

УДК 678.747.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА С РАЗЛИЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ МЕТОДАМИ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СКАНИРУЮЩЕГО КАЛОРИМЕТРА С ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ¹

© 2023 г. И. А. Попов¹, *, О. Л. Хамидуллин¹, Л. М. Амирова¹, И. А. Попов²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

*E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.09.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 06.12.2022 г.

В работе проведено исследование коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости углепластика с различным армированием методами стационарного теплового потока и дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией. Установлены значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости и их зависимости от температуры в диапазоне температур от -20°C до 100°C . Диапазоны изменения коэффициентов теплопроводности составили от 0.400 до 0.515 Вт/(м К), а удельного коэффициента теплоемкости от 923 до 984 Дж/(кг К). Полученные результаты могут быть использованы для расчета и проектирования систем и установок с использованием полимерных композитных материалов как конструкционного материала, а также для расчета параметров технологического процесса производства этих материалов.

DOI: 10.31857/S0040364423050137

ВВЕДЕНИЕ

Теплопроводность и теплоемкость композиционных материалов играют решающую роль при оптимизации технологических режимов их получения и при проектировании инженерных систем, где важны температура и тепловое напряжение. На теплопроводность композиционных материалов большое влияние оказывают температура, химический состав, количество и размеры армирующего наполнителя, пористость и направление теплового потока [1–6]. Трудно избежать некоторых факторов и помех, таких как тепловое контактное сопротивление, неоднородность, пористость и др., что сильно отражается на результатах измерения теплофизических характеристик, получаемых даже одним и тем же методом [7–9]. Следовательно, точное измерение и получение надежного значения теплопроводности стали ключевой задачей в области материаловедения.

На сегодняшний день доступно множество методов измерения данных характеристик материалов в широком диапазоне температур [10]. Доступные и коммерческие методы измерения теплопроводности можно разделить на методы стационарных условий: защищенная горячая пластина, расходо-

мер тепла [11], и методы переходных условий: переходный плоский источник [12], переходная горячая проволока [13], лазерная вспышка [14], модулированная дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) [15], метод 3ω [16], дифференциальный фотоакустический метод [17], метод фототермического отклонения лазерного луча [18, 19], метод термоотражения [20]. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, а также определенные области применения, исходя из температурного диапазона измерений и размеров образцов. Очень часто результаты измерения различными методами сильно разнятся, что может быть связано как с исследуемыми материалами, так и чувствительностью метода [21].

С момента первого использования дифференциального сканирующего калориметра с температурной модуляцией для измерения теплопроводности [22] проведена его многократная апробация в различных лабораториях [23]. В последние годы этот метод используется для измерения теплопроводности различных материалов, в том числе полимерных композитов [24–26]. Достоинствами метода являются небольшие размеры образцов и широкий температурный диапазон измерения теплопроводности, например от -80 до $+180$, что весьма актуально для авиационно-космических материалов. Разработаны стандарты, позволяющие измерять теплопроводность материалов в интер-

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

вале температур от 0 до 90°C [27], в том числе и для композитов [28].

Измеритель теплового потока, например HFM 446 Lambda Small (Netzsch, Германия) в соответствии со стандартом [29], позволяет измерять теплопроводность в диапазоне $-20...+80^\circ\text{C}$ [30–32]. Для повышения диапазона температурных измерений, например, до 200°C необходимо использовать специальную муфельную печь [33]. Размеры образцов для измерения составляют $300 \times 300 \text{ мм}^2$ при толщине не менее 5 мм.

В научной литературе очень мало исследований теплопроводности одних и тех же образцов, проведенных разными методами [34, 35]. Также следует отметить, что при измерениях различными методами представляемые в работах данные сильно разнятся. Измерения для одних материалов с применением разного оборудования позволяют увидеть различия методов по точности, реально оценить достоинства и недостатки каждого метода, поэтому весьма актуальны.

Целью данной работы являются параллельное исследование и сопоставление теплофизических свойств углепластиков двумя методами: стационарного теплового потока и ДСК с температурной модуляцией.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбирался углепластик на основе эпоксидного связующего, отвержденного ароматическим аминным отвердителем. В качестве армирующего элемента использовались углеродная ткань УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна УМТ40-3К-ЕР и углеродная лента УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex УМТ49-12К-ЕР.

Структура углепластиков оценивалась на оптических микроскопах Leica V80 и Olympus GX51. Микрофотографии структуры углепластика на основе ткани и ленты представлены на рис. 1. Значения структурных параметров углепластиков представлены в табл. 1. Образцы имеют высокое качество, а дефекты отсутствуют.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теплопроводность и теплоемкость исследовались двумя методами: с помощью измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medi-

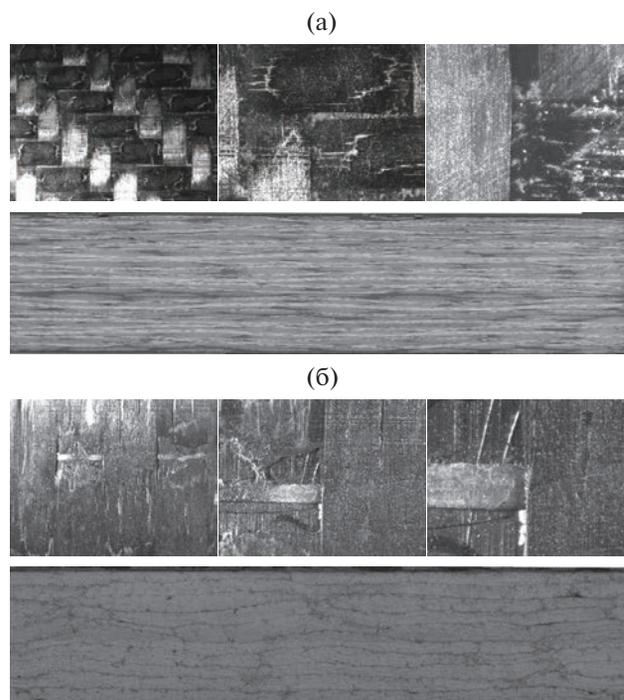


Рис. 1. Микрофотографии структуры углепластиков с различным армированием: (а) – углепластик на основе ткани; (б) – углепластик на основе ленты.

um (Netzsch, Германия) и нестационарным методом ДСК с температурной модуляцией (ТМ-ДСК) с использованием измерителя DSC 204F1 Phoenix (Netzsch, Германия).

Теплопроводность методом ДСК оценивалась в атмосфере инертного азота. Калибровка прибора осуществлялась по сапфировому диску ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) чистотой 99.99%.

Коэффициент теплопроводности λ методом ТМ-ДСК может быть получен по значениям теплоемкости, измеренной для цилиндрического образца, действительной теплоемкости тонкого образца и серии геометрических и экспериментальных констант [36]. Сущность метода определения теплопроводности методом ТМ-ДСК заключается в сравнении теплоемкости тонкого образца, в котором выполняется условие равномерности распределения температуры, и наблюдаемой теплоемкости цилиндрического образца, несколько заниженной из-за распределения температуры по длине, определяемого его температуропроводностью.

Таблица 1. Характеристики углепластиков на основе ткани и ленты

Тип армирования	Углеродная ткань УТ-1000-200	Углеродная лента УТ-1000-205-12К
Плотность углепластика, кг/м^3	1539	1562
Пористость, %	<0.1	<0.1
Объемная доля волокна, %	56.3	5.2
Степень отверждения, %	>98	>98

Образцы углепластика и образец для сравнения из полистирола представляли собой правильные цилиндры высотой $L = 3.5 \pm 0.3$ мм и диаметром $d = 5.0 \pm 0.1$ мм.

Наблюдаемый коэффициент теплопроводности λ_0 , Вт/(К м), рассчитывался по формуле [23, 27, 28, 36]

$$\lambda_0 = \frac{8LC^2}{C_p m d^2 P},$$

где C – кажущаяся (наблюдаемая) теплоемкость цилиндрического образца, мДж/К; C_p – удельная теплоемкость материала, Дж/(г К); m – масса цилиндрического образца, мг; P – период температурной модуляции, с.

Для вычисления коэффициента теплопроводности применяется калибровочная константа D , определяемая путем измерения кажущейся теплопроводности λ_0 для эталонного материала с заранее известной теплопроводностью λ_r [23, 27, 28, 36]:

$$D = (\lambda_0 \lambda_r)^{\frac{1}{2}} - \lambda_r.$$

В данной работе в качестве материала для сравнения применялся полистирол.

Расчет теплопроводности материала проводился по формуле [23, 27, 28, 36]

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[\lambda_0 - 2D + (\lambda_0^2 - 4D\lambda_0)^{\frac{1}{2}} \right].$$

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

Прибор подлежит предварительной калибровке. Калибровка производится с помощью сертифицированного эталонного стандарта NIST или ГСО с известной теплопроводностью. Это устанавливает соответствие между сигналом датчиков и тепловым потоком, проходящим через него. Коэффициент теплопроводности вычисляется, когда пользовательские критерии равновесия выполнены. В экспериментах для калибровки использовался образец из минеральной ваты IRMM-440A. Полученный калибровочный коэффициент N далее применялся для определения коэффициентов теплопроводности по зависимости

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

где V – напряжение, подаваемое на нагреватель пластины; F – площадь поверхности образца; δ – толщина образца; $T_{гор}$, $T_{хол}$ – температуры на поверхности образца со стороны горячей и холодной пластин.

В основном блоке исследований коэффициент теплопроводности полимерных композитных материалов (ПКМ) испытуемый образец помещают в прибор между двумя нагреваемыми пластинами (рис. 2). Образец располагается на нижней нагреваемой пластине. С помощью подъемного устройства, состоящего из четырех электромоторов и направляющих шпилек по четырем сторонам верхней нагревательной пластины, производится прижатие верхней пластины с заданным избыточным давлением к образцу. Толщина образца измеряется индуктивным датчиком расстояния. Полусфера над верхней нагреваемой пластиной позволяет ориентировать пластину под необходимым углом, если образец имеет непараллельные стенки. Непараллельность стенок образца не должна превышать заданных значений, которые контролируются датчиком наклона, установленным на верхней нагреваемой пластине.

Средняя температура и перепад температур между пластинами задаются пользователем. Температура пластин контролируется двунаправленными системами нагрева/охлаждения Пельтье с использованием встроенной жидкостной циркуляции. Данные постоянно получаются, обрабатываются и хранятся интегрированной электроникой, и после завершения теста все результаты выводятся на печать. Использование двух датчиков повышает скорость измерений (до 30 мин на образец), что важно для контроля качества. Вследствие того, что коэффициенты теплопроводности ПКМ могут быть ближе к верхнему пределу измерений измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium, составляющего 2 Вт/(м К), и что ПКМ является твердым материа-

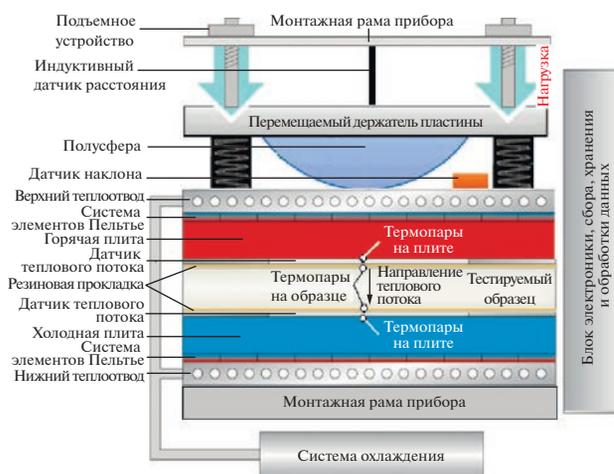


Рис. 2. Схема измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium.

лом, в исследованиях использовались дополнительные внешние термодары и резиновые прижимные прокладки, обеспечивающие хороший контакт образца с нагреваемыми/охлаждаемыми пластинами.

Так как углепластик представляет ПКМ, состоящий из основы — углеволокна и тканевой основы, связующего — полипропилена, эпоксидной смолы или других материалов, и пор, то определяемый коэффициент теплопроводности является эффективным, учитывающим коэффициенты теплопроводности твердых фаз — углеволокна и полистирола, воздуха в порах, радиационный перенос в порах.

Образец углепластика размерами 300×300 мм² и толщиной 5.1 мм 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 с известной теплопроводностью. Расчет теплопроводности проводился по формуле (1) [29].

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования теплопроводности. В ходе подготовки экспериментальных исследований проведены тестовые измерения образцов из материалов с известными теплофизическими свойствами: минеральной ваты IRMM-440A, пенополистирола EPS и боросиликатного стекла. Все тестовые образцы имеют сертификаты Объединенного исследовательского центра Европейской Комиссии и компании Netzsch.

Результаты сравнения данных тестовых экспериментов и приведенных в сертификатах показали [37, 38], что отклонение экспериментальных данных по теплопроводности для минеральной ваты IRMM-440A не превышает 2%, для пенополистирола EPS — 2.5%, для боросиликатного стекла — 7%.

Коэффициент теплопроводности углепластиков оценивался нормально к плоскости пластины (армирования). Первичные результаты измерений коэффициента теплопроводности образца ПКМ из углеродной ткани УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна УМТ40-3К-EP, выполненные с учетом оценки воспроизводимости данных при смене мест замеров по поверхности пластины внутри зоны работы датчика теплового потока, представлены в табл. 2. На рис. 3 показана

на зависимость коэффициента теплопроводности образца углепластика на основе ткани.

Полученная экспериментальная зависимость хорошо описывается уравнением зависимости коэффициента теплопроводности λ данного образца ПКМ от температуры t (°C) в исследованном диапазоне температур:

$$\lambda = 0.43297 + 0.00096534t + 8.1659 \times 10^{-6}t^2 - 7.29628 \times 10^{-8}t^3.$$

Зависимость описывает все экспериментальные точки с отклонением не более $\pm 2.5\%$ при доверительной вероятности 0.9.

Необходимо указать, что с ростом температуры нагрева образца возрастает давление на образце вследствие его теплового расширения. Перед экспериментом первоначально устанавливалось избыточное давление нагрузки на образце на уровне 15 кПа при температуре 23.4°C.

Первичные результаты измерений коэффициента теплопроводности образца ПКМ из углеродной ленты УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex УМТ49-12К-EP представлены в табл. 3. Измерения выполнены с учетом оценки воспроизводимости данных при смене мест замеров по поверхности пластины внутри зоны работы датчика теплового потока. На рис. 4 приведена зависимость коэффициента теплопроводности образца углепластика на основе лент.

Полученная экспериментальная зависимость хорошо описывается уравнением для коэффициента теплопроводности λ данного образца ПКМ как функции температуры в исследованном диапазоне температур:

$$\lambda = 0.36841 + 0.00121t + 1.47144 \times 10^{-6}t^2 - 2.86053273 \times 10^{-9}t^3.$$

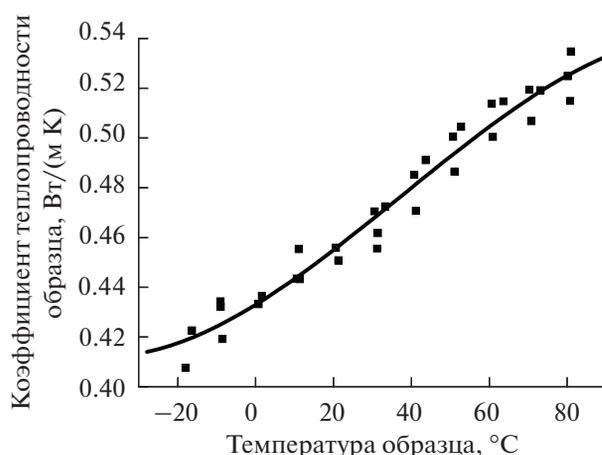


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности образца ПКМ из углеродной ткани УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна УМТ40-3К-EP методом СТП от температуры.

Таблица 2. Результаты измерений коэффициента теплопроводности образца ПКМ из углеродной ткани УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна УМТ40-3К-ЕР методом СТП

Температура образца, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)	Неопределенность измерения, %	Продолжительность опыта, ч:мин	Давление на образце, кПа
Первая серия измерений				
-17.98	0.408	4.1	00:30	10.6
-8.50	0.419	4.1	00:30	11.0
1.64	0.437	4.1	00:25	13.3
11.38	0.443	4.1	00:24	13.3
21.28	0.451	4.1	00:24	13.6
31.42	0.462	4.1	00:44	14.3
31.17	0.456	4.1	00:19	14.3
41.16	0.471	4.1	00:22	14.6
51.09	0.487	4.1	00:22	15.5
60.96	0.500	4.1	00:23	16.0
70.78	0.507	4.1	00:20	16.8
80.77	0.515	4.1	00:20	17.0
Вторая серия измерений (образец повернут, изменено положение термопар)				
-8.94	0.432	4.1	01:45	11.8
0.80	0.433	4.1	01:02	13.2
10.60	0.443	4.1	00:43	13.3
20.62	0.456	4.5	00:45	13.7
30.56	0.471	4.1	00:30	14.2
40.72	0.485	4.1	00:22	14.7
50.72	0.501	4.1	00:22	15.4
60.61	0.514	4.1	00:23	16.0
70.28	0.519	4.1	00:21	16.6
80.16	0.525	4.1	00:20	17.1
Третья серия измерений (условия второй серии, повторное измерение)				
-16.29	0.423	4.2	01:09	12.6
-8.96	0.434	4.1	00:30	12.4
1.28	0.445	4.1	00:15	12.8
11.12	0.455	4.1	00:16	13.1
33.25	0.473	4.1	00:25	14.2
43.63	0.491	4.1	00:14:	14.8
52.73	0.505	4.1	00:14:	15.5
63.63	0.515	4.1	00:16:	16.3
73.14	0.519	4.1	00:17:	17.0
80.97	0.535	4.1	00:12:	17.5

Зависимость описывает все экспериментальные точки с отклонением не более $\pm 1.2\%$ при доверительной вероятности 0.9.

Значения коэффициента теплопроводности для углепластиков на основе ткани и ленты, полученные различными методами, представлены на рис. 5. Различие значений коэффициента теплопроводности, полученных разными методами, составляет для углепластика, армированного лентой, 0–17%; для углепластика, армированного тканью, 25–27%. Следует отметить, что углепластик на основе ленты показал меньшее различие в значениях коэффициента теплопроводности.

Несмотря на то что в данной работе в качестве образца для сравнения применялся полистирол, к

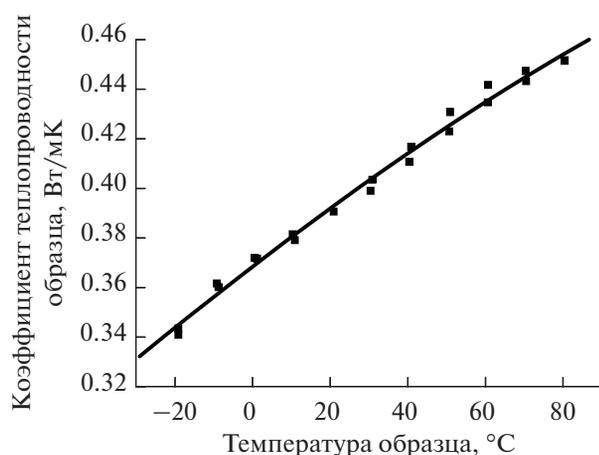
преимуществам метода ТМ-ДСК можно отнести возможность расширения температурного интервала измерения теплопроводности от -100 до 230°C с применением боросиликатного образца в качестве материала сравнения, а также интервал измерения теплопроводности от 0.1 до 4 Вт/(м К) с применением малых периодов термомодуляции (20 с/50 мГц). Из недостатков метода ТМ-ДСК можно отметить отсутствие сертифицированных калибровочных образцов, а также вероятность локального отклонения параметров образца от значений для всей пластины, что связано с его малым размером.

В то же время для метода стационарного теплового потока разработан ряд стандартизированных

Таблица 3. Результаты измерений коэффициента теплопроводности ПКМ из углеродной ленты УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex UMT49-12К-EP

Температура образца, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)	Неопределенность измерения, %	Продолжительность опыта, ч:мин:с	Давление на образце, кПа
Первая серия измерений (кривая нагрева)				
-19.1	0.34087	4.4	00:41:44	12.4
-8.7	0.36010	4.2	00:22:48	12.4
1.2	0.37162	4.2	00:19:48	12.7
10.9	0.37907	4.2	00:22:42	13.0
20.9	0.39059	4.6	00:21:30	13.3
30.9	0.40349	4.3	00:23:30	13.8
40.9	0.41674	4.2	00:24:00	14.5
50.9	0.43079	4.2	00:24:00	15.2
60.7	0.44176	4.2	00:24:30	15.9
70.4	0.44730	4.2	00:21:00	16.5
Вторая серия измерений (кривая охлаждения)				
80.4	0.45168	4.2	00:39:00	15.5
70.5	0.44320	4.2	00:41:39	15.0
60.6	0.43470	4.2	00:44:00	14.3
50.7	0.42295	4.2	00:47:00	13.7
40.4	0.41067	4.2	00:22:44	13.2
30.4	0.39893	4.3	00:21:18	12.6
10.4	0.38142	4.2	00:27:36	11.7
0.5	0.37192	4.2	00:23:06	11.1
-9.2	0.36160	4.2	00:21:18	10.5
-19.1	0.34339	4.4	00:25:27	10.0

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, которыми являются максимальное значение измеряемой теплопроводности ~ 2 Вт/(м К) и температурный диапазон от -20 до 80°C .

**Рис. 4.** Зависимость коэффициента теплопроводности образца ПКМ из углеродной ленты УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex UMT49-12К-EP от температуры.

Отдельно следует отметить, что возможность анализировать образцы малых габаритов в случае метода ТМ-ДСК позволяет применять его для контроля элементов, вырезанных непосредственно из изделий в различных направлениях.

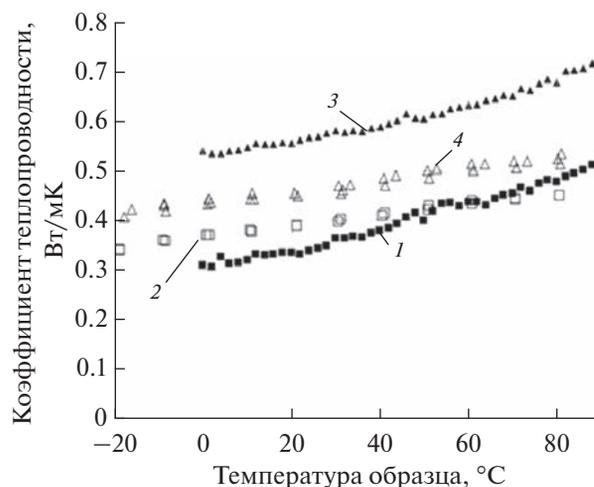
**Рис. 5.** Коэффициент теплопроводности углепластиковых ПКМ с различным видом армирования: 1, 2 – ПКМ из углеродной ленты УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex UMT49-12К-EP; 3, 4 – ПКМ из углеродной ткани УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна UMT40-3К-EP; темные точки – метод ТМ-ДСК, светлые – СТП.

Таблица 4. Результаты измерений удельной теплоемкости образцов ПКМ при 30°C, Дж/(кг К)

ПКМ, армированные углеродной тканью	ПКМ, армированные углеродной лентой
959	984
944	923

Исследования удельной теплоемкости. Теплоемкость исследовалась нестационарным методом ТМ-ДСК с использованием измерителя DSC 204F1 Phoenix (Netzsch, Германия). Калибровка прибора по теплоемкости осуществлялась по сапфировому диску ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) чистотой 99.99%. Теплоемкость методом ДСК оценивалась в атмосфере инертного азота для цилиндрического образца с использованием действительной теплоемкости тонкого образца и серии геометрических и экспериментальных констант [36]. Сущность метода определения теплоемкости методом ТМ-ДСК заключается в сравнении теплоемкости тонкого образца, в котором выполняется условие равномерного распределения температуры, и наблюдаемой теплоемкости цилиндрического образца, несколько заниженной из-за распределения температуры по длине.

Измеритель стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium также позволяет определить удельную теплоемкость ПКМ. Измерение производится с использованием калориметрического метода. При этом первоначально пластины и образец выдерживаются при постоянной температуре, затем температура пластин и образца постепенно повышается до полного прогрева. При измерении определяется количество теплоты, аккумулируемой образцом на этапе нагрева как интеграл выходной мощности счетчика теплового потока. В расчете удельной теплоемкости методом СТП учитываются масса образца и разница температур во времени до полного прогрева образца.

Результаты измерений удельной теплоемкости C_p образца представлены в табл. 4. Данные о теплоемкости углепластиков при измерениях различными методами дают отличие не более 7%.

Полученные в результате анализа теплофизические параметры могут быть использованы в качестве входных данных для теплофизических моделей технологических процессов получения ПКМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследований с использованием измерителя стационарного теплового потока и ДСК с термомодулирующей получены зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости углепластиков с различным армированием. Полученные результаты могут быть использованы для расчета и проектирования систем

и установок с использованием конструкционных углепластиков, а также для моделирования технологических процессов производства. На основе полученных данных может быть сформирована база данных РФ по коэффициентам теплопроводности и удельной теплоемкости ПКМ. Результаты также позволяют проводить верификацию численных моделей теплопроводности исследованного материала с учетом его структуры.

Сравнительный анализ методов выявил ряд особенностей. Так, для метода СТП разработан ряд стандартизированных процедур верификации и калибровки, 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, которыми являются максимальное значение измеряемой теплопроводности ~ 2 Вт/(м К) и температурный диапазон от -20 до 80°C .

В то же время возможность расширения температурного диапазона метода ТМ-ДСК от -100 до 230°C с использованием боросиликатного стекла в качестве образца для сравнения, а также расширенный интервал измерения теплопроводности от 0.1 до 4 Вт/(м К) обуславливают востребованность данного метода. Отдельно следует отметить, что возможность анализировать образцы малых габаритов при использовании метода ТМ-ДСК обеспечивает его применимость для контроля элементов, вырезанных из изделия в различных направлениях.

Работа выполнена в рамках соглашения с Министерством науки и образования РФ № 075-03-2023-032.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li H., Zhu Q., Liu G., Zhu Q. Intrinsically and Extrinsic Anisotropic Heat Transport in Bulk Materials and Nanostructures: A Review // Int. J. Heat Mass Transfer. 2022. V. 196. P. 123307.
2. Tian W., Qi L., Fu M.W. Multi-scale and Multi-step Modeling of Thermal Conductivities of 3D Braided Composites // Int. J. Mech. Sci. 2022. V. 228. P. 107466.
3. Chen J. Effects of Different Factors on the Heat Conduction Properties of Carbon Films and Fibers // East European Journal of Physics. 2022. № 2. P. 91.
4. 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. V. 193. P. 108134.
5. Zhai S., Zhang P., Xian Y., Zeng J. Effective Thermal Conductivity of Polymer Composites: Theoretical Models and Simulation Models // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 358.
6. Chen H., Ginzburg V.V., Yang J., Yang Y., Liu W., Huang Y., Du L., Chen B. Thermal Conductivity of Polymer-based Composites: Fundamentals and Applications // Progress in Polymer Science. 2016. V. 59. P. 41.
7. Zhou T., Zhao Y., Rao Z. Fundamental and Estimation of Thermal Contact Resistance between Polymer Ma-

- trix Composites: A Review // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2022. V. 189. P. 122701.
8. *Yang M., Li X., Yuan J., Wen Z., Kang G.* A Comprehensive Study on the Effective Thermal Conductivity of Random Hybrid Polymer Composites // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2022. V. 182. P. 121936.
 9. *Wu Q., Liu C., Xu Y., Li G., Zhang H., Huang J., Miao J.* Carbon Fiber Reinforced Elastomeric Thermal Interface Materials for Spacecraft // *Carbon*. 2022. V. 187. P. 432.
 10. *Wunderlich B.* Thermal Analysis of Polymeric Materials. Berlin—Heidelberg—N.Y.: Springer, 2005. 894 p.
 11. *Tritt T.M.* Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications. N.Y.: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2004. 290 p.
 12. *Solorzano E., Reglero J.A., Rodriguez-Perez M.A., Lehman D., Wichmann M., De Saja J.A.* An Experimental Study on the Thermal Conductivity of Aluminium Foams by Using the Transient Plane Source Method // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2008. V. 51. P. 6259.
 13. *Assael M.J., Antoniadis K.D., Tzetzis D.* The Use of the Transient Hot-wire Technique for Measurement of the Thermal Conductivity of an Epoxy-resin Reinforced with Glass Fibers and/or Carbon Multi-walled Nanotubes // *Composites Science and Technology*. 2008. V. 68. № 15–16. P. 3178.
 14. *Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L.* FLASH Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity // *J. Appl. Phys.* 1961. V. 32. P. 1679.
 15. *Chiu J., Fair P.G.* Determination of Thermal Conductivity by Differential Scanning Calorimetry // *Thermo-chimica Acta*. 1979. V. 24. № 2. P. 267.
 16. *Cahill D.G.* Thermal Conductivity Measurement from 30 to 750 K: The 3 ω Method // *Review of Scientific Instruments*. 1990. V. 61. P. 802.
 17. *Govorkov S., Ruderman W., Horn M.W., Goodman R.B., Rothschild M.* A New Method for Measuring Thermal Conductivity of Thin Films // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. P. 3828.
 18. *Jackson W.B., Amer N.M., Boccara A.C., Fournier D.* Photothermal Deflection Spectroscopy and Detection // *Applied Optics*. 1981. V. 20. P. 1333.
 19. *Jeona P.S., Kima J.H., Kimb H.J., Yoob J.* Thermal Conductivity Measurement of Anisotropic Material Using Photothermal Deflection Method // *Thermo-chimica Acta*. 2008. V. 477. P. 32.
 20. *Kuwahara M., Suzuki O., Takada S., Hata N., Fons P., Tominaga J.* Thermal Conductivity Measurements of Low- k Films Using Thermoreflectance Phenomenon // *Microelectronic Engineering*. 2008. V. 85. P. 796.
 21. *Li H., Zhu Q., Liu G., Zhu Q.* Intrinsically and Extrinsicly Anisotropic Heat Transport in Bulk Materials and Nanostructures: A Review // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2022. V. 196. P. 123307.
 22. *Brennan W.P., Miller B., Whitwell J.C.* Thermal Conductivity Measurements with the Differential Scanning Calorimeter // *J. Appl. Polym. Sci.* 1968. V. 21. P. 1800.
 23. *Blaine R.L., Cassel R.B.* Precision and Bias of the ASTM Test E1952 for Thermal Conductivity by Modulated Temperature DSC. Delaware: Thermal Library Application Brief TA265, TA Instruments New Castle, 2001. P. 26.
 24. *Cecen V., Tavman I.H., Kok M., Aydogdu Y.* Epoxy- and Polyester-based Composites Reinforced with Glass, Carbon, and Aramid Fabrics: Measurement of Heat Capacity and Thermal Conductivity of Composites by Differential Scanning Calorimetry // *Polymer Composites*. 2009. V. 30. № 9. P. 1299.
 25. *Hu M., Yu D., Wei J.* Thermal Conductivity Determination of Small Polymer Samples by Differential Scanning Calorimetry // *Polymer Testing*. 2007. V. 26. № 3. P. 333.
 26. *Kalogiannakis G., Van Hemelrijck D., Van Assche G.* Measurements of Thermal Properties of Carbon/Epoxy and Glass/Epoxy Using Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry // *Journal of Composite Materials*. 2004. V. 38. № 2. P. 163.
 27. ASTM E1952-17. Standard Test Method for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity by Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry. Annual Book of ASTM Standards. USA, 2017. V. 14.01. 7 p.
 28. ГОСТ Р 57830-2017. Композиты. Определение теплопроводности и температуропроводности методом дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
 29. 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. USA, 2021. V. 04.06. 16 p.
 30. *Sun Y., Lyu B., Yan B., Jiang G., Ma P.* Preparation and Characterization of 3D Flexible High-distance Spacer Fabric/Foam Composite // *Composite Structures*. 2021. V. 261. P. 113549.
 31. *Walbrück K., Drewier L., Witzleben S., Stephan D.* Factors Influencing Thermal Conductivity and Compressive Strength of Natural Fiber-reinforced Geopolymer Foams // *Open Ceramics*. 2021. V. 5. P. 100065.
 32. *Kyaw Oo D'Amore G., Marino A., Kaspar J.* Numerical Modeling of Fire Resistance Test as a Tool to Design Lightweight Marine Fire Doors: A Preliminary Study // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. V. 8. № 7. P. 520.
 33. *Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt D.P.* Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2011. 1080 p.
 34. *Gomes M.G., Flores-Colen I., da Silva F., Pedroso M.* Thermal Conductivity Measurement of Thermal Insulating Mortars with EPS and Silica Aerogel by Steady-state and Transient Methods // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 172. P. 696.
 35. *Salmon D.R., Tye R.P.* An Inter-comparison of a Steady-state and Transient Methods for Measuring the Thermal Conductivity of Thin Specimens of Masonry Materials // *Journal of Building Physics*. 2011. V. 34. № 3. P. 247.
 36. *Хамидуллин О.Л., Низамиев Р.Р., Балькаев Д.А., Амирова Л.М.* Определение теплопроводности полимеров методом дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией // *Тепловые процессы в технике*. 2022. Т. 14. № 4. С. 186.
 37. *Popov I.A., Konstantinov D.Yu., Zhukova Yu.V., Chorny A.D.* Thermal Conductivity and Specific Heat of Carbon-plastic Polymer Composite Materials // *High Temperature Material Processes*. 2022. V. 26. № 4. P. 25.
 38. *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.