

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 9. С. 421–428  
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 421–428

Научная статья  
УДК 678.747.2  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177132>

## Оценка теплопроводности новых углеродных полимерных композитных материалов

И.А. Попов<sup>1✉</sup>, О.Л. Хамидуллин<sup>1</sup>, Д.Ю. Константинов<sup>1</sup>, И.А. Попов<sup>2</sup>, Ю.В. Жукова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup> Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной Академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

✉ [popov-igor-alex@yandex.ru](mailto:popov-igor-alex@yandex.ru)

**Аннотация.** Проведено исследование теплопроводности новых углеродных полимерных композитных материалов на основе препрегов и семипрегов с различными наполнителями методом стационарного теплового потока. Установлены уровни коэффициентов теплопроводности и их зависимости от температуры в диапазоне температур от –20 до 80°C. Значения коэффициентов теплопроводности составили от 0,141 до 0,54 Вт/(м·К). Получены температурные зависимости для прогнозирования коэффициентов теплопроводности исследованных полимерных композитных материалов. Результаты работы могут быть использованы для расчета и проектирования систем и установок с элементами из конструкционных углепластиков, а также для моделирования технологических процессов производства углепластиковых изделий.

**Ключевые слова:** теплопроводность, полимерные композиционные материалы, углепластик, измеритель стационарного теплового потока

**Финансирование.** Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-03-2023-032.

**Для цитирования.** Попов И.А., Хамидуллин О.Л., Константинов Д.Ю., Попов И.А., Жукова Ю.В. Оценка теплопроводности новых углеродных полимерных композитных материалов // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 9. С. 421–428.

Original article

## Thermal conductivity assessment of new carbon polymer composite materials

I.A. Popov<sup>1✉</sup>, O.L. Khamidullin<sup>1</sup>, D.Yu. Konstantinov<sup>1</sup>, I.A. Popov<sup>2</sup>, Yu.V. Zhukova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

<sup>3</sup> A.V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

✉ [popov-igor-alex@yandex.ru](mailto:popov-igor-alex@yandex.ru)

**Abstract.** The study of the thermal conductivity of new carbon polymer composite materials (PCM) based on prepregs and semipregs with various fillers was conducted by the stationary heat flux method.

© Попов И.А., Хамидуллин О.Л., Константинов Д.Ю., Попов И.А., Жукова Ю.В., 2023

The levels of thermal conductivity coefficients and their dependence on temperature within the temperature range from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $80^{\circ}\text{C}$  were established. The values of the thermal conductivity coefficients ranged from 0.141 to 0.54 W/(m K). Temperature dependences were obtained for thermal conductivity coefficients predicting of the studied PCM. The obtained results may be applied for calculation and design of the systems and installations with structural elements from carbon fiber plastics, as well as for production processes modeling.

**Keywords:** thermal conductivity, polymer composite materials, carbon fiber-reinforced plastic, stationary heat flow meter

**Funding.** The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-03-2023-032.

**For citation.** Popov I.A., Khamidullin O.L., Konstantinov D.Yu., Popov I.A., Zhukova Yu.V. Thermal conductivity assessment of new carbon polymer composite materials. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 421–428. (In Russ.)

## Введение

Учет теплопроводности и, соответственно, теплового состояния полимерных композиционных материалов (ПКМ) играет решающую роль при разработке и оптимизации технологических режимов их производства и проектировании инновационных технических устройств. На теплопроводность композиционных материалов большое влияние оказывают температура, химический состав, количество и размеры армирующего наполнителя, пористость и направление теплового потока [1–3]. Точное измерение коэффициентов теплопроводности ПКМ – ключевой вопрос в области оценки теплового состояния изделий из ПКМ [4–6].

В работе изложен экспериментальный метод исследования зависимости коэффициентов теплопроводности и новых ПКМ с использованием измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium, произведенного компанией NETZSCH (Германия).

## Состав и характеристики исследованных образцов ПКМ

Исследованы ПКМ на основе армирующих элементов в виде семипрегов, полученных методом направленной укладки волокна, из углеродной ткани UT-1000-200 саржевого переплетения из волокна Umatex UMT40-3K-EP (образец 1) и из углеродной ленты UT-1000-205-12K из углеродного волокна Umatex UMT49-12K-EP (образец 2) однонаправленного плетения.

Семипрег – разновидность препрега композиционного материала, состоящего из волокнистого армирующего наполнителя и нанесенного с одной стороны связующего. Характеристики армирующих наполнителей, определяющих структуру и теплофизические свойства, из углеродных волокон UMT40-3K-EP и UMT49-12K-EP представлены в табл. 1. Связующее имеет матрицу на основе модифицированной эпоксидной смолы, аминного ароматического отвердителя и термопласта.

**Таблица 1. Свойства углеродных волокон UMT40-3K-EP и UMT49-12K-EP и углеродных тканей на их основе**

Углеродное волокно	UMT40-3K-EP	UMT49-12K-EP
Тип плетения	Саржевое плетение	85% волокон расположено в одном направлении
Линейная плотность	190 tex	7800 tex
Объемная плотность	1,77 г/см <sup>3</sup>	1,78 г/см <sup>3</sup>
Содержание углерода	Более 95%	Более 95%
Тип аппрета	EP*	EP*
Массовая доля аппрета	0,8–1,5%	0,8–1,5%
Углеродная ткань	UT-1000-200	UT-1000-205-12K
Плотность углепластика	1539 кг/м <sup>3</sup>	1562 кг/м <sup>3</sup>
Пористость	< 0,1%	< 0,1
Объемная доля волокна	56,3 %	58,2
Степень затвердевания	> 98 %	> 98

\* EP – аппрет, совместимый с эпоксидной смолой. Могут быть получены волокна с аппрет VE (совместимые со связующими винилового эфира).

Исследованы два образца ПКМ-термопластов на основе армирующих элементов в виде препрегов из углеродной ткани из углеродного волокна Umatex UMT49-12K-EP со связующим из полиэфирэфиркетона PEEK (№3) и из углеродной ткани TENAX-E TPCL PEEK-4-40-НТА40 E13 3K DT-5HS-285/04AB саржевого плетения из углеродного волокна Tenax®-E НТА40 3K со связующим PEEK-4-40-НТА40 (образец 4) (табл. 2).

**Таблица 2. Свойства углеродного волокна TENAX-E-НТА40 E13 3K и арамидного волокна РУСАP-C600**

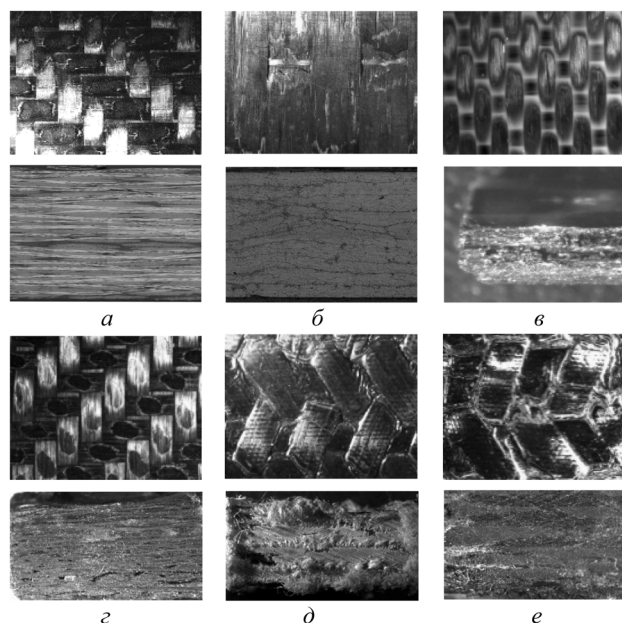
Волокно	TENAX-E-НТА40 E13 3K	РУСАP-C600
Тип волокна	Углеродное	Арамидное
Тип плетения	Саржевое плетение	Полотняное плетение
Объемная плотность	2 г/см <sup>3</sup>	1,4 г/см <sup>3</sup>
Содержание углерода	1760 кг/м <sup>3</sup>	–

Выполнено исследование двух образцов ПКМ-реактопластов на основе армирующих элементов в виде препрегов из арамидной ткани из волокон ароматических полиамидов РУСАP-C600 полотняного плетения со связующим на основе эпоксидной смолы Т-26 (образец 5) (табл. 2) и из углеродной ткани из углеродного волокна Umatex UMT49-12K-EP полотняного плетения также со связующим на основе эпоксидной смолы Т-26 (образец 6). Для создания образцов также использовались преформы, полученные методом направленной укладки волокна (TFP) и радиального плетения (Radial Braiding – RB).

В итоге в ходе работы исследовались свойства шести образцов ПКМ, размеры которых приведены в табл. 3. Структура ПКМ оценивалась на оптическом микроскопах Leica M80 (рис. 1).

**Таблица 3. Параметры исследованных образцов углепластиков**

Параметры	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5	Образец 6
Наименование	UT-1000-200	UT-1000-20512K	UMT49-12K-EP / PEEK	TENAX-E TPCL PEEK-4-40-НТА40 E13 3K	РУСАP C600 / Т-26	UMT 49-12K-EP / Т-26
Страна-производитель	Россия	Россия	Россия	Япония	Россия	Россия
Толщина образца, мм	5,1	4,9	5,65	1,2	5,00	4,7
Ширина × длина образца, мм	282 × 288	289 × 289	300 × 305	300 × 300	300 × 300	300 × 300
Плотность материала образца, кг/м <sup>3</sup>	1573	1590	1240	1520	1300	1550



**Рис. 1. Структуры ПКМ с различным армированием: а – образец 1, б – образец 2, в – образец 3, г – образец 4, д – образец 5, е – образец 6**

### Оборудование и методика проведения экспериментального определения коэффициентов теплопроводности

Экспериментальное исследование теплопроводности углепластика проводилось также с использованием измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium. Прибор работает в соответствии с методом, представленным в ASTM C 518, ISO 8301, JIS A1412, DIN EN 12664, DIN EN 12667 и ГОСТе 7076-99. Образец располагается между горячей и холодной пластинами, и тепловой поток, создаваемый заданной разницей температур, измеряется с помощью сенсора теплового потока.

Описание измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium с методикой проведения экспериментов по исследованию теплопроводности ПКМ приведено в работе [7].

Поскольку углепластик представляет ПКМ, состоящий из основы – волокна, связующего – КЕЕР, эпоксидной смолы или других материалов и пор, то определяемый коэффициент теплопроводности является эффективным, учитывающем коэффициенты теплопроводности твердых фаз наполнителя и связующего, воздуха в порах, радиационный перенос в порах.

Образец располагается между пластинами с двунаправленными системами нагрев / охлаждение Пельтье, обеспечивающими различие температур. Для калибровки сенсора теплового потока использовался сертифицированный образец из минеральной ваты IRMM-440A известной теплопроводности. Расчет теплопроводности проводился по формуле, представленной в работе [8]:

$$\lambda = \frac{NV\delta}{F(T_{гор} - T_{хол})}, \quad (1)$$

где  $N$  – калибровочный коэффициент определенный на сертифицированном образце,  $V$  – напряжение, подаваемое на нагреватель пластины,  $F$  – площадь поверхности образца,  $\delta$  – толщина образца,  $T_{гор}, T_{хол}$  – температуры на поверхности образца со стороны горячей и холодной пластин.

В ходе эксперимента устанавливался перепад температур между нагреваемыми / охлаждаемыми пластинами 20°C. Измерения коэффициентов теплопроводности производились при выходе установки на стационарный режим – постоянный тепловой поток. Полученные в ходе измерений коэффициенты теплопроводности соответствуют средней температуре образца, равной  $T = (T_{хол} + T_{гор})/2$ .

### Проверка работоспособности оборудования и достоверности получения результатов

В ходе подготовки экспериментальных исследований теплофизических свойств новых ПКМ на измерителе стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium проведены тестовые исследования образцов с заданными теплофизическими свойствами – минеральная вата IRMM-440A, пенополистирол EPS и боросиликатное стекло. Все материалы имеют сертификаты компании NETZSCH и Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии. Параметры образцов для тестовых опытов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности исследованных образцов ПКМ

Образец	Температурная зависимость
1	$\lambda = 0,43297 + 0,00096534 \cdot t + 8,1659 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 7,29628 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$
2	$\lambda = 0,36841 + 0,00121 \cdot t + 1,47144 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 2,86053273 \cdot 10^{-9} \cdot t^3$
3	$\lambda = 0,44764 + 0,00144 \cdot t + 2,74792 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 3,40043 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$
4	$\lambda = 0,29665 + 0,00105 \cdot t - 1,77706 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 1,52788 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$
5	$\lambda = 0,1442 + 2,16872 \cdot 10^{-4} \cdot t - 5,13871 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 5,82999 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$
6	$\lambda = 0,31902 + 8,97684 \cdot 10^{-5} \cdot t - 3,30384 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 1,56652 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$

$t$  – средняя температура образца, °C.

Сравнение результатов тестовых исследований с данными сертификатов на теплофизические свойства показало, что отклонение экспериментальных данных для минеральной ваты IRMM-440A (размер образца 300×290×3,42 мм, плотность 72,3 кг/м<sup>3</sup>) от данных сертификата по коэффициенту теплопроводности не превышают 2%, для пенополистирола EPS (300×300×2,5 мм, 26 кг/м<sup>3</sup>) – не превышает 2,5%, а для боросиликатного стека (300×300×2,507 мм, 2200 кг/м<sup>3</sup>) – не более 7%. Значительное отклонение для стекла связано с использованием не штатных термомпар, а накладных, согласно выше описанной методики проведения опытов.

Относительная расширенная неопределенность измерений коэффициентов теплопроводности составила 1,8–2,1% для указанных различных тестовых образцов.

### Результаты экспериментального исследования коэффициентов теплопроводности ПКМ

Результаты измерений коэффициента теплопроводности образцов ПКМ 1–6 в виде графических зависимостей коэффициентов теплопроводности от температуры образца представлены на рис. 2–7. Относительная расширенная неопределенность измерений коэффициентов теплопроводности составила 3,4–4,2% для указанных исследованных образцов ПКМ в зависимости от их толщины.

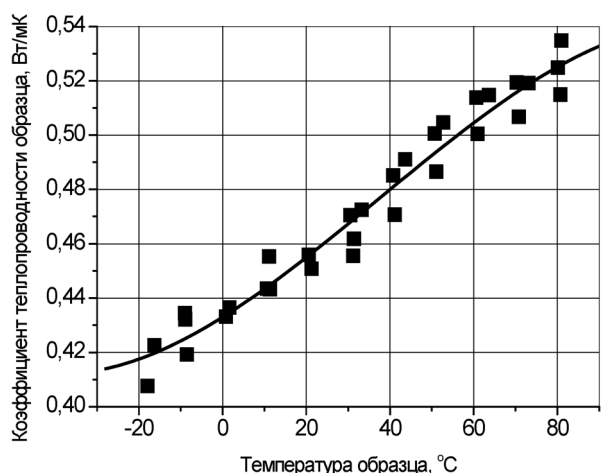


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры образца ПКМ из углеродной ткани УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна UMT40-3K-EP

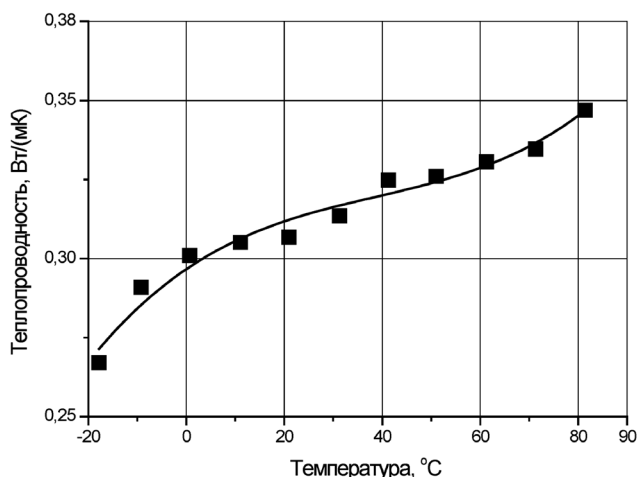


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры образца углеродного ПКМ TENAX-E TPCL PEEK-4-40-HTA40 E13 3K

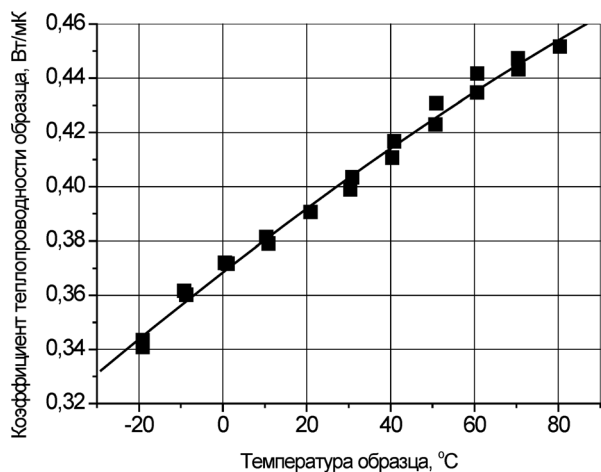


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры образца ПКМ из углеродной ленты УТ-1000-205-12K из углеродного волокна Umatex UMT49-12K-EP

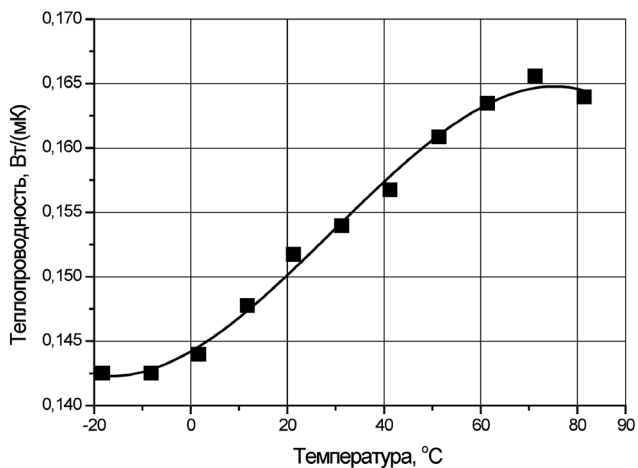


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры образца ПКМ на основе арамидного волокна РУСАР С600 и эпоксидного связующего Т-26

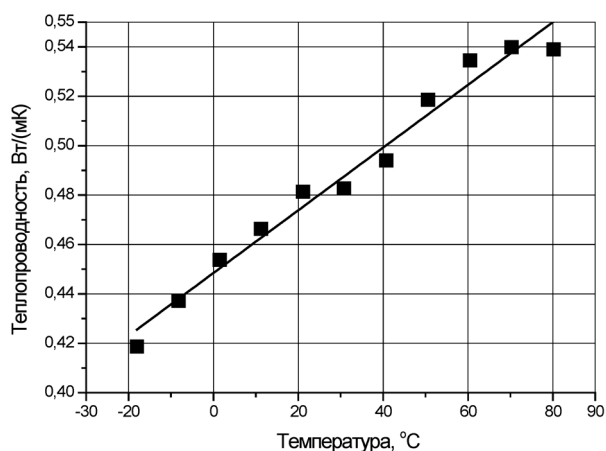


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры образца ПКМ на основе углеродного волокна Umatex UMT49-12K-EP и связующего PEEK

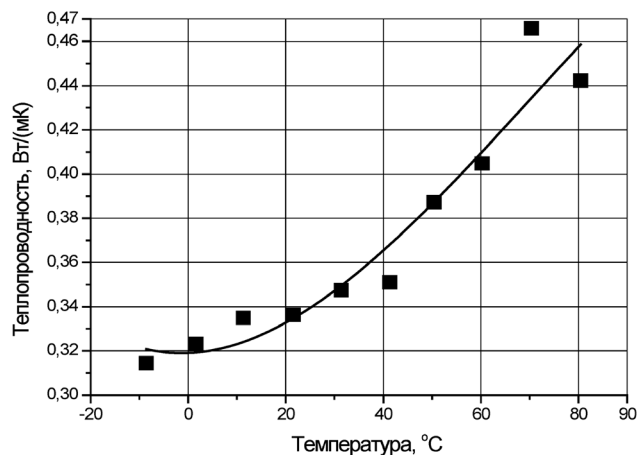


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры образца ПКМ на основе углеродного волокна UMT49-12K-EP и эпоксидного связующего Т-26

Установлено, что для всех образцов в исследованном диапазоне температур наблюдается рост коэффициентов теплопроводности с ростом температуры образцов. Диапазон изменения коэффициентов теплопроводности всех образцов в зависимости от состава и структуры формирования находится в диапазоне 0,141–0,54 Вт/(м·К).

Результаты определения температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  (Вт/(м·К)) в диапазоне – 20...80 °С для исследованных образцов представлены в табл. 4.

**Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования коэффициентов теплопроводности методом плоской пластины и методом дифференциальной сканирующей калориметрии**

Теплопроводность исследовалась двумя методами: стационарным методом плоской пластины с использованием измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium и нестационарным методом дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией (ТМ-ДСК) с использованием измерителя Netzsch DSC 204F1 Phoenix (Германия) [9].

Расчет теплопроводности материала  $\lambda$  с использование метода ТМ-ДСК и измерителя Netzsch DSC 204F1 Phoenix проводился по формуле, представленной в работе [10]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0 - 2D + (\lambda_0^2 - 4D\lambda_0)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (2)$$

где  $D$  – калибровочная константа, определяемая путем измерения кажущейся теплопроводности  $\lambda_0$  для материала сравнения (полистирола). Относительная расширенная неопределенность измерений коэффициентов теплопроводности данным методом составила 6,2% для указанных исследованных образцов ПКМ с учетом их толщины.

Расчет теплопроводности материала  $\lambda$  с использование метода расчета теплопроводности материала  $\lambda$  с помощью измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium проводился по формуле (1). Относительная расширенная неопределенность измерений коэффициентов теплопроводности дан-

ным методом составила 3,4–4,2% для рассматриваемых нами образцов ПКМ.

Значения коэффициента теплопроводности ПКМ поперек волокон, полученные различными методами, для некоторых образцов ПКМ, представлены на рис. 8 и 9.

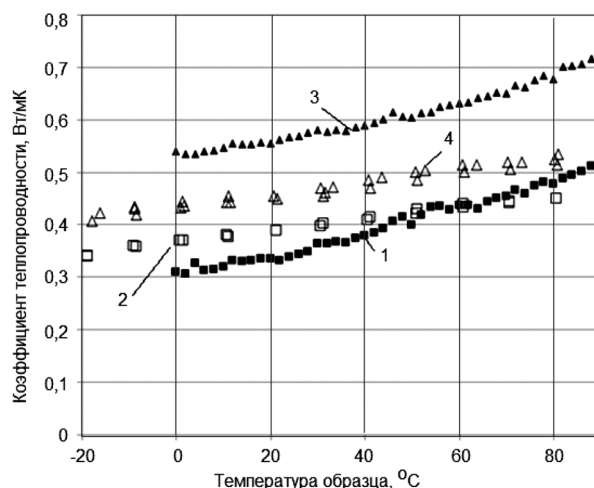


Рис. 8. Коэффициент теплопроводности углепластиковых ПКМ с различным видом армирования: 1 и 2 – ПКМ из углеродной ленты УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex UMT49-12К-EP, 3 и 4 – ПКМ из углеродной ткани УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна UMT40-3К-EP, ■ и ▲ – метод ТМ-ДСК; □ и △ – метод стационарного теплового потока

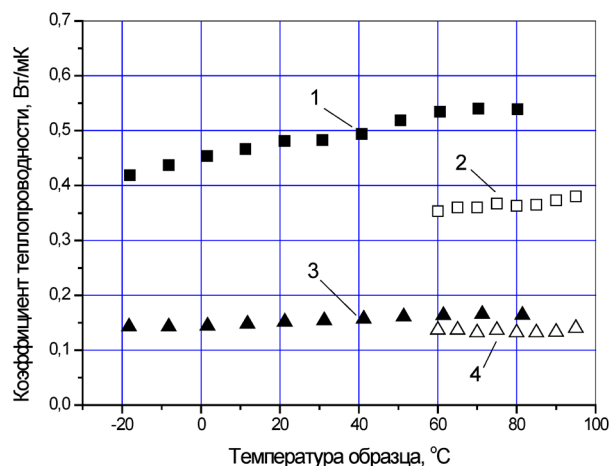


Рис. 9. Коэффициенты теплопроводности ПКМ: 1 и 2 – волокнистый реактопласт на основе арамидного волокна РУСАР С600 и эпоксидной смолы Т-26, 3 и 4 – углепластиковый термопласт на основе углеволокна UMT-49 и полиэфиркетоновой матрицы РЕЕК, ■ и ▲ – метод ТМ-ДСК, □ и △ – метод стационарного теплового потока

Видно, что отличие значений коэффициентов теплопроводности, полученных различными методами, составляет для углепластика армированного лентой до 17%, для углепластика

армированного тканью – 25...34%, для волокнистого реактопласта – до 16%. Следует отметить, что углепластик на основе ленты и арамидного волокна показал меньшее различие в значениях коэффициента теплопроводности. Расхождение данных вероятно связано с неравномерностью распределения пор с воздухом в них, учитывая, что по методу ТМ-ДСК измерения проводились на образцах до 8 мм в диаметре, а по методу стационарного теплового потока – на пластинах размером 300×300 мм при одинаковых толщинах.

Несмотря на то что в качестве образца сравнения применялся полистирол, преимуществом метода ТМ-ДСК является возможность расширения температурного интервала измерения теплопроводности от –100 до 230 °С с применением боросиликатного образца в качестве материала сравнения, а также интервал измерения теплопроводности от 0,1 до 4 Вт/м К с применением малых периодов термомодуляции (20 секунд/50 мГц). К недостаткам метода ТМ-ДСК можно отметить отсутствие сертифицированных калибровочных образцов и вероятность локального отклонения параметров образца от всей пластины, связанного с его малым размером.

Необходимо отметить, что использование метода ТМ-ДСК обеспечивает возможность контроля локальных коэффициентов теплопроводности элементов малых размеров, вырезанных непосредственно из изделий при различных направлениях ориентации волокна.

В то же время для метода стационарного теплового потока разработан ряд стандартизированных процедур верификации и калибровки значений теплопроводности, что повышает степень доверия к экспериментальным данным. Однако высокие требования к качеству поверхности твердых образцов и большие габариты исследуемых пластин накладывают ряд ограничений на метод, одним из которых является максимальные значения измеряемой теплопроводности около 2 Вт/м К и температурный диапазон от –20 до 80 °С.

### Заключение

В работе представлены первичные результаты исследования коэффициентов теплопроводности новых углеродных ПКМ в диапазоне температур от –20 до 80 °С. Выявлены уровни

коэффициентов теплопроводности и влияние на них средней температуры образцы ПКМ. Предложены температурные зависимости для прогнозирования коэффициентов теплопроводности исследованных образцов ПКМ. Проведен сравнительный анализ результатов определения коэффициентов теплопроводности нестационарным методом дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией и ТМ-ДСК и стационарным методом пластины. Установлено, что метод стационарного теплового потока более адаптирован для измерений коэффициентов теплопроводности. Результаты работы предназначены для оценки теплового состояния изделий из исследованных типов ПКМ в ходе их эксплуатации.

### Список источников

1. Li H., Zhu Q., Liu G., Zhu Q. Intrinsically And Extrinsicly Anisotropic Heat Transport In Bulk Materials And Nanostructures: A Review // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 196. P. 123307. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123307
2. Guo Y., Ruan K., Shi X., Yang X. Factors Affecting Thermal Conductivities Of The Polymers And Polymer Composites: A Review // Composites Science and Technology. 2020. Vol. 193. P. 108134. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108134
3. Zhou T., Zhao Y., Rao Z. Fundamental And Estimation Of Thermal Contact Resistance Between Polymer Matrix Composites: A Review // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 189. P. 122701. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122701
4. Tian W., Qi L., Fu M. W. Multi-Scale And Multi-Step Modeling Of Thermal Conductivities Of 3D Braided Composites // International Journal of Mechanical Sciences. 2022. Vol. 228. P. 107466. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107466
5. Zhai S., Zhang P., Xian Y., Zeng J. Effective Thermal Conductivity Of Polymer Composites: Theoretical Models And Simulation Models // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 117. P. 358–374. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.067
6. Yang M., Li X., Yuan J., Wen Z., Kang G. A Comprehensive Study On The Effective Thermal Conductivity Of Random Hybrid Polymer Composites // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 182. P. 121936. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121936
7. Попов И.А., Константинов Д.Ю., Кузин А.А., Русских М.Д. Исследование теплофизических свойств углепластиковых полимерных композитных материалов // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 3. С. 116–125. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-3-116-125
8. ASTM C518-21. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. Annual Book of ASTM Standards, 2021, 16 p. DOI: 10.1520/C0518-21
9. Хамидуллин О.Л., Низамиев Р.Р., Балькаев Д.А., Аморова Л.М. Определение тепло-проводности полимеров методом дифференциальной сканирующей калори-

метрии с температурной модуляцией // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 4. С. 186–192. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-4-186-192

10. ASTM E1952-23. Standard Test Method for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity by Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry. Annual Book of ASTM Standards, 2023. 7 p. DOI: 10.1520/E1952-23

### References

1. **Li H., Zhu Q., Liu G., Zhu Q.** Intrinsically And Extrinsicly Anisotropic Heat Transport In Bulk Materials And Nanostructures: A Review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 196, p. 123307. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123307
2. **Guo Y., Ruan K, Shi X., Yang X.** Factors Affecting Thermal Conductivities Of The Polymers And Polymer Composites: A Review. *Composites Science and Technology*, 2020, vol. 193, p. 108134. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108134
3. **Zhou T., Zhao Y., Rao Z.** Fundamental And Estimation Of Thermal Contact Resistance Between Polymer Matrix Composites: A Review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 189, p. 122701. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122701
4. **Tian W., Qi L., Fu M. W.** Multi-Scale And Multi-Step Modeling Of Thermal Conductivities Of 3D Braided Composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, vol. 228, p. 107466. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107466
5. **Zhai S., Zhang P., Xian Y., Zeng J.** Effective Thermal Conductivity Of Polymer Composites: Theoretical Models And Simulation Models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 117, pp. 358–374. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.067
6. **Yang M., Li X., Yuan J., Wen Z., Kang G.** A Comprehensive Study On The Effective Thermal Conductivity Of Random Hybrid Polymer Composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 182, p. 121936. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121936
7. **Popov I.A., Konstantinov D.Yu., Kuzin A.A., Russkikh M.D.** Studying thermo-physical properties of polymer carbon composite materials. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 116–125. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2022-14-3-116-125
8. ASTM C518-21. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. Annual Book of ASTM Standards, 2021. 16 p. DOI: 10.1520/C0518-21
9. **Khamidullin O.L., Nizamiev R.R., Balkaev D.A., Amirova L.M.** Determination of thermal conductivity of polymers by the method of differential scanning calorimetry with temperature modulation. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 186–192. (In Russ.) DOI: 10.34759/tpt-2022-14-4-186-192
10. ASTM E1952-23. Standard Test Method for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity by Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry. Annual Book of ASTM Standards. 2023, 7 p. DOI: 10.1520/E1952-23

Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 03.08.2023; принята к публикации 08.09.2023.

The article was submitted on 12.04.2023; approved after reviewing on 03.08.2023; accepted for publication on 08.09.2023.