поглощение импульса лазера, импульс лазера имеет бесконечно малую длительность, адиабатические условия в системе «образец–измерительная ячейка», равномерное распределение импульса лазера по поверхности образца, отсутствие тепловых потоков на боковых гранях образца. Частично удовлетворить вышеуказанные требования можно путем подбора геометрических характеристик образца и параметров лазерной вспышки. В связи с этим разработаны различные модели, учитывающие несовершенство условий эксперимента. Среди них наиболее часто используются модели Кларк–Тейлора, Ацуми, Кейп–Лемана, Кована, излучения. Установлено, что при исследовании металлических материалов наиболее подходящей моделью является модель

Результаты измерения температуропроводности образцов

Температура испытания, °С	Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с, образцов с подложкой			
	без покрытия	толщиной 3 мм и покрытием		толщиной 1,5 мм и покрытием с одной стороны
		с одной стороны	с двух сторон	
-60	82,8	52,9	35,9	34,4
-20	80,3	49,0	33,3	32,4
20	78,7	48,2	31,7	30,8
50	77,8	47,0	31,5	30,5
100	76,3	45,5	29,2	29,4
150	74,8	43,2	28,3	28,5
200	73,4	42,3	27,7	27,9

Кейп–Лемана. Эта модель используется в данной работе при обработке экспериментальных результатов.

Теплоемкость слоистых материалов можно определять с помощью метода лазерной вспышки [16] или методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [17]. Теплоемкость исследуемых материалов измеряли с использованием метода ДСК, в соответствии с которым определяли разность температур тигля с исследуемым образцом и пустого тигля (тигель сравнения). Эти тигли находятся в одинаковых тепловых условиях и нагреваются по одинаковой температурно-временной программе. В качестве эталонного материала, согласно которому определялась теплоемкость, взят сапфир. Эталонный материал предварительно испытывали по той же температурно-временной программе, которую использовали при исследованиях. Для измерения применяли прибор DSC204F1 Phoenix фирмы Netzsch, который позволяет проводить измерения в диапазоне температур от -125 до +600°С. Использовали образцы размером 4×4 мм и толщиной 1,5 мм, нижнюю поверхность которых шлифовали с помощью наждачной бумаги с зерном P500. Измерения проводили в тигле из алюминия объемом 25 мкл, при этом для обеспечения теплового контакта между

образцом и дном тигля применяли порошок из оксида алюминия. Порошок навеской 10,0 мг засыпали на дно тигля и вручную уплотняли с помощью металлического стержня. Измерения проводили в среде аргона, который продували через измерительную ячейку со скоростью 50 мл/мин. Нагрев проводили со скоростью 5 К/мин. Предварительно прибор откалибровали по температуре и чувствительности с использованием стандартных веществ: In, Sn, Bi, Zn. Для этого каждое вещество нагревали несколько выше температуры плавления и регистрировали фазовый переход. В результате определяли фактическую температуру плавления и тепловой эффект плавления, согласно которым строили калибровочные зависимости.

Плотность определяли методом гидростатического взвешивания при комнатной температуре. Для определения плотности использовали образцы-диски размером  $\varnothing 12,7 \times 3$  мм. Перед измерением образцы термостатировали в течение 60 мин.

### Результаты и обсуждение

Проводили исследование чистых подложек без покрытия, подложек с одним покрытием и подложек с двумя покрытиями. Результаты измерений температуропроводности приведены в табл. 1 и на рис. 1, а.

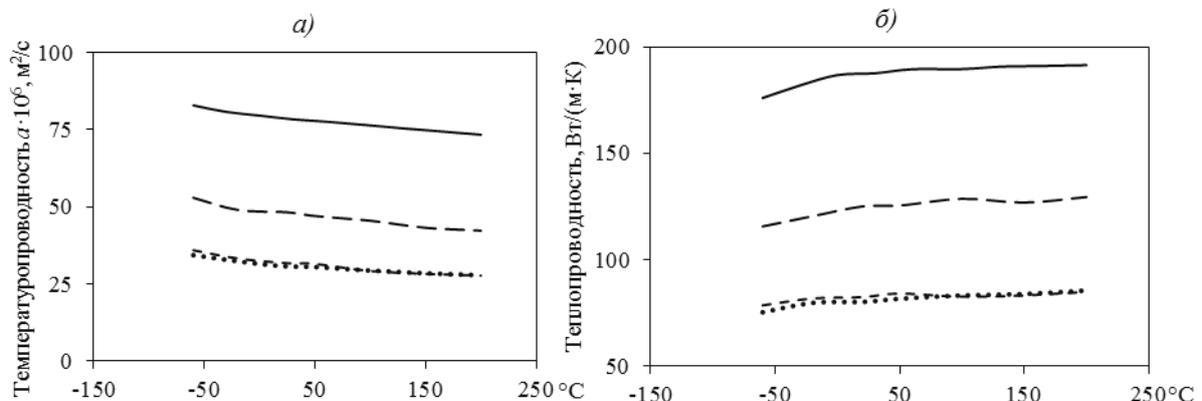


Рис. 1. Результаты измерения температуропроводности (а) и теплопроводности (б) подложки без покрытия (—), подложки толщиной 1,5 мм с покрытием с одной стороны (·····) и подложки толщиной 3 мм с покрытием с одной (— — —) и двух сторон (- - - -)

Результаты измерения теплопроводности образцов

Температура испытания, °С	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К), образцов с подложкой			
	без покрытия	толщиной 3 мм и покрытием		толщиной 1,5 мм и покрытием с одной стороны
		с одной стороны	с двух сторон	
-60	176,1	115,7	78,6	75,3
-20	183,6	120,5	81,8	79,8
20	187,4	125,1	82,4	80,2
50	189,0	125,5	84,1	81,7
100	189,7	128,7	82,6	83,3
150	191,0	126,9	83,2	83,9
200	191,5	129,5	84,9	85,5

При проведении исследований теплоемкости и плотности образцов установлено, что в пределах погрешности метода измерений покрытие не оказывает заметного влияния на значения характеристик. Оценочный расчет с использованием правила смесей показал, что при использовании подложек толщиной 1,5 мм при толщине покрытия 150 мкм вклад материала покрытия в интегральную плотность и теплоемкость будет составлять ~5%. При измерении плотности различных образцов получили значения от 2,65 до 2,68 г/см<sup>3</sup>, а при определении теплопроводности среднее значение составило 2,67 г/см<sup>3</sup>.

Результаты определения теплопроводности образцов приведены в табл. 2 и на рис. 1, б.

На рис. 1, а видно, что все зависимости показывают одинаковую тенденцию к уменьшению температуропроводности в диапазоне температур от -60 до +200°С. Температуропроводности подложки толщиной 1,5 мм с одним нанесенным покрытием и подложки толщиной 3 мм с двумя покрытиями имеют одинаковые значения. Некоторые отличия укладываются в погрешность метода измерения 5%. Такое совпадение результатов измерений объясняется тем, что многослойные пакеты являются одинаковыми – один является симметричной половиной второго. При сравнении с температуропроводностью чистой подложки толщиной 1,5 мм видно, что покрытие толщиной 150 мкм снижает значения показателя в 2,5 раза.

Аналогичные явления наблюдаются на зависимостях теплопроводности (рис. 1, б). Кривые имеют одинаковую тенденцию к увеличению значений, при этом значения теплопроводности подложки толщиной 1,5 мм с одним нанесенным покрытием и подложки толщиной 3 мм с двумя покрытиями совпадают.

Подложку с нанесенным покрытием можно рассматривать как двухслойную или трехслойную систему, которая позволяет оценить теплопроводность покрытия расчетным способом. Схема такой системы приведена на рис. 2. Для этого необ-

ходимы результаты определения теплопроводностей многослойного пакета, подложки и толщины всех слоев пакета. Величина, равная отношению толщины слоя к его теплопроводности ( $h/\lambda$ ), является термическим сопротивлением. В общей постановке задачи термическое сопротивление многослойного пакета равно сумме термических сопротивлений всех слоев пакета:

$$\frac{h_{\Pi 1}}{\lambda_{\Pi 1}} + \frac{h_{\Pi 2}}{\lambda_{\Pi 2}} + \frac{h_{\Pi}}{\lambda_{\Pi}} + R_1 + R_2 = \frac{h_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где  $h$  – толщина, м;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $R$  – граничное термическое сопротивление, Вт/(м<sup>2</sup>·К); индекс П1 относится к покрытию 1; П2 – к покрытию 2; П – к подложке;  $\Sigma$  – к многослойному пакету; 1 – к границе между подложкой и покрытием 1; 2 – к границе между подложкой и покрытием 2.

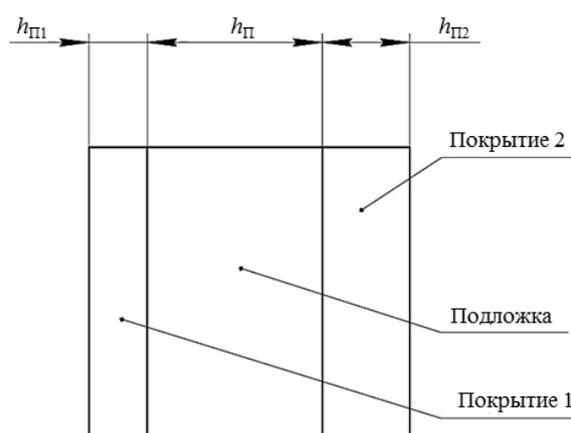


Рис. 2. Схема многослойного пакета с алюмооксидным покрытием

В случае если материалы покрытий разные, то задача становится неопределенной. Однако при проведении исследований покрытие было одинаковым с двух сторон подложки, в связи с этим можно записать следующее выражение:

Таблица 3

Результаты расчета теплопроводности алюмооксидных покрытий

Температура испытания, °С	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К), образцов с подложкой толщиной, мм		
	3		1,5
	покрытие с одной стороны	покрытие с двух сторон	покрытие с одной стороны
-60	14,7	12,0	11,2
-20	15,3	12,5	12,0
20	16,4	12,5	11,9
50	16,3	12,8	12,2
100	17,3	12,4	12,6
150	16,5	12,5	12,7
200	17,3	12,9	13,1

$$\lambda_{\text{п},2} = \frac{\lambda_{\Sigma} \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п1}} + h_{\text{п2}})}{(h_{\Sigma} - \lambda_{\Sigma} \cdot (R_1 + R_2)) \cdot \lambda_{\text{п}} - h_{\text{п}} \cdot \lambda_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{п},2}$  – теплопроводность покрытия, Вт/(м·К).

В связи с особенностями изготовления образца можно пренебречь граничным термическим сопротивлением. Это связано с тем, что при анодировании обеспечивается высокая адгезия покрытия к подложке и сплошность контакта. В этом случае выражение (3) упрощается до вида

$$\lambda_{\text{п},2} = \frac{\lambda_{\Sigma} \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п1}} + h_{\text{п2}})}{h_{\Sigma} \cdot \lambda_{\text{п}} - h_{\text{п}} \cdot \lambda_{\Sigma}}. \quad (4)$$

Полученное выражение является результирующим при расчетном определении теплопроводности покрытия в многослойном пакете, состоящем из подложки и двух покрытий. В случае если многослойный пакет состоит из подложки и одного покрытия, можно записать результирующее выражение, приравняв к нулю значение  $h_{\text{п1}}$  или  $h_{\text{п2}}$  в выражении (4).

Далее исследовали нанесенные на подложки покрытия. По приведенной методике рассчитали значения теплопроводности покрытий образцов. Результаты, полученные при допущении, что толщина покрытий постоянна и составляет 150 мкм, приведены в табл. 3.

По результатам расчетов теплопроводности построены зависимости, приведенные на рис. 3. Видно, что зависимости эквидистантны, некоторые отклонения связаны с совокупной погрешностью при определении теплопроводностей, входящих в формулу (4). Разброс рассчитанных значений теплопроводности покрытий составляет ~30%, что связано с определением толщины

покрытий. Согласно документации на материал, толщина покрытия составляет 100–150 мкм, при этом при расчетах толщина принималась равной 150 мкм.

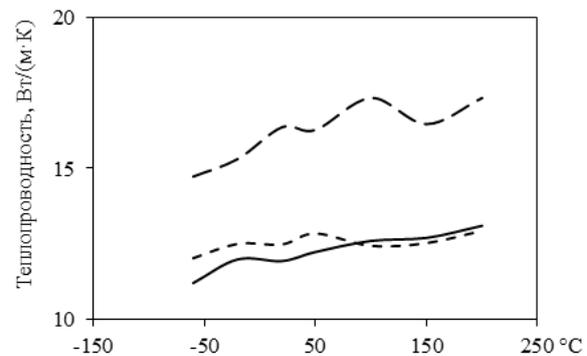


Рис. 3. Результаты расчета теплопроводности покрытий на подложке толщиной 1,5 мм с одним покрытием (—) и на подложке толщиной 3 мм с одним (— —) и двумя покрытиями (- - -)

### Заключения

Проведены исследования теплофизических свойств заготовок для изготовления печатных плат на основе алюминиевой подложки и алюмооксидного покрытия в диапазоне температур от -60 до +200°С. Исследованы чистая алюминиевая подложка и многослойные пакеты, состоящие из подложки различной толщины и нанесенных покрытий. Показана зависимость теплопроводности от толщины алюминиевой подложки.

Предложена методика для определения теплопроводности алюмооксидного покрытия и проведены ее оценочные расчеты. Показано, что некоторые отличия связаны с погрешностью определения характеристик слоев.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.

2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты и их основе // Цветные металлы. 2016. №8. С. 86–91.
4. Кашин Д.С., Стехов П.А. Современные теплозащитные покрытия, полученные методом электронно-лучевого напыления (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №2 (62). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-10-10.
5. Горлов Д.С., Александров Д.А., Замятова О.В., Азаровский Е.Н. Исследование возможности защиты интерметаллидного титанового сплава от фреттинг-износа путем нанесения ионно-плазменного покрытия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №4 (64). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-51-58.
6. Демин С.А., Виноградов С.С. Ремонт химического оксидного покрытия на углеродистой стали // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №9 (69). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-43-50.
7. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. №5. С. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
8. Павловская Т.Г., Козлов И.А., Волков И.А., Захаров К.Е. Формирование твердых износостойких анодно-оксидных покрытий на деталях из литейных алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-4-4.
9. ООО «Русалокс»: [офиц. сайт]. URL: <http://www.rusalox.ru> (дата обращения: 16.11.2018).
10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. ASTM E1461–01. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. 2001. P. 1–13.
12. ISO 22007-4:2017. Plastics -- Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity -- Part 4: Laser flash method. 2017. P. 1–17.
13. ГОСТ Р 57943–017. Пластмассы. Определение теплопроводности и температуропроводности. Часть 4. Метод лазерной вспышки. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
14. ГОСТ 166–89. Штангенциркули. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 10 с.
15. ГОСТ 6507–90. Микрометры. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1990. 11 с.
16. Лощинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Пахомкин С.И. Исследование теплоемкости металлических материалов с покрытием методом лазерной вспышки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. №9. С. 40–44.
17. ГОСТ Р 56754. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 4. Определение удельной теплоемкости. М.: Стандартинформ, 2016. 14 с.