Научная статья

УДК 678.8
DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-165-179

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИИМИДНОГО УГЛЕПЛАСТИКА

Н.В. Антюфеева[1], И.В. Зеленина[1], А.В. Начаркина[1], А.В. Косякова[1], А.В. Ефремова[1], П.С. Мараховский[1]

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

Аннотация. *Исследовано влияние дополнительной термообработки при температурах 300, 320 и 350 °С на свойства полиимидного углепластика. Показано, что повышение температуры постотверждения приводит к увеличению температуры стеклования с 336 до 358 °С. При испытаниях в комнатных условиях и при термообработке прочность материала при изгибе и межслойном сдвиге снижается. Кроме того, термообработка влияет на теплофизические свойства углепластика – температурный коэффициент линейного расширения, тепло- и температуропроводность, удельную теплоемкость.*

Ключевые слова: *углепластик, термообработка, полиимидное связующее, высокотемпературные композиционные материалы, прочностные характеристики, теплофизические свойства*

Для цитирования: Антюфеева Н.В., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Косякова А.В., Ефремова А.В., Мараховский П.С. Влияние термообработки на прочностные и теплофизические характеристики полиимидного углепластика // Труды ВИАМ. 2026. № 11 (165). С. 165–179. URL: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-165-179.

Scientific article

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRENGTH AND THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF POLYIMIDE CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC

N.V. Antyufeeva[1], I.V. Zelenina[1], A.V. Nacharkina[1], A.V. Kosyakova[1], A.V. Efremova[1], P.S. Marakhovsky[1]

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

Abstract. *In the study was investigated the effect of additional heat treatment at temperatures of 300, 320, and 350 °C on the properties of polyimide-based carbon fiber reinforced plastic. It was shown that increasing the post-curing temperature raises the glass transition temperature from 336 to 358 °C. When tested under room temperature conditions and after heat treatment, the flexural strength and interlaminar shear strength of the material decreased. Furthermore, the heat treatment influenced the thermophysical properties: coefficient of linear thermal expansion, thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity.*

Keywords: *carbon fiber reinforced plastic, heat treatment, polyimide binder, high-temperature composite materials, strength characteristics, thermophysical properties*

For citation: Antyufeeva N.V., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Kosyakova A.V., Efremova A.V., Marakhovsky P.S. Effect of heat treatment on the strength and thermophysical characteristics of polyimide carbon fiber reinforced plastic. *Trudy VIAM*, 2026, no. 11 (165), pp. 165–179. Available at: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-165-179.

Введение

Создание конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с заданным ресурсом – сложная инженерная задача. Ее сложность объясняется комплексным влиянием множества факторов на прочностные свойства конечного изделия. Одним из решающих условий обеспечения качества материала являются выбор и отработка технологии изготовления ПКМ. Выбор метода переработки (автоклавный, прессовой, инфузионный и др.) определяется условиями применения материала, например функциональным назначением детали и ожидаемыми механическими нагрузками при эксплуатации, а также габаритными размерами изделия [1].

Независимо от выбранной технологии на этапе отработки режимов производства особое внимание уделяется параметрам процесса отверждения. Они должны обеспечивать максимальную монолитность структуры, т. е. отсутствие дефектов и низкую пористость материала. Эти условия напрямую определяют, насколько полно будут реализованы прочностные характеристики ПКМ и как долго они сохранятся при эксплуатации. При определении оптимальных параметров отверждения проводится подбор давления и температурно-временно́го режима изготовления материала. Зачастую после реализации основного режима дополнительно проводится термообработка заготовки, которая призвана обеспечить увеличение степени сшивки в полимерной матрице и, как следствие, улучшение механических свойств, а самое главное – повышение термостойкости. Для ПКМ на основе термостойких матриц, предназначенных для применения при повышенных температурах, данный показатель является особо важным, так как определяет уровень сохранения характеристик после воздействия повышенных температур, а значит, эксплуатационный ресурс материала и изделия из него [2–4].

Параметры отверждения также могут существенно влиять на теплофизические характеристики материала. Так, во время термообработки при оптимальной температуре происходит полноценное отверждение, которое зачастую улучшает основные теплофизические свойства за счет формирования более жесткой сетчатой структуры матрицы. В первую очередь повышаются температура стеклования, теплоемкость, тепло- и температуропроводность ПКМ. Снижается анизотропия температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), что способствует уменьшению внутренних напряжений при воздействии повышенных температур [5, 6].

В композиционных материалах эта анизотропия усугубляется наличием высокоориентированных углеродных волокон. При этом анизотропия ТКЛР может приводить к возникновению значительных внутренних напряжений при нагреве, а различие теплопроводности вдоль и поперек армирования – к неравномерному тепловому полю в толстостенных конструкциях [7].

Различие ТКЛР по разным направлениям может быть существенным и подтверждает необходимость учета анизотропии при проектировании высокотемпературных углепластиковых конструкций.

В работе [8] проанализированы научно-технические данные об особенностях изготовления углепластиков на основе термореактивных полиимидных связующих, представлены и сравнены технологические параметры отверждения. Несмотря на различия технологий, прослеживается ряд неизменных требований: необходимость вакуума (при автоклавном формовании), высокая конечная температура (≥300 °С), постоянное давление от 1,0 до 3,0 МПа до конца формования и длительный цикл с последующим

постотверждением. Из-за разнообразия составов для каждого связующего требуются свои индивидуальные режимы формования, хотя общие принципы процесса отверждения полиимидов сохраняются.

В работах [9–11] отмечено, что полиимидные композиты не только обладают высокой термостойкостью, но и перспективны для создания материалов с высокой теплопроводностью. Формирование более плотной сшитой структуры в процессе постотверждения улучшает фононный перенос на границе раздела «волокно–матрица», что положительно сказывается на эффективной теплопроводности композита. Как показано в работе [12], повышение плотности сшивки полиимидной матрицы дополнительно способствует уменьшению дефектности межфазной границы и повышению модуля упругости полимера. В результате теплопроводность композита в направлении армирования может возрастать на 10–15 % при повышении температуры постотверждения с 300 до 350 °С. Кроме того, авторы работ [13–15] отмечают, что температуропроводность полиимидных углепластиков также увеличивается с повышением температуры термообработки, что способствует более быстрому выравниванию температуры по сечению детали и снижению риска возникновения термических градиентов.

Если теплопроводность характеризует перенос тепла, то удельная теплоемкость – его накопление. Удельная теплоемкость полимерных композитов определяется теплоемкостью как волокон, так и матрицы. В процессе постотверждения подвижность цепей полиимида снижается, а температурная зависимость теплоемкости становится более стабильной вплоть до температур, близких к температуре стеклования T_g. Согласно данным работ [16, 17], удельная теплоемкость полностью отвержденного полиимида в диапазоне температур 100–300 °С возрастает практически линейно, причем степень сшивки влияет на наклон этой зависимости. Таким образом, комплекс теплофизических свойств полиимидных углепластиков в значительной степени определяется режимами отверждения и постотверждения [18]. В этой связи особое значение приобретает анализ существующих технологических подходов к получению подобных материалов [19, 20].

В данной статье представлены результаты исследований по оценке влияния на механические и теплофизические свойства углепластика марки ВКУ-61/ВТкУ-5 на основе полиимидного связующего ВКУ-61 в зависимости от проведения дополнительной термообработки (постотверждения) при различных температурах.

Материалы и методы

Влияние термообработки на прочностные и теплофизические характеристики оценивали на специально подготовленных образцах полиимидного углепластика марки ВКУ-61/ВТкУ-5. Плиты углепластика, сформированные из равнопрочной углеродной ткани и полиимидного связующего, получали автоклавным методом по ступенчатому режиму: удельное давление 1,4 МПа, конечная температура 300 °С с выдержкой 2 ч. Из этих плит вырезали образцы, которые затем подвергали дополнительной термообработке при трех температурах: 300, 320 и 350 °С.

В табл. 1 приведены физические свойства исследованных образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5.

Таблица 1

Физические свойства углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5

Характеристика	Значения характеристик для образцов			
	без дополнительной термообработки	после термообработки при температуре, °С		
		300	320	350
Содержание связующего, % (по массе)	34–37	35–36	34–35	34–35
Плотность, кг/м^3	1552–1555	1552–1555	1555–1560	1556–1561
Толщина монослоя, мм	0,193–0,198	0,194–0,197	0,192–0,196	0,192–0,196

Образцы углепластиков до и после дополнительной термообработки при различных температурах испытывали на статический изгиб (ГОСТ Р 56805–2015) и межслойный сдвиг (ГОСТ 32659–2014).

Температуру стеклования T_g определяли согласно ГОСТ Р 57739–2017. Для испытаний использовали оснастку для трехточечного изгиба с расстоянием между опорами 40 мм и шириной нагружающего индентора 12 мм. Эксперименты проводили в интервале температур 25–430 °С при скорости нагрева 5 К/мин, частоте нагружения 1 Гц, амплитуде деформации 10 мкм в атмосфере аргона (расход газа 50 мл/мин). Температуру стеклования определяли как точку пересечения двух касательных к кривой температурной зависимости модуля упругости: первую касательную проводили через точку в области до перехода, вторую – через точку перегиба.

Измерение среднего ТКЛР выполнены в интервале температур от –60 до +350 °С в соответствии с ГОСТ 32618.2–2014. Режим испытаний: скорость нагрева 5 К/мин, атмосфера гелия (расход газа 70 мл/мин), нагрузка на образец 3 сН.

Тепло- и температуропроводность определяли по ГОСТ Р 57943–2017. Измерения теплопроводности проводили в диапазоне от –60 до +300 °С в атмосфере аргона (расход газа 70 мл/мин). Нагрев образцов осуществляли в печи, рассчитанной на рабочий интервал от –125 до +500 °С. Использовали детектор типа МСТ (HgCdTe) при длине волны лазера 1064 нм и длительности импульса 0,3 мс.

Определение удельной теплоемкости образцов после термообработки при различной температуре проводили согласно ГОСТ Р 56754–2015 в диапазоне температур от –60 до +300 °С со скоростью нагрева 20 К/мин в атмосфере аргона (расход газа 50 мл/мин).

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

Результаты и обсуждение

Температура стеклования и механические характеристики

Результаты определения температуры стеклования образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Температура стеклования T_g углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5

Характеристика	Значения характеристик для образцов			
	без дополнительной термообработки	после термообработки при температуре, °С		
		300	320	350
Экстраполированное (среднее) значение начала перехода на кривой модуля упругости E'–T_g, °С	336	345	351	358
Стандартное отклонение	1,25	2,87	1,70	1,25
Минимальное/максимальное значение, °С	334/337	342/349	349/353	357/360

С повышением температуры дополнительной термообработки возрастает температура стеклования. Наибольший эффект выявлен при сравнении температуры стеклования (по средним значениям) образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 без дополнительной термообработки (336 °С) и с термообработкой (345–358 °С).

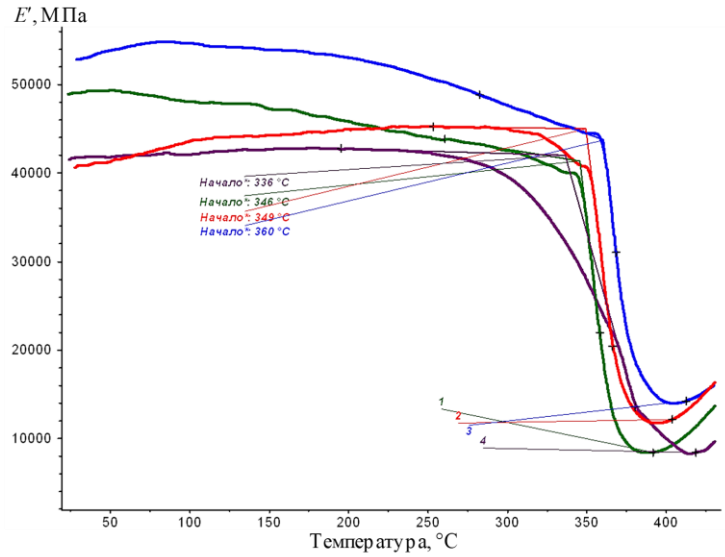


Рис. 1. Температура стеклования (модуль упругости *E'*) образцов углепластика марки ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при температуре 300 (*1*), 320 (*2*), 350 °С (*3*) и без дополнительной термообработки (*4*)

Увеличение температуры стеклования в зависимости от температуры термообработки характерно для многих типов связующих, например бисмалеинимидных [9, 10]. На рис. 2 наглядно показано, что с увеличением температуры дополнительной термообработки возрастает температура стеклования, однако при этом наблюдается снижение прочностных свойств углепластиков [10].

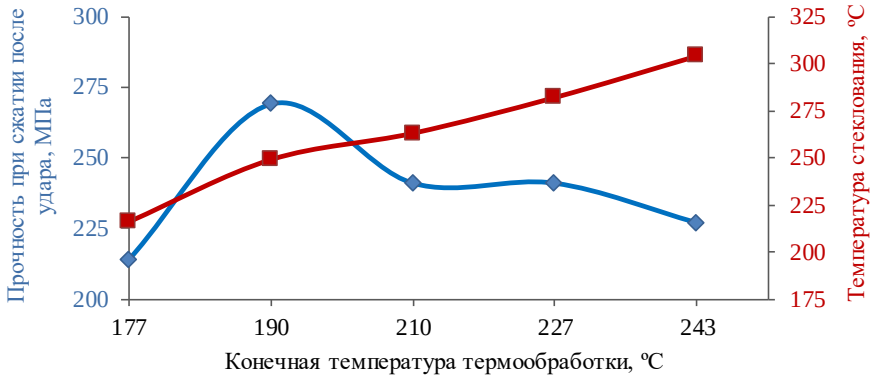


Рис. 2. Изменение свойств углепластика CYCOM®5250-4/IM7 в зависимости от конечной температуры термообработки [10]

Изменение температуры стеклования в зависимости от температуры и продолжительности дополнительной термообработки характерно и для полиимидных углепластиков [7, 12]. Результаты, приведенные в работах [15, 16], подтверждают, что возможно получить полиимидные композиты с исключительно высокой температурой стеклования в диапазоне от 350 до 460 °С как за счет оптимально подобранных технологических параметров формования материала, так и за счет последующей термообработки при правильно подобранной температуре.

В табл. 3 приведены результаты определения упруго-прочностных свойств углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 с различной температурой термообработки.

Таблица 3

Упруго-прочностные свойства* углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 до и после термообработки при различной температуре

Характеристика	Температура испытаний, °С	Значения характеристик, МПа, для образцов			
		без дополнительной термообработки	после термообработки при температуре, °С		
			300	320	350
Прочность при статическом изгибе (ГОСТ Р 56805–2015)	23±3	1280–1320 1300 (16,3)	1190–1260 1210 (35,6)	1030–1090 1050 (28,3)	890–980 940 (37,4)
	280	490–570 540 (35,6)	680–730 700 (21,6)	790–860 840 (35,6)	810–900 860 (37,4)
	300	–	600–650 620 (21,6)	760–820 800 (28,3)	780–850 830 (35,6)
Модуль упругости при статическом изгибе (ГОСТ Р 56805–2015)	23±3	73–75 74 (0,82)	70–76 73 (2,45)	66–77 71 (4,55)	64–66 65 (0,82)
	280	48–54 52 (2,62)	66–70 67 (2,16)	64–68 66 (1,63)	58–64 62 (2,94)
	300	–	62–67 65 (2,16)	64–69 65 (2,94)	58–65 62 (2,83)
Прочность при межслойном сдвиге (ГОСТ 32659–2014)	23±3	81–87 84 (2,45)	71–78 75 (2,94)	59–68 64 (3,74)	46–55 52 (4,24)
	280	29–35 32 (2,45)	44–49 47 (2,16)	41–47 45 (2,83)	44–49 47 (2,16)
	300	–	33–37 35 (1,63)	36–41 39 (2,16)	43–49 46 (1,83)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

На рис. 3 представлены сравнительные данные по сохранению прочности при различных температурах испытаний на статический изгиб (рис. 3, *а*) и межслойный сдвиг (рис. 3, *б*) в зависимости от дополнительной термообработки.

Анализ результатов определения упруго-прочностных свойств углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различных режимах (табл. 3, рис. 3) выявил следующую закономерность: дополнительная термообработка приводит к снижению прочности как при изгибе, так и при межслойном сдвиге, причем оно тем значительнее, чем выше температура обработки.

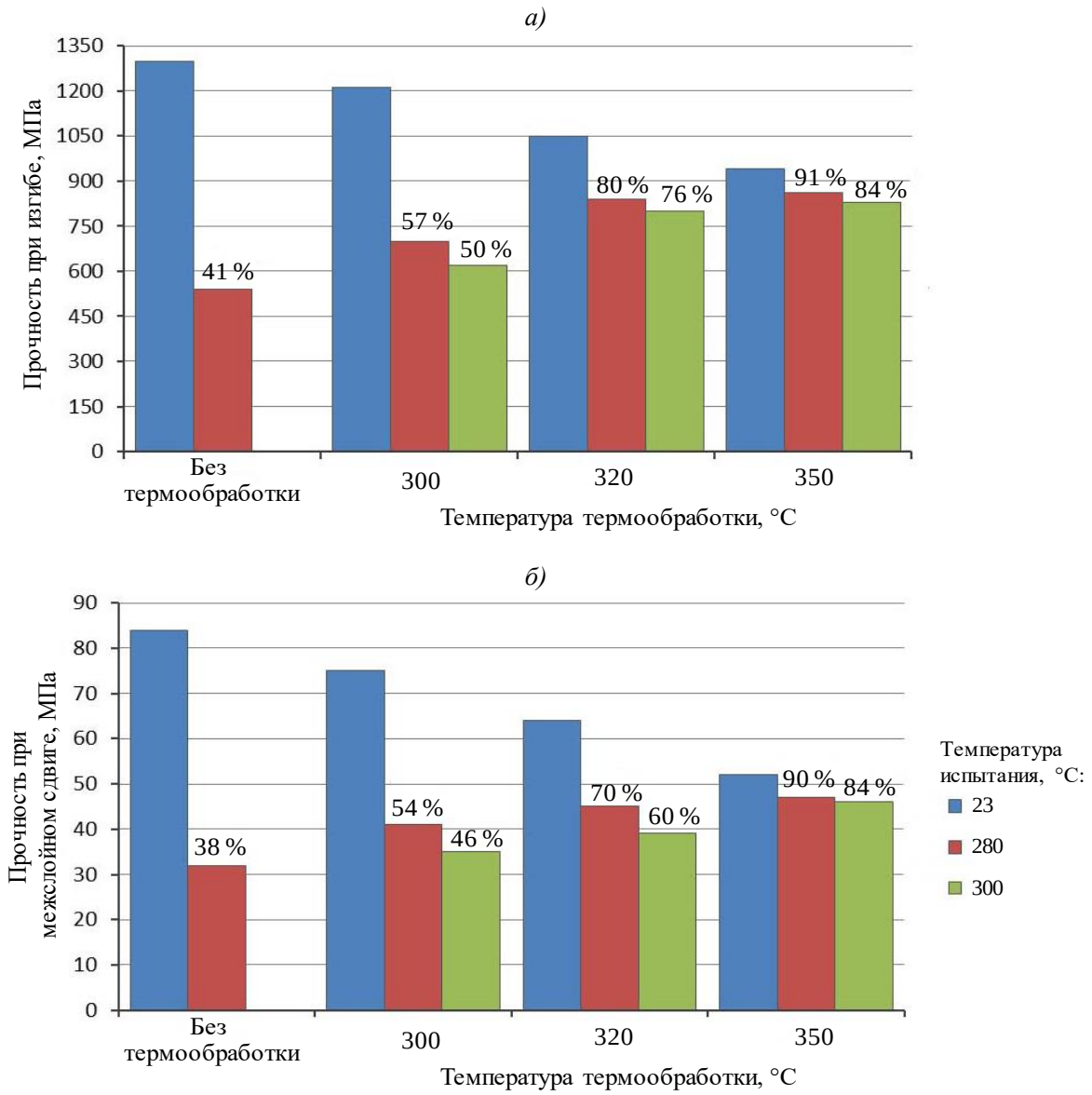


Рис. 3. Уровень сохранения (%) прочности при статическом изгибе (*а*) и межслойном сдвиге (*б*) углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 в зависимости от дополнительной термообработки при различных температурах испытаний

Так, при температуре испытаний 23±3 °С прочность при изгибе снижается на 7 % после обработки при 300 °С, на 19 % – при 320 °С и на 27 % – при 350 °С. При этом наблюдается существенное увеличение уровня сохранения прочности при повышенных температурах. При испытаниях на изгиб при 280 °С уровень сохранения прочности исходного материала (без дополнительной обработки) составляет лишь 41 %, тогда как с повышением температуры термообработки до 300, 320 и 350 °С этот показатель увеличивается до 57, 80 и 91 % соответственно.

Аналогичная тенденция отмечена и при испытаниях на межслойный сдвиг. Прочность при сдвиге при 23±3 °С уменьшается на 10 % после обработки при 300 °С, на 23 % – при 320 °С и на 38 % – при 350 °С. В то же время устойчивость материала к повышенным температурам заметно возрастает. При испытаниях при 280 °С уровень сохранения прочности углепластика без дополнительной обработки составил 38 %, а после обработки при 300, 320 и 350 °С повысился до 54, 70 и 90 % соответственно.

Влияние температуры термообработки на уровень сохранения прочности выявлено также при испытаниях на статический изгиб и межслойный сдвиг при 300 °С. В этом случае уровень сохранения прочности увеличивается с 46 % (после обработки при 300 °С) до 84 % (после обработки при 350 °С).

Снижение прочности и увеличение термостойкости полиимидного углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 происходят вследствие доотверждения полиимидной матрицы, в результате чего повышается плотность сшивки в композите [2, 7, 12], что приводит к возрастанию жесткости полимерной матрицы и температуры стеклования.

Таким образом, результаты исследования температуры стеклования и механических характеристик подтверждают важность и необходимость проведения дополнительной термообработки, в первую очередь для обеспечения тепло- и термостойкости полиимидного углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5, предназначенного для эксплуатации в условиях повышенных температур.

Дальнейшие исследования по оценке влияния температуры термообработки на теплофизические характеристики проведены для образцов с термообработкой при различных температурах (300, 320 и 350 °С).

Температурный коэффициент линейного расширения

Значения среднего ТКЛР для диапазона от 20 °С до верхней температуры T_i представлены в табл. 4–6 и на рис. 4.

Таблица 4

Температурный коэффициент линейного расширения* (ТКЛР) образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре (направление *x*)

Температура T_i, °С	Среднее арифметическое значение ТКЛР: $\bar{\alpha}_{ср} \cdot 10^6$, $К^{-1}$, для образцов после термообработки при температуре, °С		
	300	320	350
–60	2,10–2,49 2,26 (0,16)	1,00–2,59 1,84 (0,53)	1,56–2,30 1,89 (0,30)
0	1,81–2,57 2,17 (0,3)	0,74–2,06 1,46 (0,48)	1,49–2,29 1,81 (0,34)
50	2,00–2,84 2,36 (0,35)	1,13–1,94 1,54 (0,33)	1,66–2,41 1,99 (0,31)
100	1,90–2,92 2,36 (0,42)	1,35–2,88 1,98 (0,57)	1,79–2,64 2,18 (0,35)
200	1,89–3,43 2,70 (0,63)	1,52–3,20 2,24 (0,63)	2,21–2,85 2,46 (0,28)
300	1,32–3,41 2,45 (0,86)	1,66–3,82 2,46 (0,76)	2,24–3,02 2,50 (0,37)
350	0,67–3,13 1,97 (1,01)	1,58–4,14 2,51 (0,87)	2,32–2,94 2,54 (0,28)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

Таблица 5

Температурный коэффициент линейного расширения* (ТКЛР) образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре (направление *y*)

Температура T_i, °С	Среднее арифметическое значение ТКЛР: $\overline{\alpha}_{ср}\cdot10^6$, $К^{-1}$, для образцов после термообработки при температуре, °С		
	300	320	350
–60	1,44–4,59 2,85 (1,3)	2,09–2,51 2,34 (0,18)	1,35–2,46 1,96 (0,46)
0	0,19–4,34 2,22 (1,86)	1,72–2,37 2,05 (0,25)	1,93–2,79 2,23 (0,40)
50	2,44–4,20 3,11 (0,78)	1,23–2,49 2,01 (0,42)	1,27–2,08 1,69 (0,33)
100	2,47–4,79 3,30 (1,06)	1,61–2,86 2,35 (0,43)	1,22–2,13 1,77 (0,39)
200	2,97–5,70 3,91 (1,27)	2,12–3,58 2,77 (0,50)	1,49–2,45 2,09 (0,43)
300	2,81–5,95 3,91 (1,44)	2,20–4,08 3,00 (0,65)	1,38–2,50 2,12 (0,52)
350	2,67–5,68 3,68 (1,40)	1,94–4,19 2,97 (0,77)	1,29–2,65 2,19 (0,63)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

Таблица 6

Температурный коэффициент линейного расширения* (ТКЛР) образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре (направление *z*)

Температура T_i, °С	Среднее арифметическое значение ТКЛР: $\overline{\alpha}_{ср}\cdot10^6$, $К^{-1}$, для образцов после термообработки при температуре, °С		
	300	320	350
–60	38,9–41,8 40,5 (1,22)	40,0–40,7 40,3 (0,25)	38,1–40,0 39,1 (0,81)
0	38,7–43,6 41,9 (2,24)	41,9–43,6 43,0 (0,63)	40,8–43,1 42,0 (0,96)
50	45,9–47,8 47,1 (0,90)	46,0–47,2 46,6 (0,49)	43,6–46,0 44,6 (1,00)
100	53,1–53,7 53,4 (0,26)	51,8–52,9 52,3 (0,48)	52,3–54,1 53,0 (0,76)
200	56,6–56,8 56,7 (0,06)	53,4–55,3 54,3 (0,71)	55,2–56,8 56,2 (0,70)
300	72,7–77,4 75,6 (2,10)	59,5–63,7 61,4 (1,43)	56,6–58,6 57,9 (0,90)
350	89,8–106,0 101,0 (7,65)	76,1–84,0 79,7 (2,98)	65,7–69,7 67,8 (1,63)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

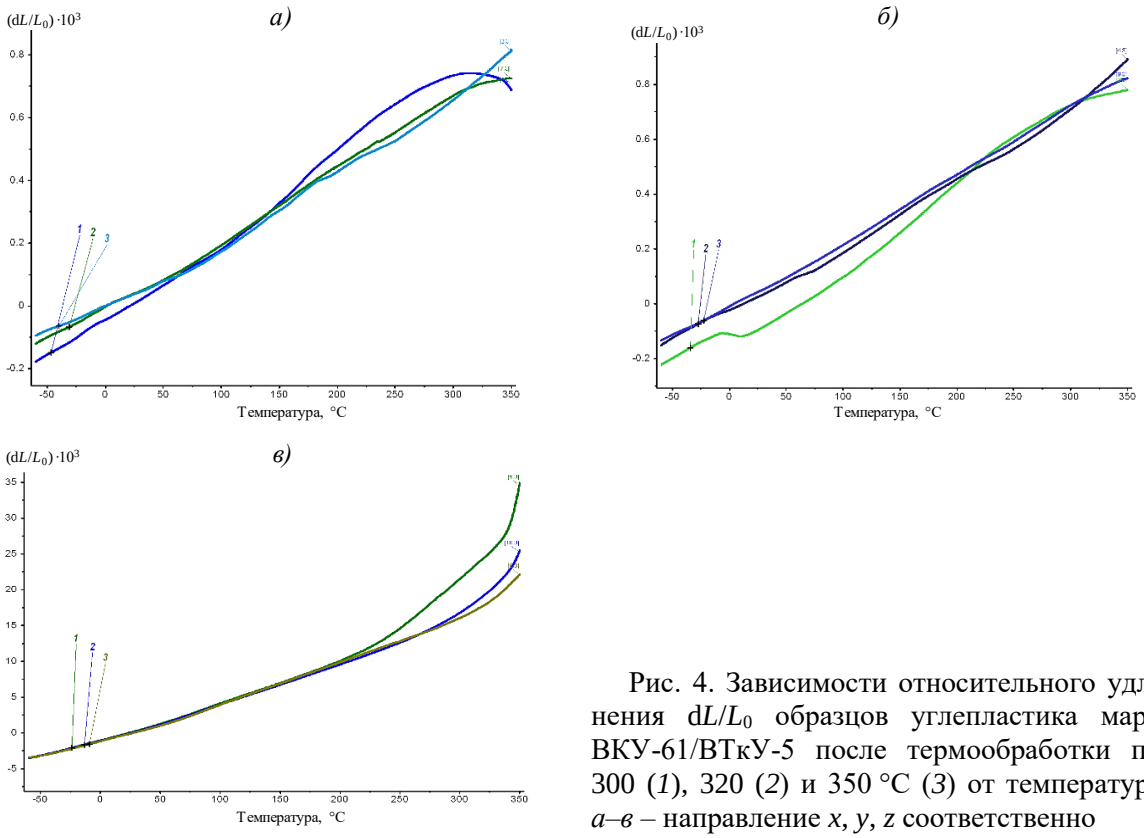


Рис. 4. Зависимости относительного удлинения dL/L_0 образцов углепластика марки ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при 300 (*1*), 320 (*2*) и 350 °C (*3*) от температуры: *а–в* – направление *x*, *y*, *z* соответственно

Тепло- и температуропроводность

В табл. 7–9 приведены результаты измерений тепло- и температуропроводности образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре.

Таблица 7

Тепло- и температуропроводность* образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре (направление *x*)

Температура, °C	Теплопроводность λ, Вт/(м·К)			Температуропроводность $a\cdot10^6$, м²/с		
	для образцов после термообработки при температуре, °C					
	300	320	350	300	320	350
–60	2,5–2,8 2,60 (0,14)	2,5–2,8 2,60 (0,10)	2,7–3,1 2,87 (0,17)	2,5–2,9 2,67 (0,17)	2,6–3,0 2,78 (0,12)	2,8–3,2 2,97 (0,17)
–20	3,1–3,2 3,13 (0,05)	2,7–3,2 2,97 (0,19)	3,2–3,5 3,37 (0,12)	2,6–2,8 2,70 (0,08)	2,5–2,9 2,70 (0,16)	2,7–2,9 2,83 (0,09)
20	3,5–3,7 3,60 (0,08)	3,0–3,6 3,43 (0,21)	3,7–3,8 3,77 (0,05)	2,6–2,7 2,67 (0,05)	2,3–2,8 2,65 (0,17)	2,7 2,70 (0)
100	4,2–4,4 4,27 (0,09)	4,4–4,5 4,47 (0,05)	4,5–4,7 4,60 (0,08)	2,5–2,6 2,53 (0,05)	2,5–2,7 2,60 (0,08)	2,5–2,6 2,57 (0,05)
200	4,9–5,1 4,97 (0,09)	4,9–5,2 5,05 (0,10)	5,1–5,2 5,17 (0,05)	2,3–2,4 2,33 (0,05)	2,4–2,5 2,43 (0,05)	2,4 2,40 (0)
300	5,2–5,4 5,33 (0,09)	4,6–5,5 5,12 (0,36)	5,6–5,8 5,73 (0,09)	2,1–2,2 2,17 (0,05)	2,0–2,2 2,21 (0,11)	2,3 2,30 (0)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

Таблица 8

Тепло- и температуропроводность* образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре (направление *y*)

Температура, °С	Теплопроводность λ, Вт/(м·К)			Температуропроводность $a \cdot 10^6$, м^2/с		
	для образцов после термообработки при температуре, °С					
	300	320	350	300	320	350
–60	2,5–2,7 2,63 (0,09)	2,2–2,6 2,38 (0,13)	2,4–2,8 2,60 (0,16)	2,5–2,7 2,63 (0,09)	2,4–2,8 2,60 (0,15)	2,4–2,8 2,63 (0,17)
–20	2,9–3,0 2,97 (0,05)	2,7–3,1 2,92 (0,12)	3,0–3,2 3,13 (0,09)	2,5–2,6 2,53 (0,05)	2,5–2,8 2,67 (0,11)	2,6–2,7 2,67 (0,05)
20	3,3–3,4 3,37 (0,05)	3,3–3,5 3,45 (0,08)	3,4–3,6 3,50 (0,08)	2,4–2,5 2,47 (0,05)	2,5–2,7 2,67 (0,07)	2,5–2,6 2,53 (0,05)
100	4,1 4,10 (0)	4,1–4,3 4,23 (0,07)	4,4–4,5 4,43 (0,05)	2,4 2,40 (0)	2,4–2,5 2,45 (0,05)	2,4–2,5 2,43 (0,05)
200	4,6–4,8 4,73 (0,09)	4,3–4,9 4,62 (0,19)	4,9–5,0 4,93 (0,05)	2,2–2,3 2,27 (0,05)	2,1–2,2 2,23 (0,07)	2,3 2,30 (0)
300	5,1–5,2 5,13 (0,05)	4,5–5,4 4,93 (0,34)	5,3–5,6 5,43 (0,12)	2,1 2,10 (0)	2,0–2,2 2,13 (0,07)	2,1–2,2 2,17 (0,05)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

Таблица 9

Тепло- и температуропроводность* образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре (направление *z*)

Температура, °С	Теплопроводность λ, Вт/(м·К)			Температуропроводность $a \cdot 10^6$, м^2/с		
	для образцов после термообработки при температуре, °С					
	300	320	350	300	320	350
–60	0,3–0,6 0,43 (0,12)	0,42–0,48 0,46 (0,02)	0,3–0,6 0,43 (0,12)	0,3–0,6 0,47 (0,12)	0,46–0,53 0,49 (0,02)	0,4–0,6 0,47 (0,09)
–20	0,4–0,6 0,50 (0,08)	0,44–0,61 0,53 (0,06)	0,4–0,5 0,47 (0,05)	0,4–0,5 0,43 (0,05)	0,41–0,55 0,49 (0,05)	0,3–0,4 0,37 (0,05)
20	0,5–0,6 0,57 (0,05)	0,45–0,63 0,53 (0,06)	0,5–0,6 0,53 (0,05)	0,4–0,5 0,47 (0,05)	0,35–0,49 0,41 (0,05)	0,4–0,5 0,43 (0,05)
100	0,6–0,7 0,67 (0,05)	0,73–0,79 0,76 (0,02)	0,6–0,7 0,67 (0,05)	0,4 0,40 (0)	0,42–0,46 0,44 (0,01)	0,3–0,4 0,37 (0,05)
200	0,6–0,9 0,73 (0,12)	0,66–1,05 0,81 (0,12)	0,7–0,8 0,73 (0,05)	0,3–0,4 0,33 (0,05)	0,31–0,50 0,39 (0,06)	0,3–0,4 0,33 (0,05)
300	0,8 0,80 (0)	0,69–0,92 0,80 (0,08)	0,5–0,8 0,67 (0,12)	0,3 0,30 (0)	0,30–0,38 0,34 (0,03)	0,2–0,3 0,27 (0,05)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

Удельная теплоемкость

Результаты измерения удельной теплоемкости приведены в табл. 10.

Таблица 10

Удельная теплоемкость* образцов углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 после термообработки при различной температуре

Температура, °С	Удельная теплоемкость c_p, Дж/(кг·К), для образцов после термообработки при температуре, °С		
	300	320	350
–60	632–648 640 (6,53)	610–635 617 (5,39)	650–660 653 (4,50)
–20	754–768 763 (6,38)	715–734 724 (6,43)	783–795 788 (4,92)
20	879–890 886 (5,19)	850–870 860 (7,08)	913–937 924 (9,90)
100	1115–1129 1124 (6,38)	1140–1158 1151 (6,18)	1179–1205 1191 (10,6)
200	1376–1394 1386 (7,59)	1390–1412 1402 (8,26)	1407–1422 1413 (6,34)
300	1600–1609 1605 (4,03)	1481–1499 1490 (6,88)	1648–1656 1652 (3,30)

* В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – стандартное отклонение.

Заключения

Показано, что увеличение температуры термообработки полиимидного углепластика ВКУ-61/ВТкУ-5 до 350 °С существенно влияет на теплофизические характеристики. Так, во время термообработки при оптимальной температуре происходит полноценное отверждение материала, которое улучшает основные теплофизические свойства за счет формирования более жесткой сетчатой структуры матрицы. Увеличение плотности сшивки в композите приводит к снижению исходной прочности и значительному повышению уровня сохранения прочности при повышенной температуре испытаний, т. е. термостойкости.

При увеличении температуры термообработки в первую очередь повышается температура стеклования полиимидного углепластика, а также его удельная теплоемкость, тепло- и температуропроводность. Снижается анизотропия ТКЛР, что способствует уменьшению внутренних напряжений при воздействии повышенных температур.

Список источников

1. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 528 с.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.

3. Xiaochen L., Bo C.J., Thomas K.T., Steven N. Thermo-oxidative aging and thermal cycling of PETI-340M composites // High Performance Polymers. 2022. Vol. 34. P. 33–43.
4. Bain S., Ozawa S., Jim M., Criss Jr. Development of a Cure/Postcure Cycle for PETI-330 Laminates Fabricated by Resin Transfer Molding // High Performance Polymers. 2006. URL: https://www.academia.edu/5559484/Development of a Cure Postcure Cycle for PETI-330 Laminates Fabricated by Resin Transfer Molding (дата обращения: 10.04.2026).
5. Fernberg P., Gong G., Mannberg P., Tsampas S. Development of novel high T_g polyimide-based composites. Part I: RTM processing properties // Journal of Composite Materials. 2018. Vol. 52. No. 2. P. 253–260.
6. Gao S.Z., Huang Z.Q., Wang X.L. et al. Research on Properties of 450 °C Resistant Polyimide Composites // Journal of Physics: Conference Series (ISALT 2022). 2023. Vol. 2460. No. 012091. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/2460/1/012091.
7. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
8. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
9. Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Ахмадиева К.Р. Технологические особенности получения высокотемпературных полиимидных углепластиков. Зарубежный опыт (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). С. 80–95. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-80-95.
10. CYCOM®5250 Bismaleimide Resin. Technical Data Sheet // Cytec engineered materials. 2017. URL: https://www.solvay.com/en/product/cycom-5250-4 (дата обращения: 03.04.2026).
11. Начаркина А.В., Валуева М.И., Зеленина И.В., Шошева А.Л. Высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 4 (77). С. 43–61. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
12. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
13. Стрельников В.Н., Иванова Е.В., Лебедева Е.А., Трухинов Д.К., Астафьева С.А. Разработка и исследование свойств композиционных материалов на основе термоэластопластов с функциональными наполнителями // Авиационные материалы и технологии. 2026. № 1 (82). С. 195–208. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 28.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-195-208.
14. Гуляев И.Н., Клименко О.Н., Лонский С.Л., Славин А.В., Черфас Л.В. Определение состава и структуры полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 4 (81). С. 32–47. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 14.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
15. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Khaskov M.A. High-Temperature Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on a Thermoreactive Polyimide Binder // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Vol. 12. No. 6. P. 1581–1589.
16. Adamczak A.D. High temperature materials for aerospace applications. Texas A&M University, 2011. 139 p.
17. Choy C.L., Luk W.H., Chen F.C. Thermal conductivity of highly oriented polyethylene // Polymer. 1978. Vol. 19. P. 155–162.
18. Fei H., Dai W., Yu J. et al. Thermal diffusivity and thermal conductivity of polyimide composites // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136. No. 15. P. 47336.
19. Pielichowska K. Polyimide-based composites for high-temperature applications // Progress in Materials Science. 2014. Vol. 67. P. 173–232.
20. Xiong X., Yang S.Y., Ji M. et al. Thermal expansion behavior of polyimide composites // Polymer Composites. 2018. Vol. 39. No. S3. P. E1688–E1695.

References

1. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting Binders for Polymer Composite Materials*: Textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, 528 p.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatics influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Xiaochen L., Bo C.J., Thomas K.T., Steven N. Thermo-oxidative aging and thermal cycling of PETI-340M composites. *High Performance Polymers*, 2022, vol. 34, pp. 33–43.
4. Bain S., Ozawa S., Jim M., Criss Jr. Development of a Cure/Postcure Cycle for PETI-330 Laminates Fabricated by Resin Transfer Molding. *High Performance Polymers*, 2006. Available at: https://www.academia.edu/5559484/Development of a Cure Postcure Cycle for PETI-330 Laminates Fabricated by Resin Transfer Molding (accessed: April 10, 2026).
5. Fernberg P., Gong G., Mannberg P., Tsampas S. Development of novel high T_g polyimide-based composites. Part I: RTM processing properties. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 253–260.
6. Gao S.Z., Huang Z.Q., Wang X.L. et al. Research on Properties of 450 °C Resistant Polyimide Composites. *Journal of Physics*: Conference Series (ISALT 2022), 2023, vol. 2460, no. 012091, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/2460/1/012091.
7. Mikhailin Yu.A. *Heat-Resistant Polymers and Polymeric Materials*. St. Petersburg: Professiya, 2006, 624 p.
8. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Polymer Composite Materials: Structure, Properties, Technology*: Textbook. Ed. A.A. Berlin. St. Petersburg: Professiya, 2008, 560 p.
9. Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Ahmadieva K.R. Technological features of obtaining high temperature polyimide carbons. Foreign experience (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), pp. 80–95. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-80-95.
10. CYCOM®5250 Bismaleimide Resin. Technical Data Sheet. *Cytec engineered materials*. 2017. Available at: https://www.solvay.com/en/product/cycom-5250-4 (accessed: April 03, 2026).
11. Nacharkina A.V., Valueva M.I., Zelenina I.V., Shosheva A.L. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binders. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 43–61. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
12. Mikhailin Yu.A. *Heat, Thermal, and Fire Resistance of Polymer Materials*. St. Petersburg: Nauchnyye osnovy i tekhnologii, 2011, 416 p.
13. Strelnikov V.N., Ivanova E.V., Lebedeva E.A., Trukhinov D.K., Astafeva S.A. Development and research of the properties of thermoplastic elastomer composites with functional fillers. *Aviation materials and technologies*, 2026, no. 1 (82), pp. 195–208. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: April 28, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-195-208.
14. Gulyaev I.N., Klimenko O.N., Lonskii S.L., Slavin A.V., Cherfas L.V. Determination of the composition and structure of polymer composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 4 (81), pp. 32–47. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: April 14, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
15. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Khaskov M.A. High-Temperature Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on a Thermoreactive Polyimide Binder. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2021, vol. 12, no. 6, pp. 1581–1589.
16. Adamczak A.D. *High temperature materials for aerospace applications*. Texas A&M University, 2011, 139 p.
17. Choy C.L., Luk W.H., Chen F.C. Thermal conductivity of highly oriented polyethylene. *Polymer*, 1978, vol. 19, pp. 155–162.
18. Fei H., Dai W., Yu J. et al. Thermal diffusivity and thermal conductivity of polyimide composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 136, no. 15, p. 47336.

19. Pielichowska K. Polyimide-based composites for high-temperature applications. *Progress in Materials Science*, 2014, vol. 67, pp. 173–232.
20. Xiong X., Yang S.Y., Ji M. et al. Thermal expansion behavior of polyimide composites. *Polymer Composites*, 2018, vol. 39, no. S3, pp. E1688–E1695.

Информация об авторах

Антюфеева Наталия Викторовна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Зеленина Ирина Викторовна, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Начаркина Анастасия Витальевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Косякова Александра Васильевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Ефремова Анна Викторовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Мараховский Петр Сергеевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Natalia V. Antyufeeva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Irina V. Zelenina, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Anastasia V. Nacharkina, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Aleksandra V. Kosyakova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Anna V. Efremova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Petr S. Marakhovsky, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.07.2026.
The article was submitted 23.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 03.07.2026.