

Научная статья

УДК 621.793.71

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-104-113

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СОСТАВНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБРАЗЦОВ

Д.Я. Баринов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. При исследовании теплофизических свойств новых материалов часто возникает необходимость измерений составных образцов, состоящих из подложки с нанесенным покрытием. В данной работе рассматривается методика измерения теплопроводности образца, расположенного между двумя дисками-подложками, по трехслойной модели. Проведен анализ влияния термического сопротивления между слоями на результаты измерений. Показано, что нанесение силиконового масла и графитовой смазки ведет к снижению погрешности измерений до 40 % по сравнению с использованием чистого контакта «металл–металл».

Ключевые слова: теплопроводность, удельная теплоемкость, теплофизические свойства, импульсный метод, теплоперенос, термическое сопротивление

Для цитирования: Баринов Д.Я. Исследование теплопроводности составных многослойных образцов // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-104-113.

Scientific article

INVESTIGATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF COMPOSITE MULTILAYER SAMPLES

D.Ya. Barinov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. When studying the thermophysical properties of new materials, it is often necessary to measure composite samples consisting of a coated substrate. In this paper, we consider a technique for measuring the thermal conductivity of a sample located between two substrate disks using a three-layer model. The influence of thermal resistance between layers on the measurement results is analyzed. It is shown that the application of silicone oil and graphite lubricant reduces the measurement error by up to 40 % compared with the use of pure metal-to-metal contact.

Keywords: thermal conductivity, heat capacity, thermophysical characteristics, pulse method, heat transfer, thermal resistance

For citation: Barinov D.Ya. Investigation of thermal conductivity of composite multilayer samples. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-104-113.

Введение

Развитие современных образцов авиационной и ракетно-космической техники во многом связано с разработкой и созданием широкого спектра новых материалов конструкционного и функционального назначения, имеющих различные уровни физико-

механических и теплофизических характеристик [1]. К таким материалам относятся композиционные материалы различной физической природы, сплавы, а также защитные покрытия различных типов [2–5].

Применяемые композиционные материалы состоят из двух и более разнородных фаз: матрицы и наполнителя. Наполнитель представляет собой длинные и короткие волокна, гранулы или дисперсные частицы на стеклянной, углеродной, органической, керамической или металлической основе и предназначается для упрочнения материала и восприятия основной механической нагрузки. Часто наполнитель определенной природы вводится для изменения функциональных свойств материала – например, создания определенных оптических характеристик или изменения электрической проводимости в определенном направлении. Матрица, в свою очередь, связывает наполнитель в единую систему и перераспределяет внешнюю нагрузку в материале. В качестве матриц используются различные полимерные связующие, металлы и сплавы, керамические материалы.

Для защиты материала от воздействия других элементов летательных аппаратов и внешних факторов окружающей среды применяются различные покрытия: антифрикционные, износостойкие, антиокислительные, теплозащитные и многие другие [6–9]. Такие покрытия наносятся на основной материал, часто с использованием промежуточного слоя, повышающего взаимную адгезию, и выполняют защитные функции.

При проектировании элементов конструкции и расчетах характеристик прочности и теплопередачи необходимо проводить комплексные исследования материалов с использованием лабораторных и натуральных экспериментальных стендов и установок [10]. Часто не представляется возможным изготовить образцы для испытаний необходимых геометрических размеров или требуемой микроструктуры. Например, при изготовлении горячего тракта ГТД применяются керамические теплозащитные покрытия с подслоем, имеющие малую толщину (до 100–500 мкм), в итоге провести непосредственное измерение ряда их свойств невозможно. Поэтому экспериментальную обработку проводят с использованием специальных подходов и оправок для образцов [11].

Одной из основных характеристик материала, определяющих температурное состояние конструкции летательного аппарата при его эксплуатации, является теплопроводность. Одним из наиболее распространенных методов исследования теплопроводности различных материалов в широком диапазоне температур является нестационарный импульсный метод. Данный метод при реализации на серийно выпускаемом лабораторном оборудовании имеет ограниченное применение при исследовании тонких (толщиной <0,5 мм) образцов, связанное с используемой частотой аналого-цифрового преобразователя (АЦП) приборов. Так, на стандартном оборудовании фирмы Netzsch используется АЦП с частотой 500 кГц. Это ведет к связанному с системой сбора данных ограничению минимальной толщины образцов из нержавеющей стали на уровне 0,12 мм, а корунда 0,2 мм. Имеется возможность расширения допустимых толщин исследуемых образцов путем повышения частоты АЦП, однако это приведет к увеличению стоимости измерительного оборудования.

Альтернативным методом исследований является использование многослойных образцов [12], которые представляют собой соединенные друг с другом исследуемый образец и подложку с известными теплофизическими свойствами. В зависимости от их взаимодействия следует выделить керамические покрытия, нанесенные на подложку магнетронным и электронно-лучевым способами; лакокрасочные и напыляемые покрытия. При такой технологии нанесения обеспечивается высокий уровень адгезии материалов, и влиянием граничного термического сопротивления контакта между слоями можно пренебречь. При измерении мягких и гибких образцов (например, на основе эластомеров, резин или жидких образцов в контейнерах) также обеспечивается хороший

тепловой контакт. Определенные технические сложности вызывает оценка контактного термического сопротивления между слоями образца из твердых и жестких материалов. В таком случае может наблюдаться неплотное прилегание образца и диска-подложки. Кроме того, контактирование поверхностей образцов осуществляется по вершинам микронеровностей и шероховатостей поверхности, и величина термического сопротивления будет определяться качеством подготовки поверхностей перед измерением. Оценка контактного термического сопротивления проводилась многими авторами с использованием расчетно-экспериментальных методов [13–16]. Часто могут использоваться методы математического моделирования теплового контакта на микроуровне – например, в мультифизических программных пакетах Comsol Multiphysics, Ansys Workbench и т. д., однако предварительно требуется исследование микроструктуры поверхности для создания конечно-элементной модели.

Цель данной работы – исследование теплопроводности слоев многослойного составного образца и граничного термического сопротивления между слоями и определение получаемых погрешностей измерений.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [17].

Материалы и методы

Для исследования теплопроводности образца использован метод лазерной вспышки, реализованный на приборе LFA457 Microflash фирмы Netzsch по методике из ГОСТ Р 57943–2017 [18, 19]. Измерения проводились при скорости нагрева образца 5 К/мин в динамической среде аргона, продуваемого через измерительную ячейку с расходом 70 мл/мин. Суть метода состоит в воздействии на одну из поверхностей (фронтальную) исследуемого образца в виде тонкого диска короткого импульса лазера. Как правило, длительность лазерного импульса составляет 3–4 мс при подводимой энергии до 20 Дж. После воздействия импульса на образец в общем случае имеет место нестационарный процесс радиационно-кондуктивного теплопереноса в образце, приводящий к изменению температуры тыльной стороны образца. С помощью бесконтактного датчика регистрируется изменение температуры на тыльной стороне образца, а затем с помощью анализа и математической обработки полученного сигнала определяется температуропроводность (рис. 1). В связи с использованием современного компьютеризированного оборудования для обработки получаемого сигнала оперируют изменением напряжения на выходе бесконтактного датчика, пропорциональным температуре. Это приводит к отсутствию необходимости определения абсолютного изменения температуры тыльной поверхности, что упрощает получение результатов. При наличии информации о плотности и удельной теплоемкости образца рассчитывают теплопроводность. Измерения проводят при использовании ряда допущений и гипотез. Так, образец должен быть однородным, монолитным и изотропным, располагаться в адиабатических условиях и иметь одинаковые оптические свойства поверхностей. Импульс лазера должен быть нулевой длительности, равномерной интенсивности и полностью поглощаться всей фронтальной поверхностью. В образце должно реализовываться однородное температурное поле при отношении характерного размера (диаметра или стороны) образца к его толщине при значении не менее 10. Для определения плотности использован метод обмера и взвешивания по методике из ГОСТ 15139–69 [20].

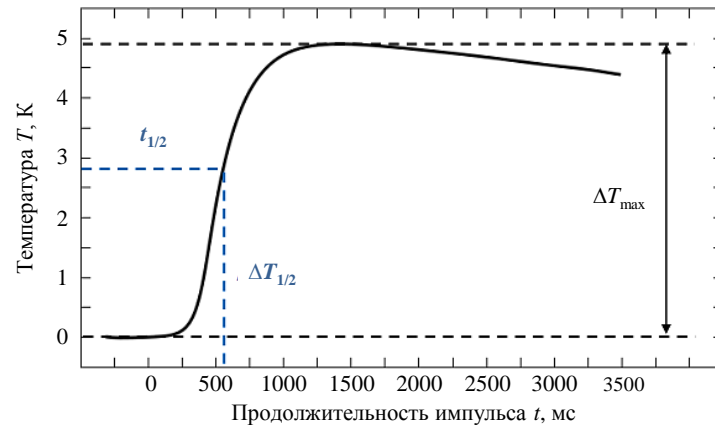


Рис. 1. Характерная зависимость изменения температуры тыльной поверхности образца при измерениях методом лазерной вспышки

Объектом исследования выбран образец из сплава Inconel 600, поставляемый в комплекте с измерительным оборудованием в качестве стандартного калибровочного образца. Диаметр образца составлял 12,599 мм при толщине 0,988 мм и плотности 8,269 г/см³.

Измерение температуропроводности и теплопроводности однослойного образца не вызывает технических трудностей и проводится с использованием стандартных методов и оправок. Интерес представляют измерения составных образцов, состоящих из слоя с известными теплофизическими свойствами и исследуемого слоя. Часто составным образцом является образец, установленный в контейнере, обеспечивающем проведение измерений – например, при измерениях теплопроводности жидкостей, помещенных в оправку в виде металлического тигля, закрытого крышкой.

В данной работе исследования проведены с использованием специальной оправки для измерений образцов при действии внешнего давления, поставляемой производителем оборудования. Схема оправки приведена на рис. 2. Оправка состоит из металлических основания и крышки, соединяемых резьбовым соединением. Исследуемый образец помещается между двумя металлическими дисками-подложками и зажимается динамометрическим ключом с контролируемым моментом затяжки.

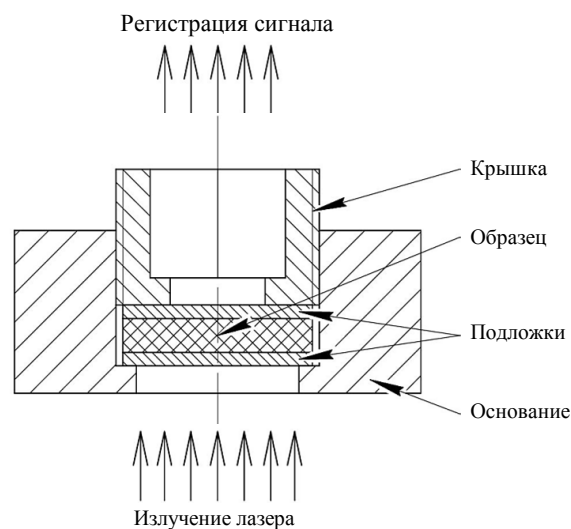


Рис. 2. Схема оправки для реализации повышенного давления при измерениях методом лазерной вспышки

При измерениях с использованием такой оправки требуется обработка результатов с использованием трехслойной модели, при этом теплофизические и геометрические свойства подложек должны быть известны или предварительно определены по классической однослойной модели, а теплопроводность среднего слоя (образца) неизвестна. Необходимо также анализировать и учитывать граничное термическое сопротивление между дисками-подложками и исследуемым образцом.

Известно, что общее термическое сопротивление (отношение толщины к теплопроводности) такого многослойного составного образца является суммой термических сопротивлений каждого из слоев:

$$\frac{h_{П1}}{\lambda_{П1}} + \frac{h_{П1}}{\lambda_{П2}} + \frac{h_{О}}{\lambda_{О}} + R_1 + R_2 = \frac{h_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где h – толщина, м; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); R – граничное термическое сопротивление, Вт/(м²·К); индекс П1 относится к нижней подложке, П2 – к верхней подложке, О – к образцу, Σ – к многослойному образцу, 1 – к границе между образцом и нижней подложкой, 2 – к границе между образцом и верхней подложкой.

Контактное термическое сопротивление может достигать величин, отличающихся от термического сопротивления исследуемого образца на несколько порядков. Это ведет к необходимости снижения влияния контактного сопротивления на результаты измерений. Для этого используют высокотеплопроводную прослойку, которая обеспечивала бы хороший тепловой контакт между образцом и подложками. Материалом прослойки может быть металлическая мягкая фольга, высокотеплопроводные масла или пасты.

При исследовании теплопроводности составного образца в рамках данной работы в качестве прослойки использовались силиконовое масло и графитовая смазка, а также проводились работы при чистом контакте слоев «металл–металл». При использовании высокотеплопроводного слоя граничными термическими сопротивлениями можно пренебречь. В таком случае неизвестная теплопроводность исследуемого образца будет определяться выражением

$$\lambda_{О} = \frac{\lambda_{\Sigma} \cdot \lambda_{П1,2} \cdot h_{О}}{h_{\Sigma} \cdot \lambda_{П1,2} - \lambda_{\Sigma} \cdot (h_{П1} + h_{П2})}. \quad (2)$$

Результаты и обсуждение

На первом этапе с использованием метода лазерной вспышки проведены измерения температуропроводности стандартного образца из сплава Inconel 600 по однослойной модели. Для создания требуемых оптических свойств поверхностей образца его фронтальная и тыльная стороны покрывались слоем графита толщиной 5 мкм путем распыления из аэрозоля. При обработке результатов измерений и расчете теплопроводности использовались значения плотности и удельной теплоемкости, приведенные в сертификате на образец. Результаты измерений и табличные значения приведены на рис. 3 (зависимости 1 и 2). Теплопроводность образца изменяется практически линейно с 12,9 до 17,4 Вт/(м·К). Максимальная погрешность измерения теплопроводности образца в выбранном диапазоне температур оценивается в 1,8 %. Увеличивающееся отклонение в области высоких температур связано с тепловым расширением образца и изменением его толщины, которая измеряется при комнатной температуре. В диапазоне температур от 20 до 300 °С относительное удлинение материала образца составляет 0,4 %. Учет коэффициента линейного термического расширения приводит к уточнению результатов измерений (рис. 3, зависимость 3). В этом случае теплопроводность образца изменяется с 12,9 до 17,5 Вт/(м·К), а максимальная погрешность измерений снижается до 1 %.

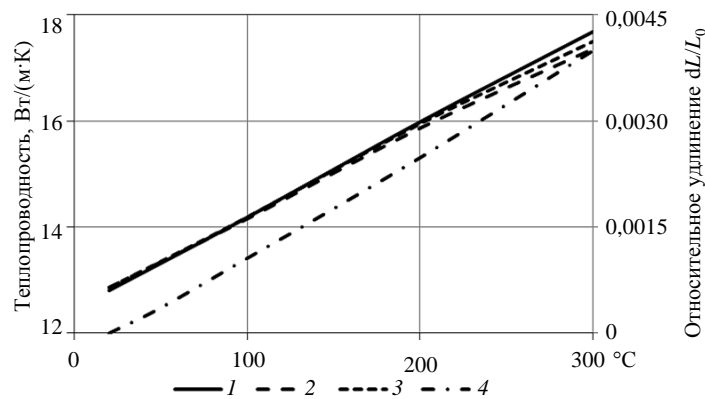


Рис. 3. Температурные зависимости теплопроводности (1–3) и относительного удлинения (4) исследуемого образца, определенные по однослойной модели: 1, 2, 3 – значения из сертификата и измеренные без учета и с учетом термического расширения образца соответственно

На втором этапе проводились измерения температуропроводности и теплопроводности этого же образца с использованием специальной оправки (рис. 2). В качестве верхней и нижней подложек использовались диски из алюминия толщиной 1 мм и диаметром 14 мм. Предварительно методами лазерной вспышки, дифференциальной сканирующей калориметрии и гидростатического взвешивания определялись температуропроводность и теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность материала дисков-подложек. Результаты измерений удельной теплоемкости и теплопроводности материала дисков-подложек приведены на рис. 4. Измерения составного образца проводились при чистом контакте между слоями, при использовании в качестве прослойки силиконового масла и графитовой смазки. Результаты измерений приведены на рис. 5.

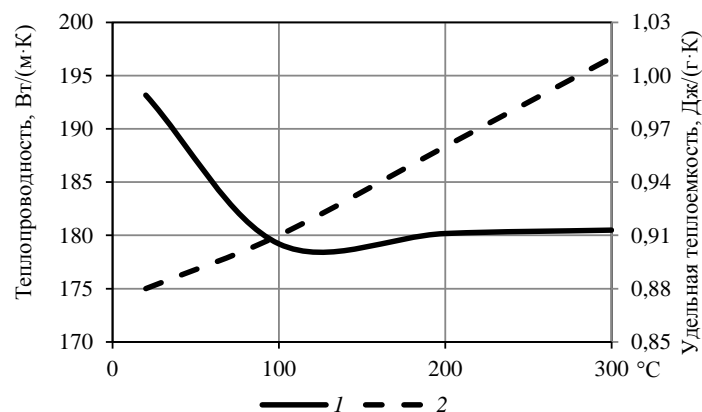


Рис. 4. Температурные зависимости теплопроводности (1) и удельной теплоемкости (2) материала дисков-подложек

Видно, что в зависимости от типа применяемой прослойки значения теплопроводности могут значительно отличаться. Отличие значений теплопроводности, измеренных без использования теплопроводящей прослойки (при чистом контакте «металл–металл») между слоями, от значений для однослойной модели достигает 50–52 %. Это объясняется высоким термическим сопротивлением, возникшим между слоями. Поверхности дисков и исследуемого образца не являются идеальными и имеют микронеровности в виде волнистости и шероховатости. Тепловой контакт в этом случае тоже осуществляется точно по вершинам микронеровностей.

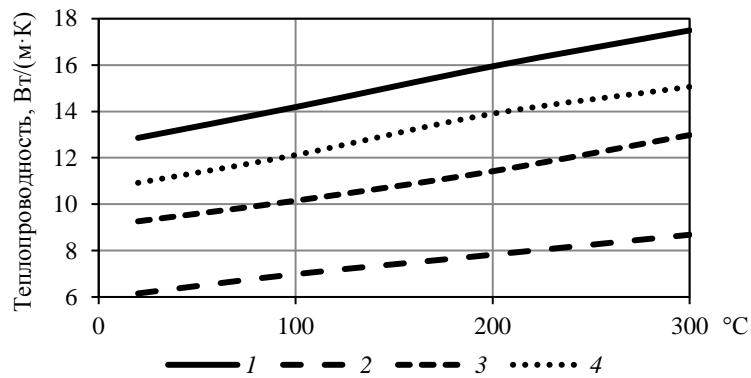


Рис. 5. Температурные зависимости теплопроводности для стандартного образца, измеренные по однослойной модели (1), и для составного образца, измеренные по трехслойной модели без использования прослойки (2) и с прослойкой в виде силиконового масла (3) и графитовой смазки (4)

Использование силиконового масла и графитовой смазки приводит к лучшему совпадению результатов, полученных по однослойной и трехслойной моделям. Погрешности измерения в этом случае составляют 25–28 % (для силиконового масла) и 12–15 % (для графитовой смазки). Оба материала наносятся на поверхность образцов в виде жидкой фазы, хорошо смачивающей микронеровности поверхности. Отличие результатов связано с теплофизическими характеристиками материалов прослоек – главным образом теплопроводности. Силиконовое масло имеет теплопроводность $\sim(0,14–0,18)$ Вт/(м·К), при этом диапазон его применения ограничен температурой вспышки, находящейся на уровне 250–300 °С. Графитовая смазка с учетом ее чешуйчатой структуры после испарения растворителя имеет теплопроводность >30 Вт/(м·К), что обеспечивает лучшее совпадение показателей однослойной и трехслойной моделей. Несмотря на это, добиться совпадения измеренных по двум моделям значений теплопроводности лучше, чем в пределах 10–15 %, не удалось. Таким образом, можно предположить, что погрешность самого метода измерения теплопроводности неизвестного образца по трехслойной модели находится на уровне 10–15 %.

По анализу полученных зависимостей (рис. 5) с использованием формулы (1) можно сделать вывод об уровне граничного термического сопротивления между исследуемым образцом и дисками-подложками, при этом считалось, что термическое сопротивление одинаково для обоих стыков. Граничное сопротивление чистого контакта «металл–металл» оценивается в $(5,5–6,2) \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт. Данные значения согласуются с научно-техническими литературными данными, полученными с использованием численного моделирования. Граничные термические сопротивления контактов с использованием силиконового масла и графитовой смазки оцениваются соответственно в $(2,0–2,4) \cdot 10^{-5}$ и $(1,0–1,3) \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт.

Заключения

В результате исследования проведены измерения температуропроводности и теплопроводности стандартного образца из сплава Inconel 600 в диапазоне температур от 20 до 300 °С методом лазерной вспышки. Значения теплопроводности образца изменяются монотонно с 12,8 до 17,5 Вт/(м·К). Максимальная погрешность измерений составляет 1,8 и 1 % при измерениях без учета и с учетом коэффициента линейного термического расширения.

С использованием специальной оправки для выполнения измерений при воздействии внешнего давления проведено исследование теплопроводности составного образца, состоящего из стандартного образца из сплава Inconel 600, помещенного между двух дисков из алюминия с известными теплофизическими свойствами. Выполнен анализ граничного термического сопротивления между слоями, для чего проводились измерения при использовании различных теплопроводящих прослоек между дисками и образцом, а также при чистом контакте «металл–металл». Использование силиконового масла для обеспечения хорошего теплового контакта приводит к погрешности измерений 25–28 % по сравнению с чистым контактом «металл–металл» (50 %), а применение высокотеплопроводной графитовой смазки – к снижению погрешности до 12–15 %. Проведена оценка величины контактного термического сопротивления между слоями составного образца, которую следует учитывать при обработке полученных импульсным методом результатов измерений составных образцов для достижения низкой погрешности.

Список источников

1. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. № 3. С. 8–13.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 36–52.
3. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты и их основе // Цветные металлы. 2016. № 8. С. 86–91.
5. Капланский Ю.Ю., Мазалов П.Б. Мировые тенденции развития тугоплавких высокоэнтропийных сплавов для теплонагруженных узлов аэрокосмической техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.03.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
6. Кашин Д.С., Стехов П.А. Современные теплозащитные покрытия, полученные методом электронно-лучевого напыления (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 2 (62). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-10-10.
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. Будиновский С.А., Ляпин А.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С., Татарников С.В. Нанесение многослойного антифреттингового покрытия на крупногабаритные изделия // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.03.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
9. 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. 2015. № 8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-4-4.
10. Зуев А.В., Лощинин Ю.В., Баринов Д.Я., Мараховский П.С. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 575–595. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595.
11. Netzsch. Thermoreflectance method. URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/contact-testing/methods/thermoreflectance> (дата обращения: 23.03.2023).
12. Лощинин Ю.В., Размахов М.Г., Пахомкин С.И., Луценко А.Н. Влияние состава и технологии нанесения многослойных теплозащитных покрытий, изготовленных газотермическим напылением, на теплопроводность // Труды ВИАМ. 2019. № 6 (78). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-95-103.

13. Ежов А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал C–Si–C и титановый сплав // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov_rus.pdf (дата обращения: 23.03.2023).
14. Ежов А.Д. Моделирование шероховатости поверхности для контактных теплопрочностных задач // Сб. тез. докл. XLII Междунар. молодежной науч. конф. «Гагаринские чтения» (Москва, 12–15 апр. 2016 г.). М.: МАИ, 2016. Т. 1. С. 105–106.
15. Меснянкин С.Ю., Диков А.В. Расчет термического сопротивления контакта элементов энергетических установок с волнистыми поверхностями // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/6dc/6dc7a30f6c82e050847e8b0204d4c78a.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).
16. Меснянкин С.Ю., Ежов А.Д., Басов А.А. Определение контактного термического сопротивления на базе трехмерного моделирования соприкасающихся поверхностей // Известия Академии наук. Сер.: Энергетика. 2014. № 5. С. 65–74.
17. 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.
18. ГОСТ Р 57943–2017. Пластмассы. Определение теплопроводности и температуропроводности. Часть 4. Метод лазерной вспышки. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
19. ASTM E1461–01. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. 2001. P. 1–13.
20. ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). М.: Изд-во стандартов, 1981. 17 с.

References

1. Kablov E.N. Russia Needs New Generation Materials. *Redkiye zemli*, 2014, no. 3, pp. 8–13.
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nickel foundry heat resisting alloys of new generation. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 36–52.
3. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
4. Kablov E.N., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. Aluminum-lithium alloys of a new generation and layered alumina-glass-reinforced plastics and their basis. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 8, pp. 86–91.
5. Kaplanskii Yu.Yu., Mazalov P.B. World trends in the development of refractory high-entropy alloys for heat-loaded units of aerospace technics (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 23, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
6. Kashin D.S., Stekhov P.A. Modern thermal barrier coatings obtained by electron-beam physical vapor deposition (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 2, paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-10-10.
7. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V. Protection against corrosion of carbon steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
8. Budinovskiy S.A., Lyapin A.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S., Tatarnikov S.V. Multilayer antifretting coating on large-sized manufactures. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 23, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
9. Pavlovskaya T.G., Kozlov I.A., Volkov I.A., Zakharov K.E. Formation of hard wear-resistant anodic oxide coatings on parts made of casting aluminium alloys. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 04. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-4-4.
10. Zuev A.V., Loshchinin Yu.V., Barinov D.Ya., Marakhovskij P.S. Computational and experimental investigations of thermophysical properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 575–595. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595.

11. Netzsch. Thermoreflectance method. Available at: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/contact-testing/methods/thermoreflectance> (accessed: March 23, 2023).
12. Loshchinin Yu.V., Razmakhov M.G., Pakhomkin S.I., Lutsenko A.N. Influence of structure and technology of drawing of multilayer heat-protective coatings produced by thermal spraying dusting on thermal conductivity. *Trudy VIAM*, 2019, no. 6 (78), paper no. 10. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-95-103.
13. Ezhov A.D. Determination of contact thermal resistance of a pair: composite material C–Si–C and titanium alloy. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. Available at: http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov_rus.pdf (accessed: March 23, 2023).
14. Ezhov A.D. Modeling of surface roughness for contact heat-strength problems. Reports of the XLII Intern. youth sci. conf. «Gagarin Readings» (Moscow, April 12–15, 2016). Moscow: MAI, 2016, vol. 1, pp. 105–106.
15. Mesnyankin S.Yu., Dikov A.V. Calculation of thermal resistance of the contact of elements of power plants with wavy surfaces. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/6dc/6dc7a30f6c82e050847e8b0204d4c78a.pdf> (accessed: March 23, 2023).
16. Mesnyankin S.Yu., Ezhov A.D., Basov A.A. Determination of contact thermal resistance based on three-dimensional modeling of contiguous surfaces. *Izvestiya Akademii Nauk. Ser.: Energy*, 2014, no. 5, pp. 65–74.
17. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
18. State Standard R 57943–2017. *Plastics. Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Part 4. Method of laser flash*. Moscow: Standartinform, 2017, 12 p.
19. ASTM E1461–01. *Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method*. ASTM International, 2001, pp. 1–13.
20. State Standard 15139–69. *Plastics. Methods for determining density (bulk mass)*. Moscow: Publishing House of Standards, 1981, 17 p.

Информация об авторах

Баринов Дмитрий Яковлевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry Ya. Barinov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.04.2023.
The article was submitted 18.04.2023; approved and accepted for publication after reviewing 27.04.2023.