

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Р.Д. Бердов^{1,2}

Н.Н. Волков¹

Л.И. Волкова¹

А.Ш. Козаев^{1,2}

С.М. Цацуев¹

berdovrd@mail.ru

volkov@kerc.msk.ru

volkov-nn-li@mail.ru

kozaevalan@gmail.com

tsatsuev@kerc.msk.ru

¹ АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен метод экспериментального определения и контроля однородности теплопроводности в плоскости армирования по направлению выкладки волокон для радиаторов в форме тонкостенных пластин из анизотропных композиционных материалов исходя из экспериментально измеренных зависимостей температуры от координаты. Метод основан на решении задачи теплопроводности в ребре постоянного поперечного сечения при радиационном сбросе теплоты со свободных поверхностей. Для реализации метода разработана экспериментальная установка на базе вакуумной камеры УВМ-15У, оснащенной электронагревательным элементом регулируемой мощности и средствами термоскопии. Приведены результаты экспериментального применения данного метода на металлических образцах и образце из полимерного композиционного материала, армированного пековым высокомодульным волокном. Предельная температура в экспериментах не более 140 °С, что соответствует эксплуатационным температурам современных систем терморегулирования космических аппаратов и электроники. Полученные значения теплопроводности образцов из алюминиевого сплава АМц и меди совпадают со значениями теплопроводности, приведенными в справочниках, отклонение составляет менее 5 %. Исследуемый образец из полимерного композиционного материала с повышенной теп-

Ключевые слова

Теплопроводность, полимерный композиционный материал, углеродный композиционный материал, измерение, анизотропность

лопроводностью имеет существенную температурную неоднородность в поперечном сечении, разность расчетных значений теплопроводности количественно достигает 100 %. В результате экспериментов выявлена неоднородность внутренней структуры образца, что, предположительно, связано с наличием повреждений углеродных волокон

Поступила 02.02.2024

Принята 04.02.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Тенденции к применению современных высокопроизводительных технологий в космической технике, телекоммуникационных системах и электронике приводят к существенному увеличению энергопотребления, и, следовательно, к росту тепловыделения. Более остро встает проблема эффективного теплоотвода, диссипации и сброса тепловой энергии с наиболее теплонагруженных элементов. Одним из направлений исследований для решения данной проблемы является применение композиционных материалов (КМ), в частности углеродных КМ (УКМ). Материалы данного класса являются подходящими для использования в системах терморегулирования в силу уникальной комбинации физико-механических и теплофизических свойств. Рассматривается применение УКМ в радиаторах интегральных схем и портативной электроники [1, 2], панелях холодильников излучателей космических энергетических модулей [3], солнечных батареях с концентраторами большой мощности типа SLASR [4, 5], стержневых элементах космических конструкций [6] и др. Теоретически теплопроводность кристаллического графита может достигать 2800 Вт/(м · К) при комнатной температуре. В действительности теплопроводность УКМ очень чувствительна к структуре материала на атомарном уровне. Передачу теплоты ограничивают фоновые взаимодействия, такие как взаимодействия типа фонон–фонон, фонон–дефект и фонон–граница кристалла. Для эффективного механизма передачи теплоты необходимо наличие высокоориентированных графитовых фаз, поэтому УКМ на основе мезофазных пеков со своей высокоупорядоченной графитовой структурой являются более предпочтительными. Согласно [7, 8], наибольшую теплопроводность имеют высокомодульные и сверхвысокомодульные пековые волокна, значения теплопроводности лежат в диапазоне 500...1100 Вт/(м · К). В УКМ матрица имеет значительно более низкую теплопроводность, как следует из [9], эффективная теплопроводность двух углерод-углеродных КМ (УУКМ) на основе пековых углеродных волокон НМ-700 и Р-100 с теплопроводностью ~ 500 Вт/(м · К) вдоль этих волокон имеет значения ~ 300 Вт/(м · К). В полимерных КМ (ПКМ) значения эффективной теплопроводности предположительно будут ниже.

Существуют методы [10–13] расчетной оценки теплофизических характеристик ПКМ, основанные на использовании данных о структуре материала и свойствах его компонент. Однако действительные теплофизические характеристики УКМ конкретной детали имеют значительные разбросы из-за многоэтапных методов производства. При изготовлении УКМ волокна при переработке могут травмироваться, трескаться и иметь внешние и внутренние дефекты. Реализуемые свойства очень чувствительны к технологии: способу переработки, прессованию, термообработке, укладке волокна и др. В связи с этим целесообразно иметь методы определения и контроля свойств изделий из УКМ. Существующие методы определения теплопроводности [14, 15] имеют высокую точность (погрешность менее 5 %) и являются хорошо развитыми, но требуют использования дополнительного, достаточно сложного оборудования и налагают строгие ограничения на форму и размеры образцов, масштабы значений их теплофизических свойств и условия организации измерений. Наиболее перспективным является метод теплового импульса (метод Паркера) [16, 17]. Он применим к УКМ, но требует соблюдения определенных безразмерных толщин образцов и объемных долей волокна в материале, идеального теплового контакта и высокой интерфейсной проводимости между наполнителем и матрицей. Такой метод технически сложен в реализации. В настоящей работе рассмотрен альтернативный метод экспериментального определения и контроля теплопроводности УКМ, у которых проявляется сильная анизотропия свойств. Этот метод прост и надежен, применяя его можно определять однородность продольной теплопроводности в поперечном направлении. Аналогичный подход приведен в [18] для пластин из ПКМ с невысокими значениями теплопроводности в плоскости армирования. В диапазоне значений температуры 16...107 °С при теплопроводности материала 4,2 Вт/(м · К) погрешность измерений составила 5 %.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение значений коэффициента теплопроводности образцов материалов в виде тонкостенной пластины и контроль равномерности теплопроводящих свойств вдоль волокон материала в поперечном сечении.

Определение теплопроводности. Предлагаемый метод заключается в сопоставлении экспериментально измеренного поля температур образца, нагреваемого с одного конца в вакуумной камере, с расчетным температурным полем, полученным при подобранном значении коэффициента теплопроводности. Расчетное температурное поле определяется в результате решения задачи теплопроводности для ребра постоянного поперечного сечения.

Постановка задачи. Схема задачи теплопроводности приведена на рис. 1. Пусть имеется тело в форме пластины толщиной 2δ с двумя плоскостями симметрии XOY и XOZ . Предположим, что размер тела в направлении OY велик так, что в рассматриваемой области пластины от 0 до y_s справедливо условие $\nabla_y T \approx 0$ или границы тела, перпендикулярные оси Y , теплоизолированы. Тогда температурное поле внутри указанной на схеме области будет являться функцией двух координат, $T' = T'(x, z)$. Определим среднюю температуру $T(x)$ в поперечном сечении из выражения $T\delta = \int_0^{z_w} T' dz$. Внутри тела теплота передается за счет теплопроводности, с границ тела отводится в силу радиационно-конвективного теплообмена с окружающей средой.

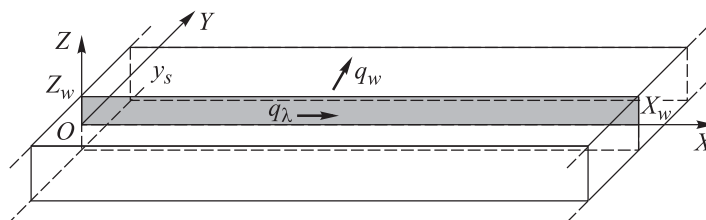


Рис. 1. Схема задачи теплопроводности

Приведем краткие выкладки для определения дифференциального уравнения данной задачи из классического уравнения теплопроводности. Интегральное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\int_V \rho c \frac{\partial T'}{\partial \tau} dV = - \int_V \bar{\nabla} \bar{q}_\lambda dV$$

или

$$\int_0^{y_s} dy \int_0^{x_w} \rho c \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\int_0^{z_w} T' dz \right) dx = \int_0^{y_s} dy \int_0^{x_w} \left[\nabla_x \left(\lambda_x \nabla_x \left(\int_0^{z_w} T' dz \right) \right) - \int_0^{z_w} \nabla_z q_{\lambda z} dz \right] dx,$$

$\bar{q}_\lambda$ — плотность теплового потока за счет теплопроводности.

Переходя к дифференциальному виду, получаем

$$\rho c \delta \frac{\partial T}{\partial \tau} = \delta \nabla_x (\lambda_x \nabla_x T) - q_{wz}. \quad (1)$$

Здесь ρ , c , τ , λ_x — плотность, удельная теплоемкость, время, теплопроводность вдоль оси X ; q_w — плотность тепловых потерь с границы пластины; нижний индекс (например, x или z) определяет компоненту вектора, например $\nabla_x \equiv \partial / (\partial x)$.

Тепловые потери с поверхности пластины определяются лучистым тепловым потоком (ЛТП) и конвективным тепловым потоком (КТП), обусловленным естественной конвекцией. Проведена оценка ЛТП и КТП в выбранном диапазоне температур для условий атмосферного давления и низких давлений p в барокамере, не превышающих 10 Па. Результаты оценки следующие:

– при температуре поверхности 50 °С тепловые потери с поверхности пластины составляют 160 Вт/м² (ЛТП), 100 и 3 Вт/м² при $p = 98$ 100 и 4 Па (КТП);

– при температуре поверхности 100 °С тепловые потери с поверхности пластины составляют 640 Вт/м² (ЛТП), 400 и 10 Вт/м² при $p = 98$ 100 и 4 Па (КТП). В условиях низких давлений тепловые потери с поверхности пластины определяются ЛТП, значения КТП являются пренебрежимо малыми, не превышают 2 %.

Значение плотности ЛТП q_R определяется из решения задачи о радиационном теплообмене между телом и оболочкой [19]:

$$q_R = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_w^4 - T_0^4),$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная интегральная степень черноты; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴); T_w , T_0 — температура поверхности образца и внутренней поверхности барокамеры. Поскольку площадь свободной поверхности пластины много меньше площади внутренней поверхности барокамеры, то $\varepsilon_{\text{пр}} \approx \varepsilon$, ε — интегральная степень черноты свободной поверхности исследуемого образца.

Дополнительно используется несколько допущений. Вследствие малой толщины пластины 2δ температура поверхности T_w будет слабо отличаться от средней температуры в поперечном сечении $T(x)$, или $T_w \approx T$. В условиях малого значения температурного перепада ($\Delta T < 100$ К) по длине пластины принято допущение о постоянстве теплопроводности ($\lambda_x = \text{const}$).

Составим математическую модель рассматриваемой задачи для стационарного случая на основе уравнения (1) и соответствующих граничных условий. В безразмерном виде она имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} &= k(\bar{T}^4 - 1); \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} &= k\delta \left(\left(\bar{T} \Big|_{\bar{x}=1} \right)^4 - 1 \right); \\ \bar{T} \Big|_{\bar{x}=0} &= \bar{T}_n, \end{aligned}$$

где $\bar{T} = T/T_0$; $\bar{x} = x/L$ (L — длина пластины); $k = \varepsilon \sigma_0 T_0^3 L^2 / (\delta \lambda_x)$; $\bar{\delta} = \delta/L$; $\bar{T}_H = T_H/T_0$ (T_H — температура в начальном сечении пластины при $\bar{x} = 0$). Решая численно систему уравнений, получаем функцию $T(x)$ при заданном значении коэффициента теплопроводности материала λ_x . С помощью метода последовательных приближений определяем λ_x . Итерационный процесс расчета λ_x продолжается до достижения минимального значения функционала среднеквадратической невязки рассчитанных и экспериментальных значений температуры $S(\lambda_x)$ при выбранной точности для теплопроводности ($\varepsilon_\lambda = 1$ Вт/(м · К)). Запишем

$$S(\lambda_x) = \sum_{i=1}^n \left(\bar{T}(\bar{x}_i) - \bar{T}_{\text{изм}}(\bar{x}_i) \right)^2,$$

где n — число используемых для определения функционала $S(\lambda_x)$ достоверных измеренных температур $\bar{T}_{\text{изм}}(\bar{x}_i)$ (безразмерная измеренная температура в сечении $\bar{x}_i$).

Результаты экспериментов. Эксперименты проведены на вакуумной установке УВМ-15У, давление в барокамере во время ее работы составляло 2...4 Па. Образцы в форме тонкостенной пластины за один край крепятся к трубчатому электронагревателю (ЭН), свободная поверхность которого закрыта от образцов экраном. Мощность ЭН устанавливают исходя из допустимого уровня максимальной температуры на образце. Предельная температура в экспериментах не превышала 140 °С, что соответствует допустимому уровню эксплуатационных температур. Поля температур образцов измерены низкотемпературным тепловизором TESTO 890. Погрешность тепловизора 2 °С. Стекло окна, через которое проводили измерения, изготовлено из селенида цинка. Фрагмент эксперимента — термоскопия образца тепловизором через окно вакуумной камеры — приведен на рис. 2. Степень черноты материала определена при атмосферном давлении путем согласования температур поверхности образца, измерений тепловизора и термопары. Металлические образцы предварительно покрыты черной краской для увеличения излучательной способности.



Рис. 2. Фрагмент эксперимента — термоскопия образца тепловизором через окно вакуумной камеры

Всего проведено четыре эксперимента для трех образцов, изготовленных из алюминиевого сплава АМц, меди и ПКМ. Образец из ПКМ испытан повторно в целях подтверждения результатов. На образцах из алюминиевого сплава и меди выполнена проверка предлагаемого метода оценки и контроля теплопроводности. Значение теплопроводности этих материалов должно быть близко к значению предположительной теплопроводности исследуемого ПКМ (100...300 Вт/(м · К)). Полимерный УКМ с однонаправленной выкладкой волокон представляет собой анизотропный материал, теплопроводность которого максимальна в продольном направлении (направление выкладки волокон) и напрямую зависит от качества и целостности волокон в образце. Экспериментально исследована возможность изменения значения теплопроводности для материалов типа УКМ в зависимости от продольной образующей. Для определения теплопроводности использованы экспериментально измеренные зависимости $T(x)$ по трем образующим: T_1, T_2, T_3 , их положение обозначено на термограмме (рис. 3).

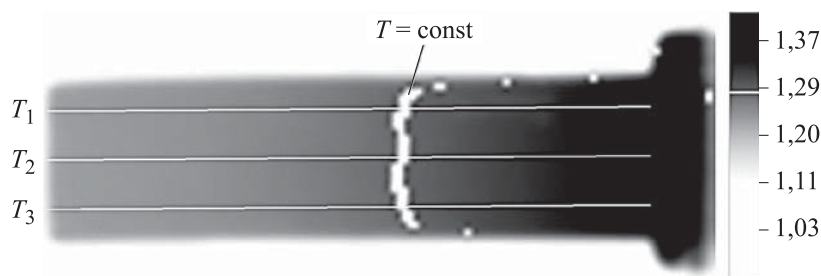


Рис. 3. Термограмма образца из алюминиевого сплава

Пластины из алюминиевого сплава и меди. Термограмма на стационарном тепловом режиме и экспериментальные значения зависимости $\bar{T}_{изм}(\bar{x}_i)$, измеренные по образующим, приведены на рис. 3, 4. На основании полученных распределений температур заданы исходные данные для расчета теплопроводности λ_x в направлении выкладки волокон. Исходные данные для двух экспериментов приведены в таблице.

Пластина из ПКМ. Для исследуемого образца из ПКМ проведено два эксперимента. Термограмма на стационарном тепловом режиме для первого эксперимента и экспериментальные зависимости температуры приведены на рис. 5, 6, исходные данные для расчета λ_x — в таблице.

Анализ и обсуждение результатов. Расчетные значения теплопроводности λ_x для пластин из алюминиевого сплава АМц и меди равны 184 и 374 Вт/(м · К), что хорошо согласуется со справочными данными

(180 и 375 Вт/(м · К)). На термограмме и графиках отчетливо видна однородность температурного поля в поперечных сечениях пластин, что характерно для изотропных материалов. Для образца из ПКМ наблюдается существенная температурная неоднородность в поперечном сечении, разность расчетных значений теплопроводности в направлении выкладки волокон количественно достигает 100 %. Предположительно настолько большие разбросы теплопроводности связаны с неоднородной внутренней структурой образца, возможно наличие повреждений углеродных волокон. В центральных образующих значения теплопроводности составили 276 и 297 Вт/(м · К) в первом и втором экспериментах.

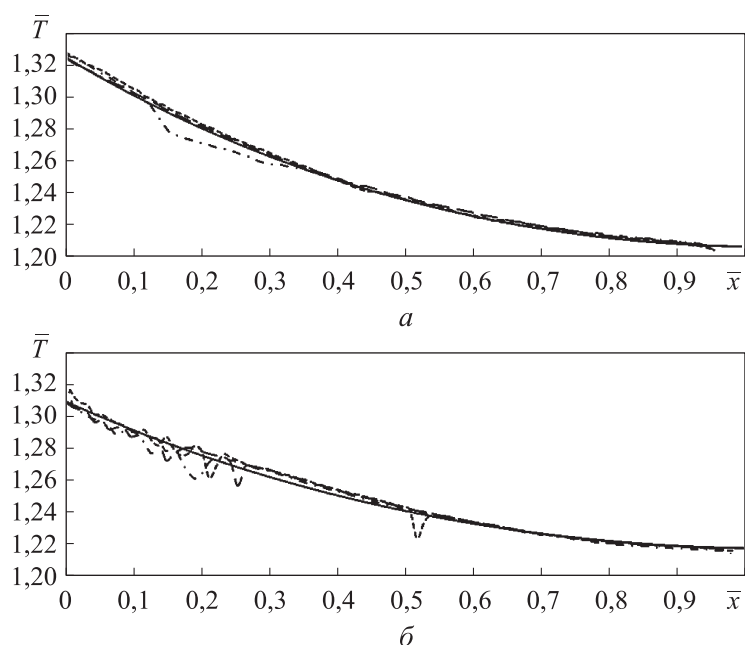


Рис. 4. Значения зависимости $\bar{T}(\bar{x})$, экспериментально измеренные по трем образующим T_1 (-----), T_2 (— —), T_3 (— · —), и расчетные значения коэффициента теплопроводности (—) $\lambda = 184$ и 374 Вт/(м · К) для образцов из алюминиевого сплава (а) и меди (б)

Исходные данные для расчета теплопроводности образцов

Образец	АМц	Медь	ПКМ (первый эксперимент)			ПКМ (второй эксперимент)		
			T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
$\bar{T}_n$	1,325	1,309	1,379	1,196	1,268	1,375	1,194	1,29
$k\lambda_x$, Вт/(м · К)	16,23	23,61	30,76					
$\bar{\delta}$	0,0111	0,0077	0,0058					

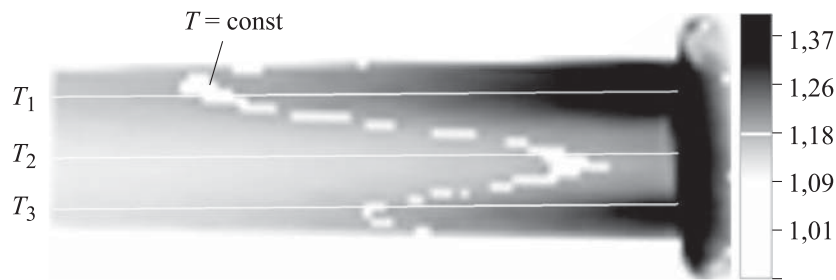


Рис. 5. Термограмма образца из ПКМ для первого эксперимента

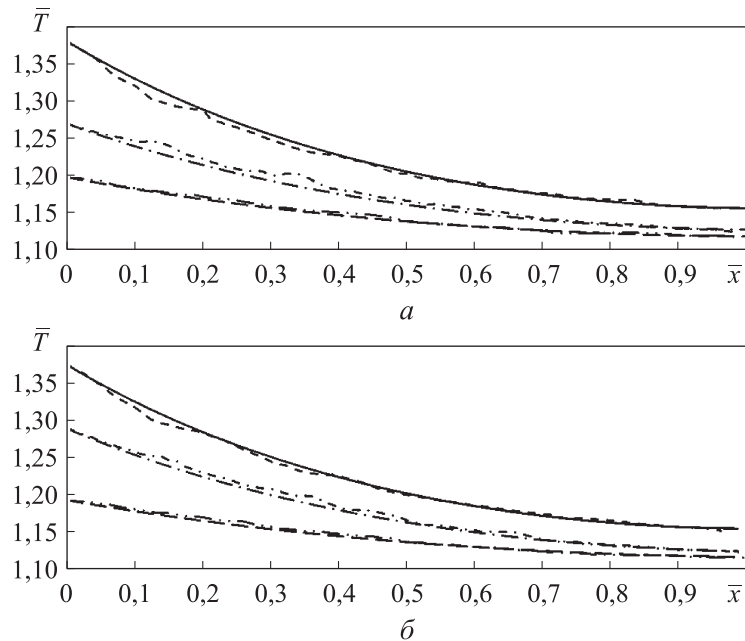


Рис. 6. Значения зависимости $\bar{T}(\bar{x})$, экспериментально измеренные по трем образующим T_1 (---), T_2 (-·-), T_3 (-:-), и расчетные значения коэффициента теплопроводности для образцов из ПКМ для первого ($\lambda = 147$ (—), 276 (— —), 177 Вт/(м · К) (— · —), а) и второго ($\lambda = 147$ (—), 297 (— —), 160 Вт/(м · К) (— · —), б) экспериментов

При определении теплопроводности использовано предположение об однородности температурного поля в поперечном сечении ($\nabla_y T \approx 0$), что, как видно из термограммы для образца из ПКМ, является неверным. На основе измеренных данных проведена оценка значений неоднородности температурного поля для экспериментов с пластинами из ПКМ. В областях экстремумов изотермической поверхности (именно в этих областях проведены образующие T_1, T_2, T_3) справедливо отношение $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} / \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \approx 1$.

Между образующими T_1, T_2, T_3 значение отношения $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} / \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ может достигать 10 и более. В [20–22] отмечено, что поперечная теплопроводность даже для ПКМ с повышенной проводимостью при однонаправленной выкладке волокон и модификации матрицы путем введения металлических порошков и их оксидов имеет низкие значения и лежит в диапазоне 1,25...4,5 Вт/(м · К), без модификации матрицы поперечная теплопроводность ПКМ не превышает 1 Вт/(м · К). В результате погрешность, связанная с неучтенным слагаемым $\lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ в дифференциальном уравнении теплопроводности, не превышает 1 % для образующих T_1, T_2, T_3 , а для других образующих она может достигать 10 %. Предлагаемый метод измерения теплопроводности в направлении выкладки волокон без его доработки имеет достаточно высокие разбросы (~ 10 %) расчетного значения, поэтому его можно использовать только для приближенной оценки.

Заключение. Описаны теоретические основы и рассмотрена экспериментальная реализация метода определения и контроля однородности теплопроводности в плоскости армирования по направлению выкладки волокон для радиаторов в форме тонкостенных пластин из анизотропных композиционных материалов. Предлагаемый метод измерения теплопроводности показал свою применимость к образцам из высокотеплопроводного УКМ с однонаправленной выкладкой волокон. Для таких сильно анизотропных материалов применение предложенного метода позволит оперативно контролировать теплопроводящую способность вдоль всей поверхности тонкостенного радиатора, также получать косвенные данные о структурных особенностях материала.

В дальнейшем в целях повышения точности результатов и расширения области применения использованного экспериментального метода на ПКМ с выкладкой волокон вдоль нескольких направлений следует перейти к рассмотрению двумерной обратной задачи теплопроводности и получению соответствующего решения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bandhu D., Khadir M.D., Kaushik A., et al. Innovative approaches to thermal management in next-generation electronics. *E3S Web Conf.*, 2023, vol. 430, art. 01139. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001139>

- [2] Garimella S.V., Yeh L.-T., Persoons T. Thermal management challenges in telecommunication systems and data centers. *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, 2012, vol. 2, no. 8, pp. 1307–1316.
DOI: <https://doi.org/10.1109/tcpmt.2012.2185797>
- [3] Белоглазов А.П., Еремин А.Г., Немыкин С.А. и др. Оценка возможности использования углеродного материала в конструкции холодильника-излучателя космического аппарата. *Космическая техника и технологии*, 2020, № 1, с. 42–47.
EDN: GLBBBA
- [4] Silva C., Marotta E., Schuller M., et al. In-plane thermal conductivity in thin carbon fiber composites. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 2007, vol. 21, no. 3, pp. 460–467.
DOI: <https://doi.org/10.2514/1.27859>
- [5] Казанцев З.А., Ерошенко А.М., Бабкина Л.А. и др. Анализ конструкций солнечных батарей космических аппаратов. *Космические аппараты и технологии*, 2021, № 3, с. 121–136. DOI: <https://doi.org/10.26732/j.st.2021.3.01>
- [6] Резник С.В., Денисов О.В., Нелюб В.А. и др. Исследования теплопроводности углепластиков в широком диапазоне эксплуатационных температур с использованием элементов натуральных конструкций. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2012, № 3, с. 2–6. EDN: OTPWIB
- [7] Yuan G., Li X., Dong Z., et al. Pitch-based ribbon-shaped carbon-fiber-reinforced one-dimensional carbon/carbon composites with ultrahigh thermal conductivity. *Carbon*, 2014, vol. 68, pp. 413–425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.11.018>
- [8] Minus M., Kumar S. The processing, properties, and structure of carbon fibers. *JOM*, 2005, vol. 57, no. 2, pp. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0217-8>
- [9] Manocha L.M., Warriar A., Manocha S.M., et al. Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials–I. Unidirectional composites. *Carbon*, 2006, vol. 44, no. 3, pp. 480–487.
DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2005.08.012>
- [10] Михайловский К.В., Просунцов П.В., Резник С.В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 9.
DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-9-375>
- [11] Schuster J., Heider D., Sharp K., et al. Measuring and modeling the thermal conductivities of three-dimensionally woven fabric composites. *Mech. Compos. Mater.*, 2008, vol. 45, no. 2, pp. 165–174. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11029-009-9072-Y>
- [12] Hatta H., Taya M. Thermal conductivity of coated filler composites. *J. Appl. Phys.*, 1986, vol. 59, no. 6, pp. 1851–1860. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.336412>
- [13] Zhang G., Xia Y., Wang H., et al. A percolation model of thermal conductivity for filled polymer composites. *J. Compos. Mater.*, 2010, vol. 44, no. 8, pp. 963–970.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998309349690>
- [14] Пономарев С.В., Мищенко С.В., Дивин А.Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2006.

- [15] Zhao D., Qian X., Gu X., et al. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *J. Electron. Packag.*, 2016, vol. 138, no. 4, art. 040802. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4034605>
- [16] Vozár L., Hohenauer W. Flash method of measuring the thermal diffusivity. A review. *HTHP*, 2003, vol. 35-36, no. 3, pp. 253–264.
- [17] Pietrak K., Wiśniewski T.S., Kubiś M. Application of flash method in the measurements of interfacial thermal resistance in layered and particulate composite materials. *Thermochim. Acta*, 2017, vol. 654, pp. 54–64.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.05.007>
- [18] Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В. и др. Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности углепластика в плоскости армирования на основе бесконтактного измерения температуры. *Тепловые процессы в технике*, 2016, т. 8, № 12, с. 557–563. EDN: XEFEDZ
- [19] Modest M.F. Radiative heat transfer. San Diego, Academic Press, 2003.
- [20] Николаева Е.А., Тимофеев А.Н., Михайловский К.В. Способы повышения коэффициентов теплопроводности полимеров и полимерных композиционных материалов. *Информационно-технологический вестник*, 2018, № 1, с. 156–168.
EDN: YXCNGW
- [21] Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Ильченко С.И. и др. Конструкционные углепластики с повышенной проводимостью. *Авиационные материалы и технологии*, 2004, № 2, с. 25–36. EDN: QMVRWV
- [22] Попов И.А., Хамидуллин О.Л., Константинов Д.Ю. и др. Оценка теплопроводности новых углеродных полимерных композитных материалов. *Тепловые процессы в технике*, 2023, т. 15, № 9, с. 421–428. EDN: IWPOIT

Бердов Роман Дмитриевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8); доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Волков Николай Николаевич — канд. физ.-мат. наук, начальник отдела АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

Волкова Лариса Ивановна — д-р техн. наук, главный научный сотрудник АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

Козаев Алан Шотаевич — канд. техн. наук, начальник лаборатории АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8); доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Цацуев Сергей Михайлович — канд. техн. наук, начальник сектора АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бердов Р.Д., Волков Н.Н., Волкова Л.И. и др. Экспериментальное определение и контроль теплопроводности углеродных композиционных материалов повышенной проводимости. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 2 (153), с. 4–19. EDN: UHKIRK

**EXPERIMENTAL DETERMINATION
AND CONTROL OF THERMAL CONDUCTIVITY
OF THE CARBON COMPOSITE MATERIALS
WITH THE INCREASED CONDUCTIVITY**

R.D. Berdov^{1,2}

N.N. Volkov¹

L.I. Volkova¹

A.S. Kozaev^{1,2}

S.M. Tsatsuev¹

berdovrd@mail.ru

volkov@kerc.msk.ru

volkov-nn-li@mail.ru

kozaevalan@gmail.com

tsatsuev@kerc.msk.ru

¹ JSC “Keldysh Research Center”, Moscow, Russian Federation

² BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers a method for experimental determination and control of the thermal conductivity homogeneity in the reinforcement plane along the fiber layout direction for the anisotropic composite radiators in the thin-walled plate form following the experimentally measured temperature-coordinate dependences. The method is based on solving the problem of thermal conductivity in a rib with the constant cross section under radiative heat loss from the free surfaces. To implement this method, an experimental setup was developed using the UVM-15U vacuum chamber equipped with an adjustable-power electric heating element and the thermoscopic means for the samples under study. The paper presents results of experimental application of this method on the metal samples and a sample made of the polymer composite material reinforced with the high-modulus pitch fiber. The maximum temperature in the experiments was not exceeding 140 °C, which corresponded to operating temperatures of the modern spacecraft and electronic thermal

Keywords

Thermal conductivity, polymer composite material, carbon composite material, measurement, anisotropy

control systems. The measured values of thermal conductivity for the samples made of the AMts aluminum and copper alloy coincided with the reference values of this characteristic; deviation was less than 5 %. For the studied sample made of the polymer composite material with the increased thermal conductivity, significant temperature heterogeneity in the transverse direction was observed, differences in computed values of the thermal conductivity quantitatively reached 100 %. The experimental data made it possible to determine heterogeneity of the sample internal structure; it was presumably associated with the carbon fibers damage

Received 02.02.2024

Accepted 04.02.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Bandhu D., Khadir M.D., Kaushik A., et al. Innovative approaches to thermal management in next-generation electronics. *E3S Web Conf.*, 2023, vol. 430, art. 01139. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001139>
- [2] Garimella S.V., Yeh L.-T., Persoons T. Thermal management challenges in telecommunication systems and data centers. *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, 2012, vol. 2, no. 8, pp. 1307–1316. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcpmt.2012.2185797>
- [3] Beloglazov A.P., Eremin A.G., Nemykin S.A., et al. Assessing the feasibility of using a carbon material in the design of a radiative cooler for spacecraft. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2020, no. 1, pp. 42–47 (in Russ.). EDN: GLBBBA
- [4] Silva C., Marotta E., Schuller M., et al. In-plane thermal conductivity in thin carbon fiber composites. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 2007, vol. 21, no. 3, pp. 460–467. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.27859>
- [5] Kazantsev Z.A., Eroshenko A.M., Babkina L.A., et al. Analysis of design of spacecraft solar arrays. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii* [Spacecrafts & Technologies], 2021, no. 3, pp. 121–136 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26732/j.st.2021.3.01>
- [6] Reznik S.V., Denisov O.V., Nelyub V.A., et al. Thermal conductivity studies of carbon-filled plastics in broad range of operating temperatures with use of full-scale construction components. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2012, no. 3, pp. 2–6 (in Russ.). EDN: OTPWIB
- [7] Yuan G., Li X., Dong Z., et al. Pitch-based ribbon-shaped carbon-fiber-reinforced one-dimensional carbon/carbon composites with ultrahigh thermal conductivity. *Carbon*, 2014, vol. 68, pp. 413–425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.11.018>
- [8] Minus M., Kumar S. The processing, properties, and structure of carbon fibers. *JOM*, 2005, vol. 57, no. 2, pp. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0217-8>

- [9] Manocha L.M., Warriar A., Manocha S.M., et al. Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials–I. Unidirectional composites. *Carbon*, 2006, vol. 44, no. 3, pp. 480–487. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2005.08.012>
- [10] Mikhaylovskiy K.V., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. On the development of space structures from high thermal conductivity polymer composite materials. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 9 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-9-375>
- [11] Schuster J., Heider D., Sharp K., et al. Measuring and modeling the thermal conductivities of three-dimensionally woven fabric composites. *Mech. Compos. Mater.*, 2008, vol. 45, no. 2, pp. 165–174. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11029-009-9072-Y>
- [12] Hatta H., Taya M. Thermal conductivity of coated filler composites. *J. Appl. Phys.*, 1986, vol. 59, no. 6, pp. 1851–1860. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.336412>
- [13] Zhang G., Xia Y., Wang H., et al. A percolation model of thermal conductivity for filled polymer composites. *J. Compos. Mater.*, 2010, vol. 44, no. 8, pp. 963–970. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998309349690>
- [14] Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty teplofizicheskikh izmereniy [Theoretical and practical aspects of thermophysical measurements]. Tambov, TSTU Publ., 2006.
- [15] Zhao D., Qian X., Gu X., et al. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *J. Electron. Packag.*, 2016, vol. 138, no. 4, art. 040802. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4034605>
- [16] Vozár L., Hohenauer W. Flash method of measuring the thermal diffusivity. A review. *HTHP*, 2003, vol. 35–36, no. 3, pp. 253–264.
- [17] Pietrak K., Wiśniewski T.S., Kubiś M. Application of flash method in the measurements of interfacial thermal resistance in layered and particulate composite materials. *Thermochim. Acta*, 2017, vol. 654, pp. 54–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.05.007>
- [18] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Denisov O.V., et al. Numerical and experimental estimation of heat conductivity of carbon plastic in a reinforcement plane on the basis of contactless measurement of temperature. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2016, vol. 8, no. 12, pp. 557–563 (in Russ.). EDN: XEFEDZ
- [19] Modest M.F. Radiative heat transfer. San Diego, Academic Press, 2003.
- [20] Nikolaeva E.A., Timofeev A.N., Mikhaylovskiy K.V. Methods for increasing the thermal conductivity of polymers and polymer composite materials. *Informatsionno-tekhnologicheskiiy vestnik* [Information Technology Bulletin], 2018, no. 1, pp. 156–168 (in Russ.). EDN: YXCNGW
- [21] Kablov E.N., Gunyaev G.M., Ilchenko S.I., et al. Structural carbon fiber plastics with increased conductivity. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2004, no. 2, pp. 25–36 (in Russ.). EDN: QMVRWV

[22] Popov I.A., Khamidullin O.L., Konstantinov D.Yu., et al. Thermal conductivity assessment of new carbon polymer composite materials. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2023, vol. 15, no. 9, pp. 421–428 (in Russ.).

EDN: IWPOIT

Berdov R.D. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, JSC “Keldysh Research Center” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation); Assoc. Professor, Department of Thermophysics, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Volkov N.N. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of the Department, JSC “Keldysh Research Center” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

Volkova L.I. — Dr. Sc. (Eng.), Chief Research Fellow, JSC “Keldysh Research Center” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

Kozaev A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Laboratory, JSC “Keldysh Research Center” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation); Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Tsatsuev S.M. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Sector, JSC “Keldysh Research Center” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Berdov R.D., Volkov N.N., Volkova L.I., et al. Experimental determination and control of thermal conductivity of the carbon composite materials with the increased conductivity. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 2 (153), pp. 4–19 (in Russ.). EDN: UHKIRK