

УДК 678.747.2

Е.В. Николаев¹, С.Л. Барботько¹, Н.П. Андреева¹, М.Р. Павлов¹, Д.В.Гращенков¹

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЕГО ОСНОВЕ
Часть 3. Расчет энергии активации и теплового ресурса полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11

Проведена оценка сохраняемости прочностных характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) – углепластика и стеклопластика на основе эпоксидного связующего – в процессе теплового старения. Выполнен расчет энергии активации процесса теплового старения для ПКМ. Показано влияние циклического воздействия температуры на механические характеристики материалов. Определен уровень сохраняемости прочностных характеристик в течение периода длительной эксплуатации.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 18.3. «Моделирование и прогнозирование климатической стойкости» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, тепловое старение, эпоксидное связующее, углепластик, стеклопластик, энергия активации, тепловой ресурс.

Stability of strength characteristics of polymeric composite materials (carbon fiber and fiberglass based on epoxy binder) in the process of thermal aging has been evaluated. Calculation of energy of activation during the process of thermal aging for polymeric composite materials has been carried out. An influence of freeze-traw cycles on mechanical characteristics of materials is shown. The level of stability of strength characteristics for long-term operation has been determined.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 18.3. «Modeling and forecasting of climatic resistance» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: polymeric composite materials, thermal aging, epoxy binding, layered carbon, fiber, fiberglass, activation energy, heat resource.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В работах [1–6] отмечено увеличение применения доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационной промышленности вследствие повышения их рабочих характеристик. Отмечается, что в течение времени ПКМ могут изменять свои служебные характеристики. Преимущественно изменение свойств ПКМ происходит под воздействием климатических факторов, из которых основное влияние оказывает сорбция влаги [7–16]. Во время эксплуатации материалов в составе ряда конструкций, например, таких как мотогондола двигателя, на материалы воздействуют дополнительные эксплуатационные факторы – повышенная и пониженная температура и ее знакопеременное воздействие. Воздействие повышенной температуры (тепловое старение) способствует протеканию процессов термодеструкции в полимерных материалах [17].

В работе [18] приводятся результаты исследований взаимодействия сорбированной влаги и эпоксидной матрицы на основе связующего ВСЭ-1212. Представлены кинетические кривые сорбции влаги для эпоксидной матрицы и углепластика ВКУ-25 на ее основе. Описаны изменения механических характеристик углепластика ВКУ-25 вследствие сорбции влаги и протекающие при этом процессы структурирования в эпоксидной матрице. В работе [19] показано влияние повышенной температуры и влагосодержания на основные механические характеристики и протекание процессов структурирования в углепластике ВКУ-39 и стеклопластике ВПС-48/7781 на основе эпоксидной матрицы (связующее ВСЭ-1212). В качестве наиболее чувствительной к воздействию температуры характеристики была выбрана прочность при межслойном сдвиге, по кинетическим кривым изменения которой проведен расчет энергий активации процессов старения и сделан прогноз сохраняемости прочностных свойств.

Классическое описание термодинамики и кинетики процессов старения полимерных материалов и композитов на их основе проводится с использованием уравнения Аррениуса [20–23]:

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + \ln A, \quad (1)$$

где k – константа скорости процесса – безразмерная величина; E – энергия активации процесса, кДж/моль; A – постоянная – безразмерная величина; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,319 Дж/(моль·К); T – температура, К.

Если в материале протекают процессы старения родственного характера, но с различной скоростью, то уравнение Аррениуса можно представить в виде:

$$\ln k = -\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\theta} \right) + \ln B, \quad (2)$$

где θ – характеристическая постоянная с размерностью температуры, К; T – температура окружающей среды, К; B – постоянная.

Расчет энергии активации процесса теплового старения проводится по изменению характеристики наиболее чувствительной к изменению температуры. На рис. 1 представлена типовая схема графической обработки результатов при тепловом старении по изменению характеристики материала при различных температурах и продолжительности ее воздействия.

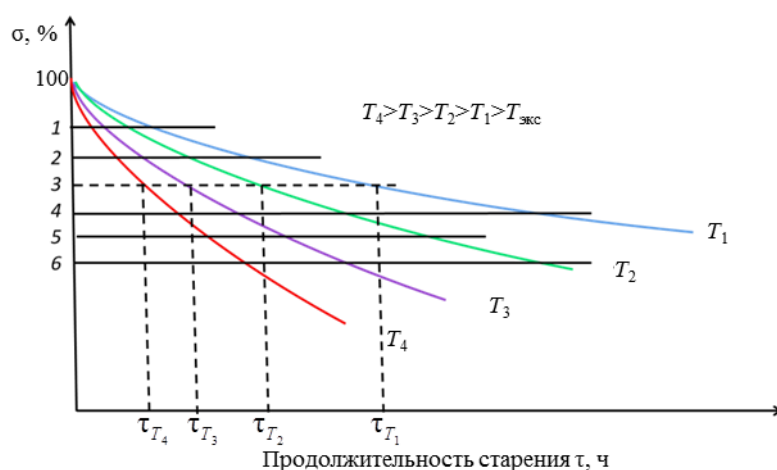


Рис. 1. Схема графической обработки результатов при тепловом старении материала в сечениях 1–6

Для каждого сечения (1–6), характеризующегося постоянством измеряемой характеристики, при различных температурах определяют продолжительность воздей-

ствия τ_i . Для каждого сечения, используя пары температур T_1 и T_2 , T_2 и T_3 , ..., T_{n-1} и T_n , по уравнению (3) вычисляют энергию активации E_i в кДж/моль:

$$E_i = R \frac{T_j \cdot T_{j+1}}{T_{j+1} - T_j} \cdot \ln \frac{\tau_{T_j}}{\tau_{T_{j+1}}}, \quad (3)$$

где T_j, T_{j+1} – температуры испытаний, К; $j=1, 2, \dots, (n-1)$; $\tau_{T_j}, \tau_{T_{j+1}}$ – продолжительность испытаний до достижения заданного значения показателя σ_i при температурах T_j и T_{j+1} .

После расчетов энергии активации процесса теплового старения материала для каждой пары температур, проводится статистическая обработка полученного массива результатов. В зависимости от количества полученных значений и требуемой достоверности выбирается коэффициент Стьюдента и рассчитываются среднее квадратическое отклонение, доверительный интервал и среднее значение энергии активации по уравнению (4):

$$E_{\text{cp}} = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n}, \quad (4)$$

где n – число значений показателя.

Материалы и методы

Объекты исследования

Углепластик ВКУ-39 на основе эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и углеродной ткани фирмы Rogcher (арт. 3692) – конструкционный материал, переназначенный для изготовления створок и наружного кожуха мотогондолы двигательной установки ПД-14.

Стеклопластик ВПС-48/7781 на основе эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и стеклоткани фирмы Rogcher (арт. 7781) – конструкционный материал, переназначенный для средненагруженных конструкций изделий авиационной техники.

Отверждение углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 осуществляется в вакууме при стандартном режиме.

Связующее ВСЭ-1212 – расплавное эпоксидное связующее, состоящее из модифицированной дифункциональной эпоксидной смолы, полифункциональной смолы, аминного ароматического отвердителя и термопласта.

Методы исследования

Из отформованных панелей углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 размером $300 \times 300 \times 2,5$ мм изготовлены образцы:

– $15 \times 5 \times 2,5$ мм – для определения предела прочности при изгибе по ASTM D 7264/D 7264M;

– $140 \times 12 \times 2,5$ мм – для определения предела прочности при сжатии по ASTM D 6641/D 6641M.

Из отформованных панелей углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 размером $300 \times 300 \times 4$ мм изготовлены образцы $155 \times 13 \times 4$ мм – для определения предела прочности при межслойном сдвиге по ASTM D 2344/D 2344M.

Тепловое старение (тепловые ресурсные испытания) проводили согласно СТП 1-595-11-101-83 и ММ1.595-20-461-2015.

Определение пределов прочности при сжатии и межслойном сдвиге проводили на испытательной машине Тиратест 2200, при изгибе – на Тиратест 2300. Определение интервала и температуры расстекловывания проводили с использованием прибора ТМА 202 С в соответствии с ASTM E 228-85.

Результаты

Оценка сохраняемости свойств углепластика ВКУ-39 и ВПС-48/7781 в процессе теплового старения при предполагаемой температуре эксплуатации

По результатам предварительных испытаний углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 наиболее чувствительной характеристикой к воздействию температуры признана прочность при межслойном сдвиге [19]. Исходя из этого прогнозирование ресурса материала при рабочей температуре, равной 120°C (данная температура установлена в техническом задании на мотогондолу двигателя ПД-14), в течение 80000 ч производилось по сохраняемости величины прочности при межслойном сдвиге.

С целью подтверждения возможности длительной эксплуатации разрабатываемых материалов и повышения точности долгосрочного прогноза на период до 80000 ч, необходимо получить результаты краткосрочных и среднесрочных испытаний по стабильности материалов при предполагаемой температуре эксплуатации. Для этого проведено тепловое старение исследуемых стекло- и углепластиков при температуре 120°C продолжительностью 10000 ч. При этом определяли основные свойства конструкционных материалов: пределы прочности при межслойном сдвиге, изгибе, сжатии; изменение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР); величину относительного удлинения и интервал температур стеклования. Для получения промежуточных результатов проводили съемы образцов для определения механических характеристик материалов после 2000, 4000, 6000, 8000 и 10000 ч. В табл. 1 представлены истинные значения пределов прочности при межслойном сдвиге (τ_{13}), изгибе ($\sigma_{в.и}$) и сжатии ($\sigma_{в.сж}$), полученные в процессе старения.

Таблица 1

Прочностные характеристики ПКМ, полученные при старении в течение 10000 ч при температуре 120°C

Материал	Температура испытания, °C	$\sigma_{в.и}$, МПа					
		в исходном состоянии	при продолжительности старения, тыс. ч				
			2	4	6	8	10
ВПС-48/7781	20	640	620	610	660	670	670
	120	540	570	560	565	545	510
ВКУ-39	20	1130	1130	1180	1125	1160	1150
	120	920	920	955	855	935	985

Продолжение

Материал	Температура испытания, °C	τ_{13} , МПа					
		в исходном состоянии	при продолжительности старения, тыс. ч				
			2	4	6	8	10
ВПС-48/7781	20	95	95	71	68	75	77
	120	59	63	53	48	59	53
ВКУ-39	20	96	100	76	73	73	80
	120	67	67	55	50	56	58

Продолжение

Материал	Температура испытания, °C	$\sigma_{в.сж}$, МПа					
		в исходном состоянии	при продолжительности старения, тыс. ч				
			2	4	6	8	10
ВПС-48/7781	20	640	635	520	600	575	530
	120	460	435	415	450	425	380
ВКУ-39	20	810	865	840	930	845	730
	120	710	755	640	740	630	540

Значения предела прочности при изгибе после 10000 ч теплового старения остались на уровне исходных значений.

Предел прочности при межслойном сдвиге зависит от сроков экспозиции. Зависимости изменения прочности при межслойном сдвиге от продолжительности старения для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 представлены на рис. 2.

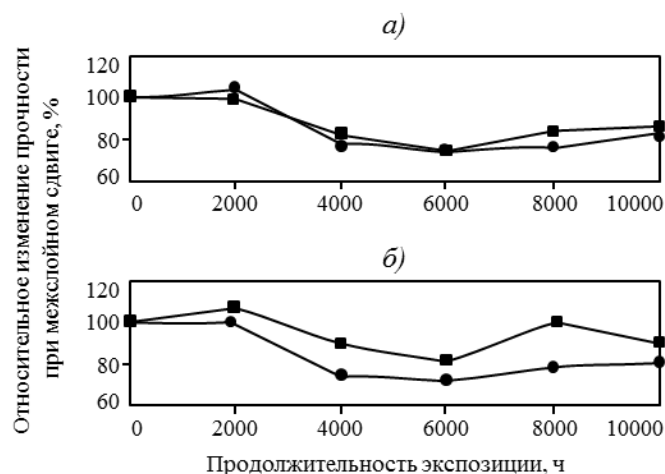


Рис. 2. Относительное изменение прочности при межслойном сдвиге углепластика ВКУ-39 (а) и стеклопластика ВПС-48/7781 (б) в процессе теплового старения при 120°C (■); ● – при 20°C

Для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 значения предела прочности при межслойном сдвиге практически не меняются в течение первых 2000 ч экспозиции, далее наблюдается снижение показателя до величины 76–82% от исходных значений; после 6000 ч экспозиции значения предела прочности при межслойном сдвиге приближаются к исходным значениям (90–100%) и практически не меняются (рис. 2). Видно также, что на протяжении всего экспериментального периода теплового старения (10000 ч) сохраняемость характеристики прочности при межслойном сдвиге при температуре испытаний 120°C для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 выше (или равна), чем при температуре испытаний 20°C, т. е. в материале при повышенной температуре (120°C) протекают дополнительные процессы релаксации внутренних напряжений.

На рис. 3 представлены зависимости прочности при сжатии для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 при различных температурах испытаний. В течение периода теплового старения происходят небольшие изменения характеристики. По достижении 10000 ч теплового старения значения предела прочности при сжатии для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 снижаются до 70–80% от исходного значения.

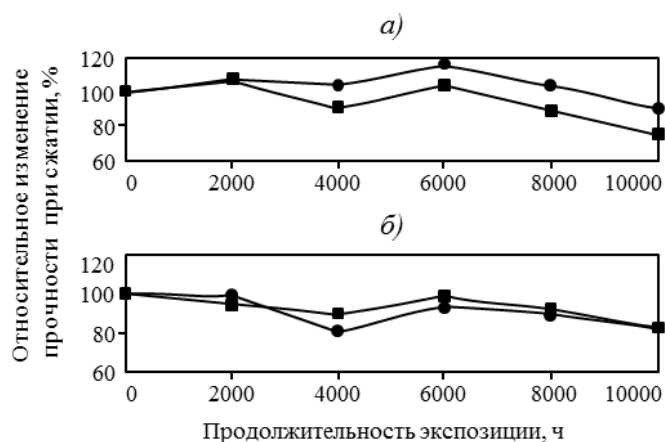


Рис. 3. Относительное изменение прочности при сжатии углепластика ВКУ-39 (а) и стеклопластика ВПС-48/7781 (б) в процессе теплового старения при 120°C (■); ● – при 20°C

Определена степень сохраняемости интервалов и температур стеклования углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 в процессе теплового старения после 2000, 6000, 8000 и 10000 ч экспозиции. На рис. 4 приведены данные по относительному удлинению и ТКЛР углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии и после различных периодов теплового старения.

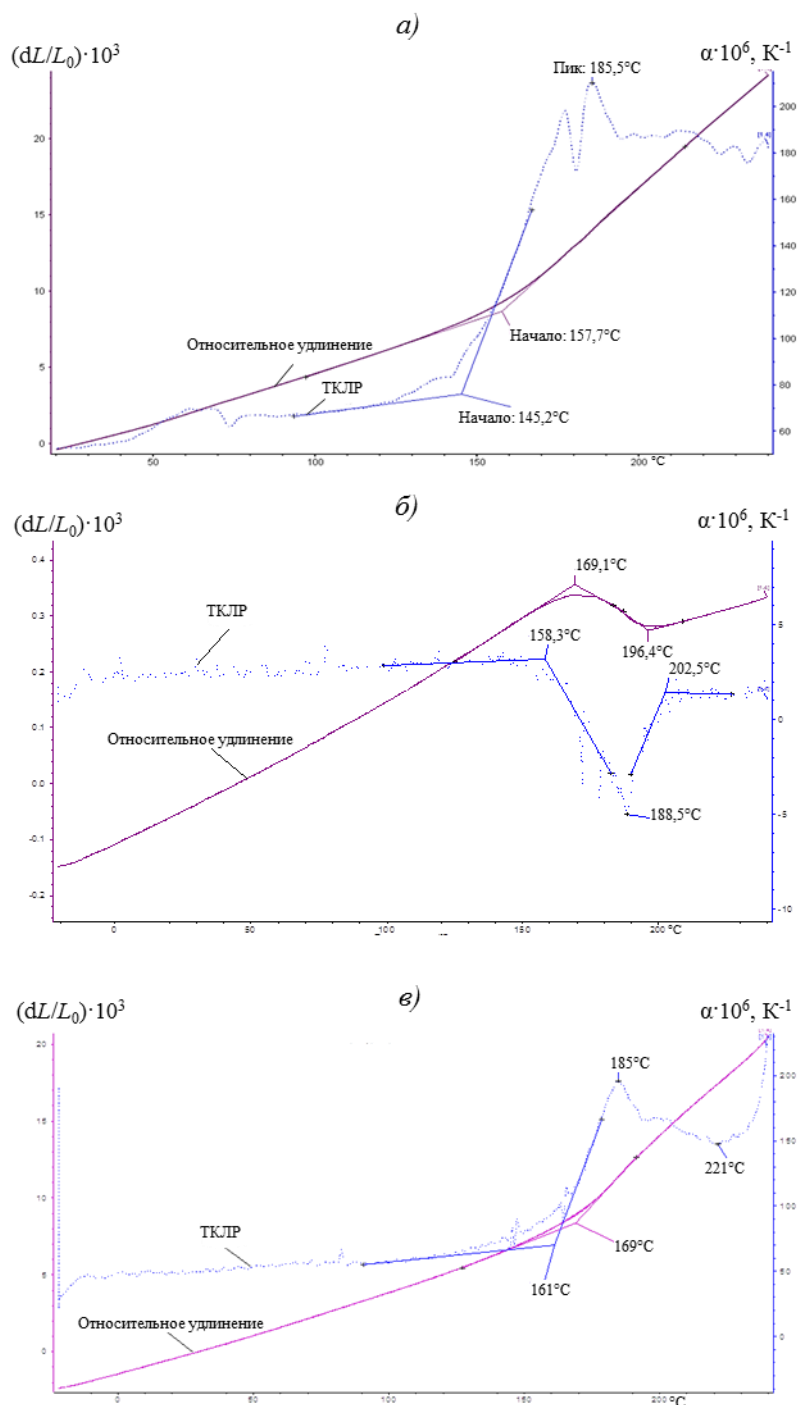


Рис. 4. Относительное удлинение и температурный коэффициент линейного расширения α (ТКЛР) углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии (а) и после теплового старения в течение 2000 (б), 6000 (в) при температуре испытаний 120°C

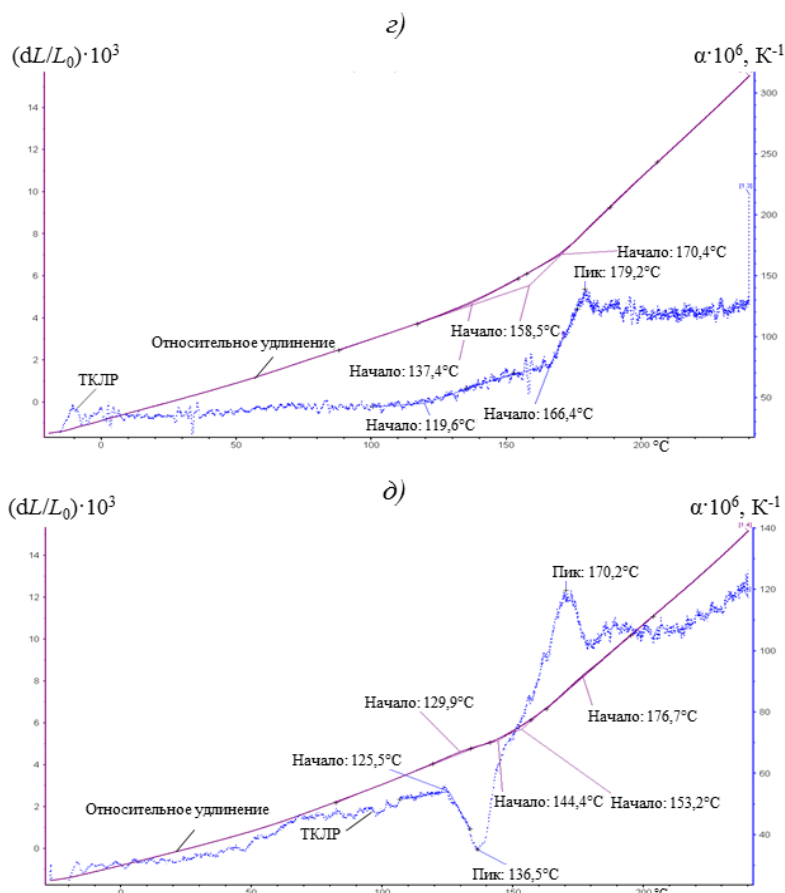


Рис. 4 (продолжение). Относительное удлинение и температурный коэффициент линейного расширения α (ТКЛР) углепластика ВКУ-39 после теплового старения в течение 8000 (з) и 10000 ч (д) при температуре испытаний 120°C

В табл. 2 представлено изменение средних значений ТКЛР углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии и в процессе теплового старения при температуре 120°C после 2000, 6000, 8000 и 10000 ч в заданном температурном интервале.

Таблица 2

Среднее значение ТКЛР (α) в различных интервалах температур для углепластика ВКУ-39

Интервал температур (20÷T), °C	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$				
	в исходном состоянии	после теплового старения в течение, ч			
		2000	6000	8000	10000
50	37,8	2,53	50,8	36,1	33,7
100	42,3	2,75	54,0	39,7	40,6
150	43,5	3,04	58,5	44,4	44,7
200	60,5	-0,04	80,8	60,4	60,5

Изменение значений ТКЛР свидетельствует о протекании структурных преобразований в процессе старения углепластика ВКУ-39. Резкое изменение значений ТКЛР после 2000 ч теплового старения объясняет снижение предела прочности при межслойном сдвиге, который чувствителен к данным процессам, протекающим в полимерной матрице. Дальнейшее увеличение срока теплового старения (>6000 ч) не вызывает существенных изменений ТКЛР и предела прочности при межслойном сдвиге. Стабилизация значений ТКЛР с увеличением срока теплового старения косвенно подтверждает долгосрочную стабильность структуры полимерной матрицы.

В табл. 3 представлено изменение интервала и температуры стеклования углепластика ВКУ-39.

Таблица 3

Изменение интервала и температуры стеклования для углепластика ВКУ-39 в течение 10000 ч теплового старения при 120°C

в исходном состоянии	Интервал температур* области стеклования, °C			
	после теплового старения в течение, ч			
	2000	6000	8000	10000
<u>158–208</u>	<u>158,3–202,5</u>	<u>159–210</u>	<u>166–207</u>	<u>153–207</u>
185	188,5	185	179	170

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Значения температуры стеклования и интервала стеклования практически не меняются в процессе исследованного периода теплового старения при выбранной температуре. Для стеклопластика ВПС-48/7781 наблюдается аналогичная картина изменения ТКЛР в процессе тепловых ресурсных испытаний, как и для углепластика ВКУ-39 (рис. 5).

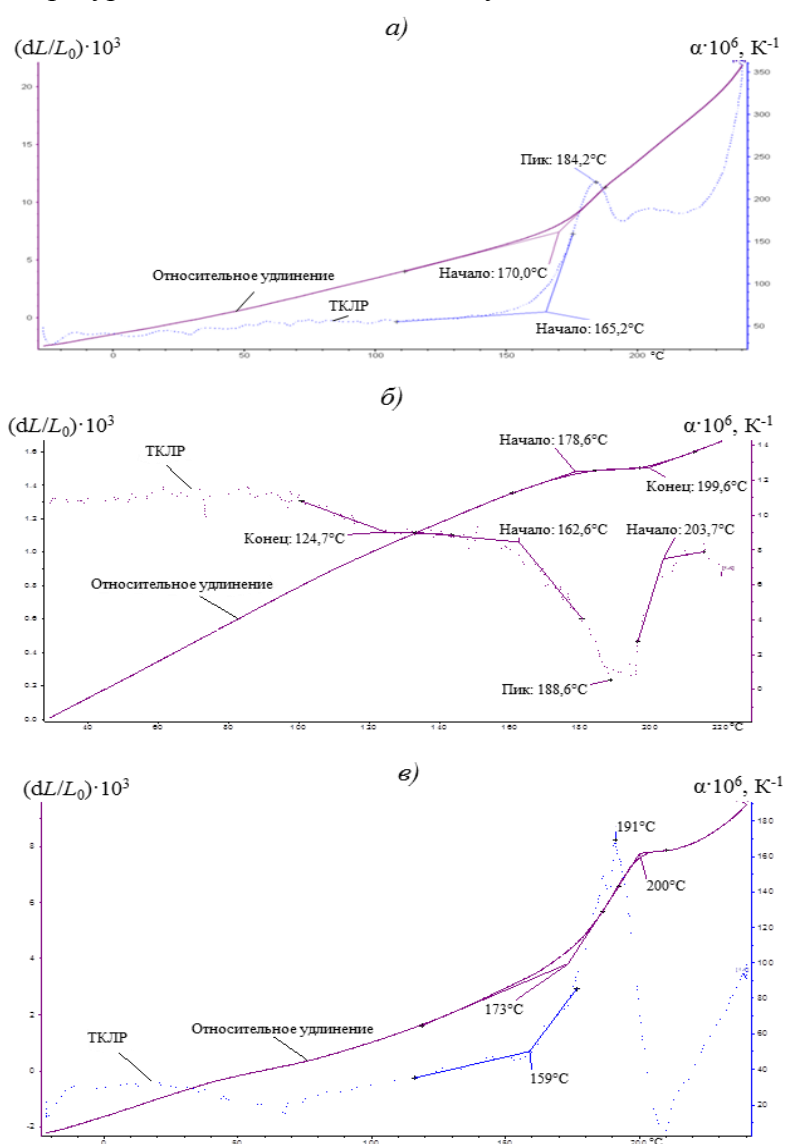


Рис. 5. Относительное удлинение и температурный коэффициент линейного расширения α (ТКЛР) стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии (а) и после теплового старения в течение 2000 (б), 6000 (в) при температуре испытаний 120°C

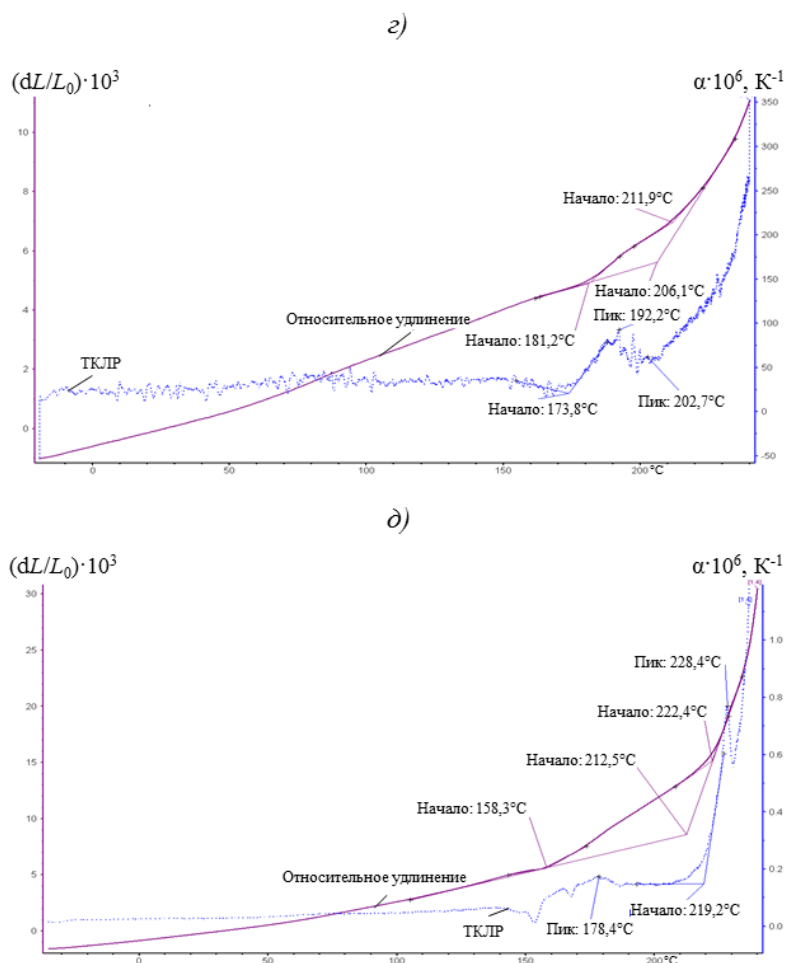


Рис. 5 (продолжение). Относительное удлинение и температурный коэффициент линейного расширения α (ТКЛР) стеклопластика ВПС-48/7781 после теплового старения в течение 8000 (з) и 10000 ч (д) при температуре испытаний 120°C

В табл. 4 представлено изменение средних значений ТКЛР стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и в процессе теплового старения при температуре 120°C после 2000, 6000, 8000 и 10000 ч в заданном температурном интервале.

Таблица 4

Среднее значение ТКЛР (α) в различных интервалах температур для стеклопластика ВПС-48/7781

Интервал температур (20÷T), °C	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$				
	в исходном состоянии	после теплового старения в течение, ч			
		2000	6000	8000	10000
50	25,3	11,1	27,6	24,4	28,6
100	26,5	11,1	25,3	30,08	36,6
150	31,4	8,37	30,4	32,2	43,6
200	48,2	4,96	47,7	35,8	66,8

Профиль изменения значений ТКЛР для стеклопластика ВПС-48/7781 (также как и для углепластика ВКУ-39) соответствует профилю изменения предела прочности при межслойном сдвиге при тепловом старении. Это подтверждает протекание процессов структурирования в материале на начальных этапах теплового старения и стабилизацию полимерной матрицы после 6000 ч испытаний.

В табл. 5 представлено изменение интервала и температуры стеклования для стеклопластика ВПС-48/7781.

Таблица 5

Изменение интервала и температуры стеклования для стеклопластика ВПС-48/7781 в процессе 10000 ч теплового старения при 120°C

в исходном состоянии	Интервал температур* области стеклования, °С			
	после теплового старения в течение, ч			
	2000	6000	8000	10000
<u>177–203</u>	<u>163–204</u>	<u>159–221</u>	<u>174–203</u>	<u>178–212</u>
188	188,6	191	192	193

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

На начальном этапе теплового старения до 2000 ч значение температуры стеклования остается неизменным, однако при достижении 6000 ч экспозиции интервал температуры стеклования смещается в зону более высоких температур на 17°C, что также сопровождается ростом значений предела прочности при сжатии при температуре испытаний 120°C (рис. 3, б). После достижения 8000 ч экспозиции интервал температуры стеклования возвращается к исходным значениям. Предел прочности при сдвиге также не меняется, что можно объяснить протеканием процесса образования новых связей.

Результаты испытаний подтверждают возможность применения углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 при рабочей температуре 120°C. Протекание процессов структурных изменений в полимерной матрице не приводит к значительному снижению прочностных характеристик, интервала и температуры стеклования.

Расчет энергии активации процесса теплового старения для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781

Расчет энергии активации процесса теплового старения проводили по кинетическим кривым изменения предела прочности при межслойном сдвиге в зависимости от продолжительности экспозиции при температурах 170, 180 и 190°C, полученным в работе [19]. Для расчета энергии активации выбраны пары кинетических кривых, полученные при температурах 160–170, 160–180, 170–180, 180–190 и 170–190°C.

На данных парах кинетических кривых для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 получены по 240 значений энергии активации и проведена статистическая обработка результатов расчета по среднему квадратическому отклонению и коэффициенту Стьюдента. После статистической обработки и отбраковки крайних значений энергии активации, на основе полученных результатов рассчитаны средние значения энергии активации процесса теплового старения для исследуемых материалов: 113 кДж/моль – для углепластика ВКУ-39, 55 кДж/моль – для стеклопластика ВПС-48/7781.

Прогнозирование сохраняемости свойств материалов при предполагаемой температуре эксплуатации

Для расчета сохраняемости свойств материалов на срок до 80000 ч уравнение (2) необходимо привести к следующему виду:

$$\ln \tau_{i \text{ ресурс}} = \ln \tau_{i \text{ форсир}} - \left[\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{форсир}}} - \frac{1}{T_{\text{эспл}}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\tau_{i \text{ ресурс}}$ – расчетный ресурс при заданной температуре эксплуатации и заданном изменении показателя свойства, ч; $\tau_{i \text{ форсир}}$ – эквивалентная продолжительность теплового старения при выбранной повышенной температуре испытаний и заданном изменении показателя, ч;

$T_{\text{форсир}}$ – повышенная температура теплового старения, К; $T_{\text{экспл}}$ – заданная температура эксплуатации, К; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,319 Дж/(моль·К); E – энергия активации процесса старения для материала, кДж/моль.

По результатам сохраняемости прочности при межслойном сдвиге углепластика ВКУ-39 в процессе теплового старения при форсированных испытаниях (температуры: 160; 170; 180 и 190°C) и значении энергии активации процесса теплового старения ($E=113$ кДж/моль) рассчитана прогнозная кривая изменения прочности при межслойном сдвиге для рабочей температуры 120°C (рис. 6).

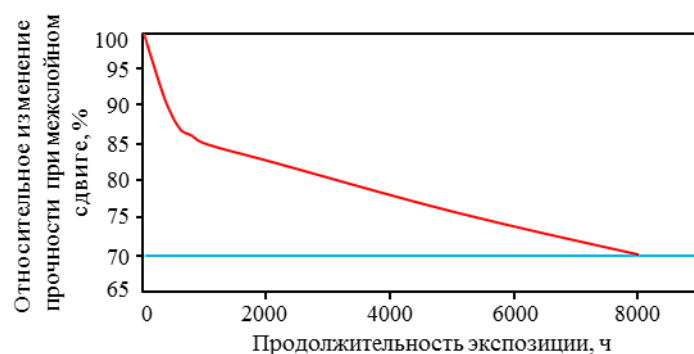


Рис. 6. Прогнозная кривая изменения предела прочности при межслойном сдвиге углепластика ВКУ-39 при рабочей температуре 120°C

Прогнозный уровень сохраняемости предела прочности при межслойном сдвиге для углепластика ВКУ-39 по достижении 80000 ч теплового ресурса составляет ~70% от исходного значения. Для уточнения и корректировки результатов прогнозирования сохраняемости свойств, полученных в лабораторных условиях, необходимо определить уровень сохраняемости свойств материалов после их реальной эксплуатации в составе изделия.

Для стеклопластика ВПС-48/7781 расчет прогнозных кривых по форсированным температурам теплового старения (температуры: 160; 170; 180 и 190°C) и энергии активации процесса теплового старения ($E=55$ кДж/моль) провести не удалось. При выбранных температурах уровень сохраняемости предела прочности при межслойном сдвиге составляет 90–95% от исходного значения, что не позволяет построить убывающую зависимость показателя прочности, однако можно сделать вывод о стабильности механических свойств стеклопластика ВПС-48/7781, а также о пренебрежимо малой скорости его старения в пределах установленного ресурса в 80000 ч при 120°C.

Влияние циклических изменений температур на прочностные характеристики углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781

Исследованы физико-механические характеристики (пределы прочности при изгибе и сжатии) при 20 и 120°C углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 после циклического воздействия эксплуатационных температур. Испытания на воздействие циклических изменений температур имитируют эксплуатацию материала в составе изделия в режиме «взлет–посадка». Испытания проводили при изменении температуры с переходом от минимально (-60°C) до максимально (+120°C) возможных температур при термоциклировании (100 циклов) по режиму: -60°C ↔ +120°C с выдержкой при каждой температуре 1 ч. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Изменение пределов прочности при изгибе и сжатии углепластика ВКУ-39
и стеклопластика ВПС-48/7781 после циклического воздействия температур**

Материал	Температура испытания, °С	$\sigma_{в.из}$ МПа		$\sigma_{в.сж}$ МПа	
		в исходном состоянии	после тепловых циклических испытаний	в исходном состоянии	после тепловых циклических испытаний
ВПС-48/7781	20	650	635	625	635
	120	550	555	430	430
ВКУ-39	20	900	910	725	745
	120	665	725	555	565

Видно, что после циклического воздействия эксплуатационных температур от -60 до +120°С в течение 100 циклов для материалов ВПС-48/7781 и ВКУ-39 снижения пределов прочности при изгибе и сжатии не наблюдается как при температуре испытаний 20°С, так и при 120°С, что свидетельствует о стойкости испытанных материалов к воздействию переменных температур.

Обсуждение и заключения

В данной работе получены следующие результаты:

- определен уровень сохраняемости механических характеристик углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 после воздействия предполагаемой эксплуатационной температуры 120°С;
- установлено, что в процессе тепловых ресурсных испытаний в полимерной матрице протекают процессы структурирования;
- проведены расчеты энергии активации процесса теплового старения углепластика ВКУ-39 (энергия активации 113 кДж/моль) и стеклопластика ВПС-48/7781 (энергия активации 55 кДж/моль);
- рассчитан прогнозный уровень сохраняемости прочности при межслойном сдвиге для углепластика ВКУ-39 на период до 80000 ч при заданном режиме эксплуатации при температуре 120°С.
- установлено, что циклическое воздействие эксплуатационных температур не оказывает отрицательного воздействия на механические характеристики углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М. Туманов А.Т. – инициатор создания композитов // Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении: сб. тез. докл. межотрасл. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2009. С. 6–9.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
4. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
5. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 35–39.
6. Кириллов В.Н., Вапиров Ю.М., Дрозд Е.А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата // Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 31–38.

7. Mishra G., Mohapatra S.R., Behera P.R., Dash B., Mohanty U.K., Ray B.C. Environmental stability of GFRP laminated composites: an emphasis on mechanical behaviour // *Aircraft Eng. and Aerosp. technol.* 2010. V. 82. №4. P. 258–266.
8. 88ABW-2012-0190. Firefighting and emergency response study of advanced composites aircraft // Objective 2: Firefighting Effectiveness of Technologies and Agents on Composite Aircraft Fires: distribution A. Approved for public release 10.01.2012. P. 3.
9. Sugita Y., Winkelmann C., La Saponara V. Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy lap joints for aerospace applications, and effects on their mechanical performance // *Compos. Sci. and Technol.* 2010. V. 70. №5. P. 829–839.
10. Кириллов В.Н., Ефимов В.А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 379–388.
11. Mikols W.J., Seferis J.C., Apicella A., Nicolais L. Evaluation of structural changes in epoxy systems by moisture sorption-desorption and dynamic mechanical studies // *Polym. Compos.* 1982. V. 3. №3. P. 118–124.
12. Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Скирта А.А., Гращенков Д.В. Исследование закономерностей влагопереноса и разработка стандарта по определению коэффициента диффузии и предельного влагосодержания для оценки механических свойств углепластиков // *Авиационные материалы и технологии.* 2013. №3. С. 44–48.
13. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов.* 2010. №11. С. 19–27.
14. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // *Авиационные материалы и технологии.* 2012. №5. С. 412–423.
15. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2015).
16. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // *Деформация и разрушение материалов.* 2012. №6. С. 17–19.
17. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров. М.: Химия, 1976. 416 с.
18. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 1. Исследование влияния сорбированной влаги на эпоксидную матрицу и углепластик на ее основе // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-11-11.
19. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 2. Обоснование выбора режимов и проведение теплового старения полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №1. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-10-10.
20. Janz G.J., Estimation of thermodynamic properties of organic compounds. New York: Academic press, 1958. 224 p.
21. Parks G.S., Huffman H.M. The free energies of some organic compounds. New York: Chem. Cat. Co., 1932. 60 p.
22. Rossini F.D. Chemical thermodynamics. New York: Wiley, 1950. 514 p.
23. Карпучин О.Н. Определение срока службы полимерного материала как физико-химическая проблема // *Успехи химии.* 1980. Т. 49. Вып. 8. С. 1523–1553.