
Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-87-100

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СВОЙСТВА СТЕКЛОПЛАСТИКА

В.И. Постнов¹, О.Ю. Мантусова¹, М.В. Постнова¹, А.А. Баранников¹

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

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния термоциклических воздействий и максимальной температуры эксплуатации на свойства полимерных композиционных материалов на основе стеклоткани и эпоксидного связующего. Установлено, что циклы «нагрев–охлаждение» для стеклопластиков с различным содержанием полимерной матрицы и вариантами армирования вызывают некоторое снижение прочностных и упругих динамических характеристик, но это не сказывается отрицательно на работе защитных экранов или мотогондол для газотурбинных двигателей из стеклопластиков.

Ключевые слова: стеклопластик, термоциклическое воздействие, схема армирования, прочность при изгибе, предел прочности при сдвиге

Для цитирования: Постнов В.И., Мантусова О.Ю., Постнова М.В., Баранников А.А. Влияние термоциклических воздействий на свойства стеклопластика // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-87-100.

Scientific article

INFLUENCE OF THERMOCYCLIC EFFECTS ON THE PROPERTIES OF FIBERGLASS

V.I. Postnov¹, O.Yu. Mantusova¹, M.V. Postnova¹, A.A. Barannikov¹

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

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of thermocyclic effects and operating temperature on the properties of polymer composite materials based on the fiberglass and epoxy binder. It is established that the «heating–cooling» cycles for fiberglass with different polymer matrix content and reinforcement options cause some decreases in strength and elastic dynamic characteristics, but this does not adversely affect the operation of protective screens or engine nacelles for gas turbine engines made of fiberglass.

Keywords: fiberglass, thermal cycling, reinforcement scheme, bending strength, shear strength

For citation: Postnov V.I., Mantusova O.Yu., Postnova M.V., Barannikov A.A. Influence of thermocyclic effects on the properties of fiberglass. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-87-100.

Введение

В современном двигателестроении увеличивается массовая доля применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе разработанных специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [1–3], что позволяет значительно снизить массу изделия, обеспечивая при этом высокий уровень эксплуатационных свойств.

В процессе эксплуатации все узлы и детали газотурбинного двигателя (ГТД) подвержены действию температурных полей и термоциклических воздействий, которые приводят к разупрочнению материалов [4]. В связи с этим применение ПКМ в деталях ГТД, которые в большей степени подвержены воздействию циклических температур, чем металлы, вызывает у конструкторов обоснованные опасения, которые могут быть устранены только положительными результатами экспериментов.

Использование ПКМ в защитных экранах и других элементах ГТД требует также подтверждения, что термоциклические воздействия и температура эксплуатации не вызовут уменьшения характеристик сопротивления пробивающему воздействию (СПВ), чем и обосновывается необходимость проведения экспериментальных исследований, представленных в данной статье. В научно-технической литературе встречаются сведения о влиянии технологических параметров и термоциклических воздействий на прочностные свойства модифицированных углепластиков [5]. В работах [6–10] опубликованы результаты исследования влияния механических нагрузок и климатических факторов на свойства конструкционных ПКМ из стеклопластиков. В данной статье описаны результаты экспериментальных исследований по определению влияния термоциклических воздействий на статические, динамические и прочностные свойства группы стеклопластиков.

Материалы и методы

Для исследования влияния термоциклических воздействий на статические прочностные свойства ПКМ разработаны и изготовлены стеклопластики типа ВПС на основе стеклоткани Т-10-80 и связующего ЭДТ-10, отличающиеся по содержанию связующего (по массе) и вариантам армирования, входящие в экспериментальную группу. При проведении экспериментов использована установка УИТ-2. Характеристики стеклопластиков приведены в таблице.

Характеристики стеклопластиков

Условное обозначение стеклопластика	Содержание полимерного связующего, % (по массе)	Схема армирования	Плотность d , г/см ³
КС-1	20	0°	2,03
КС-2	20	0°, 90° (1:1)	2,0
КС-3	20	0°, ±45°, 90° (1:1)	1,99
КС-4	25	0°	1,91
КС-5	25	0°, 90° (1:1)	1,89
КС-6	25	0°, ±45°, 90° (1:1)	1,89
КС-7	30	0°	1,8
КС-8	30	0°, 90° (1:1)	1,82
КС-9	30	0°, ±45°, 90° (1:1)	1,79

Параметры циклов выбраны исходя из условий эксплуатации конструктивных элементов ГТД из ПКМ, расположенных над лопатками вентилятора, и составляли: $(150 \pm 5) \pm (30 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C}$, максимальное число циклов 200 и скорости нагрева и охлаждения 10 °C/мин.

Термоциклическое воздействие на образцы из ПКМ проводили следующим образом. В то время как образцы, помещенные в один из двух контейнеров установки УИТ-2, подвергали нагреву в термокамере, во втором контейнере другие образцы охлаждали струей воздуха. Нагрев и охлаждение образцов контролировали с помощью термопар, помещенных в образцы-свидетели, находящиеся в группе образцов. После нагрева до максимальной температуры производилось автоматическое переключение

контактов в электрической схеме, и контейнер с нагретыми образцами с помощью реверсивного двигателя перемещался в зону охлаждения, а контейнер с охлажденными образцами – в термокамеру. В дальнейшем процесс «нагрев–охлаждение» повторяли заданное число раз (рис. 1).

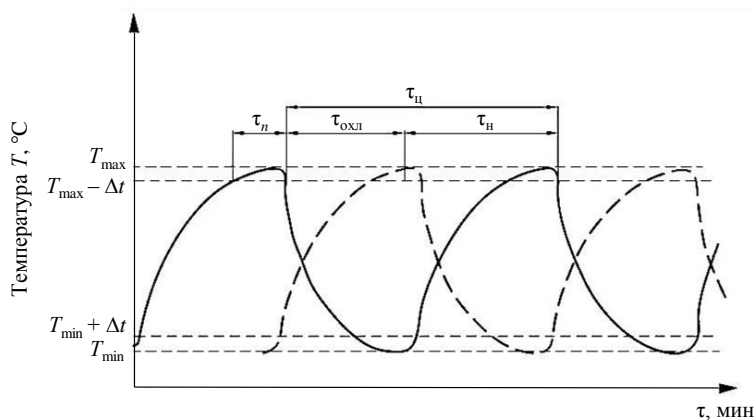


Рис. 1. Термоциклы воздействия (в виде зависимости температуры T от времени τ): $\tau_{\text{охл}}$ – время охлаждения образцов; τ_n – время нагрева образцов; $\tau_{\text{ц}}$ – время цикла «нагрев–охлаждение»; τ_n – время нахождения образцов в интервале температур от 150 до 155 °С

Пунктирной и сплошной линиями обозначены циклы «нагрев–охлаждение» образцов в первом и втором контейнерах. Продолжительность цикла составляла 30 мин. Режим термоциклического воздействия подбирали таким образом, чтобы время нагрева и охлаждения образцов было одинаковым. Это осуществляли с помощью регулирования количества тепла, поступающего в термокамеру. Количество циклов контролировали с помощью записей, сделанных самописцем на диаграмме прибора. Для исследования степени влияния термоциклического воздействия на прочностные свойства, для ПКМ задавали число циклов, равным 50, 100 и 200, после чего образцы подвергали испытаниям. Перед проведением статических и динамических испытаний образцы контролировали по внешнему виду, массе, плотности и степени полимеризации. На рис. 2 приведены графические зависимости изменения массы, плотности и степени полимеризации от числа термоциклов, воздействующих на композиционные материалы (образцы КС-1–КС-9 – см. таблицу). Из приведенных зависимостей видно, что в процессе термоциклического воздействия в образцах ПКМ происходят определенные химические превращения, такие как дополимеризация связующего (рис. 2, в), частичная деструкция полимерного связующего, за счет которой в основном происходит изменение массы и плотности (рис. 2, а, б).

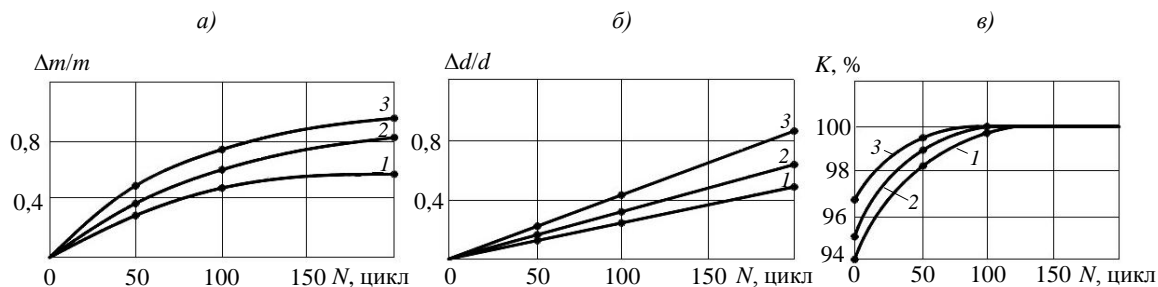


Рис. 2. Зависимости относительного изменения массы (а) и плотности (б) полимерного композиционного материала (ПКМ), а также степени полимеризации связующего в ПКМ (в) от числа циклов (N), где 1 – КС-3; 2 – КС-6; 3 – КС-9 (см. таблицу)

Результаты и обсуждение

Таким образом, можно сделать вывод, что ПКМ после термоциклических воздействий приобрели новые качества по сравнению со своим первоначальным состоянием, поэтому для их отличия в обозначение композиционных материалов введена дополнительно буква после номера варианта с цифровым обозначением количества циклов.

Приведенные обозначения материалов расшифровываются, например для КС-6-Т100, так: 6 вариант, подвергшийся термоциклическим воздействиям (Т) в количестве 100 циклов.

Рассмотрим влияние термоциклических воздействий на статические характеристики прочности стеклопластиков при растяжении и сжатии.

Термоциклические воздействия могут вызывать изменение физико-механических свойств как гомогенных, так и гетерогенных материалов [11]. В особенности термоциклическое воздействие оказывает негативное влияние на ПКМ, о чем свидетельствуют, в частности, результаты ранее приведенных экспериментов.

Для проведения испытаний при растяжении из плит готового стеклопластика размерами $400 \times 400 \times 3$, $400 \times 400 \times 6$, $400 \times 400 \times 10$ и $400 \times 400 \times 20$ мм вырезали в соответствии с ГОСТ 11262–2017 образцы с помощью алмазного круга. Образцы для испытаний при сжатии вырезали из плит в соответствии с ГОСТ 4651–2014. Образцы вырезали во взаимно перпендикулярных в плоскости плит направлениях – согласно схеме, приведенной на рис. 3.

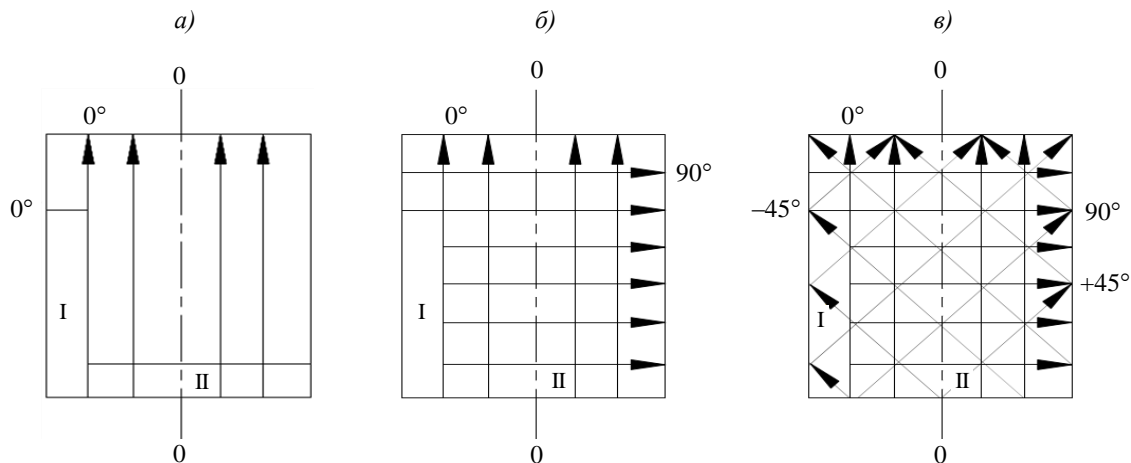


Рис. 3. Схема вырезания образцов, предназначенных для статических и динамических прочностных испытаний из плит стеклопластика с однонаправленным армированием $[0^\circ]$ (а); с перекрестным армированием $[0^\circ, 90^\circ]$ при соотношении слоев 1:1 (б) и с квазиизотропным армированием $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]$ при соотношении слоев 1:1:1:1 (в)

Испытание образцов при растяжении проводили на разрывной машине при скорости движения захватов $0,016 \cdot 10^{-3}$ м/с. Минимальное количество K образцов, обеспечивающее достоверное определение прочностных и деформационных характеристик каждой группы стеклопластиков, заданной относительной ошибкой $\xi = 0,05$, определяли по формуле

$$K \geq t(\Phi N - 1) \frac{v^2}{\xi^2},$$

из которой для распределения Стьюдента $t = 2,78$ при коэффициенте вариации $v = 10\text{--}15\%$ значение K получилось равным 5 ($K \geq 5$).

Увеличение процентного содержания полимерного связующего в стеклопластиках (для всех рассматриваемых материалов) вызывает (рис. 4) уменьшение предела прочности при растяжении в направлениях I и II. Причем эти зависимости монотонно убывают с увеличением содержания связующего (в исследованном диапазоне) как для материалов с явно выраженной анизотропией (кривые 1 и 2 на рис. 4), так и для квазиизотропных материалов (кривая 3).

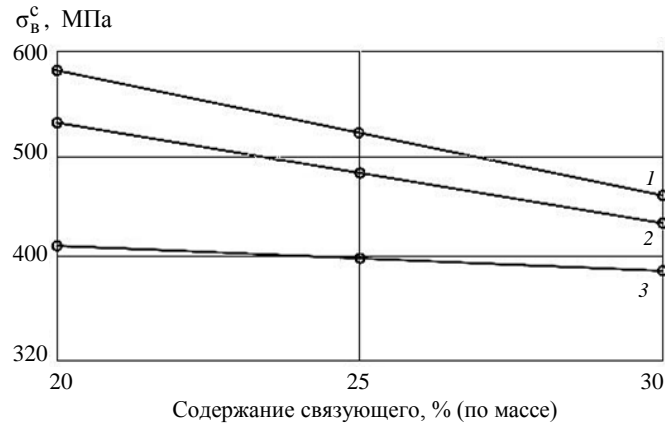


Рис. 4. Зависимость предела прочности при статическом растяжении $\sigma_{\text{в}}^{\text{с}}$ от содержания полимерного связующего для группы стеклопластиков КС-1–КС-9 (см. таблицу) в направлениях I и II (см. рис. 3): 1 – для однонаправленных стеклопластиков КС-1, КС-4 и КС-7; 2 – для перекрестно армированных стеклопластиков КС-2, КС-5 и КС-8; 3 – для квазиизотропных стеклопластиков КС-3, КС-6 и КС-9

Из полученных графических зависимостей установлено, что наибольшая зависимость параметра $\sigma_{\text{в}}^{\text{с}}$ от направления вырезки образцов наблюдается у однонаправленных стеклопластиков, а наименьшая – у квазиизотропных.

Термоциклическое воздействие по методике, изложенной ранее, привело к некоторому изменению плотности структуры изучаемых материалов и фактическому «появлению» новых материалов. Анализируя результаты испытаний этих материалов (рис. 5), можно сделать вывод, что изменение значений статических пределов прочности при растяжении (в обоих направлениях I и II) невелико и составляет для всех стеклопластиков не более 7–10 % от исходного значения в направлении I и 4–7 % – в направлении II.

Некоторые изменения, отмеченные в значениях прочности при растяжении, можно объяснить частично разупрочнением полимерной матрицы [12], а частично нарушением адгезионной связи между полимерной матрицей и армирующим волокном.

Результаты испытаний образцов стеклопластиков КС-1–КС9 (см. таблицу) при сжатии (образцы для испытаний вырезали из плит размером 400×400×10 мм только в направлении I) приведены на рис. 6.

Результаты испытаний при сжатии термоциклированных образцов, приведенные на рис. 7, показывают, что изменение значений $\sigma_{\text{сж}}$ от количества термоциклических воздействий происходит в сторону уменьшения, однако оно незначительно для всех рассмотренных материалов.

Основными видами разрушения являются разрушения типа сколов, расслоений и потери устойчивости армирующих волокон. Анализ отличий в видах разрушений стеклопластиков при различных уровнях термоциклических воздействий не составлял предмета данного исследования.

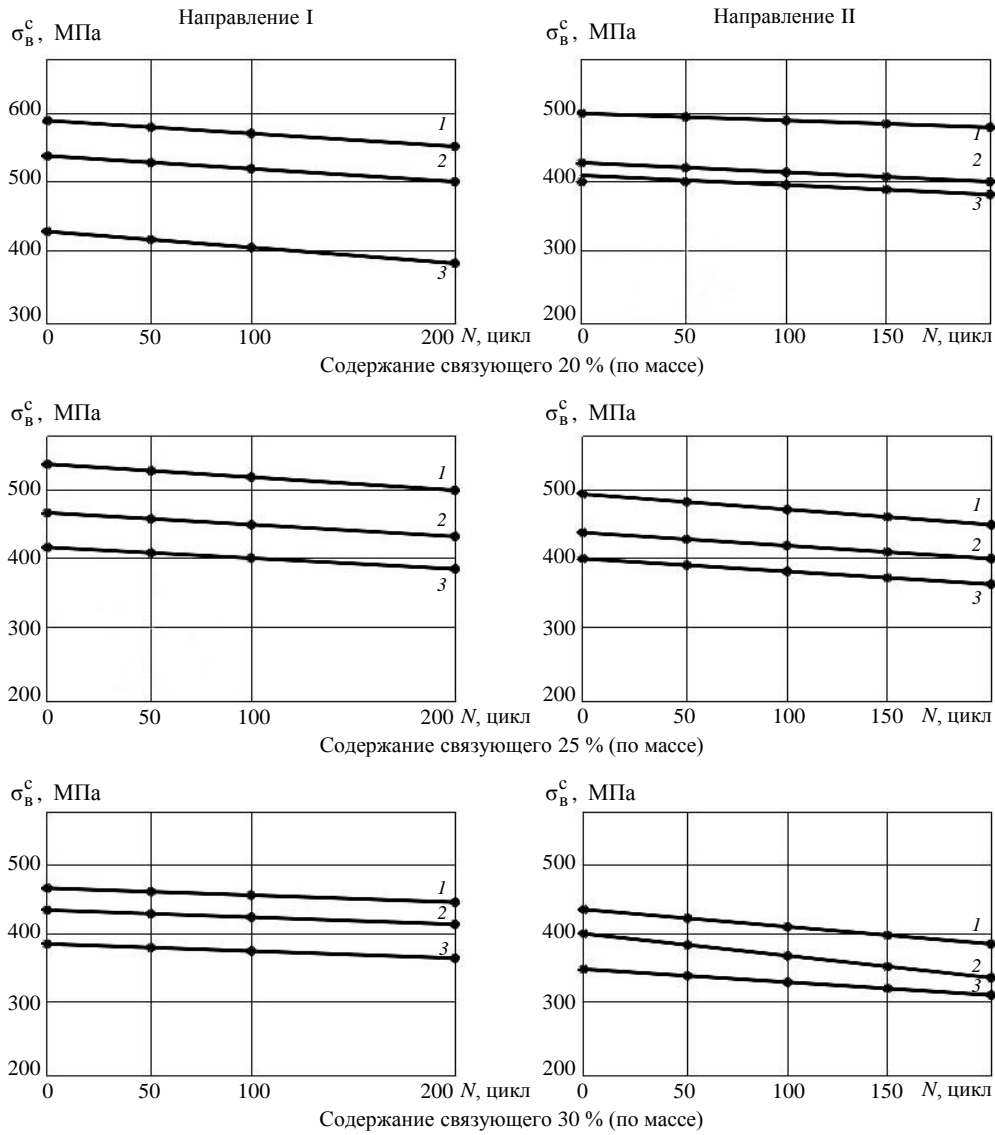


Рис. 5. Изменение значений предела прочности при статическом растяжении в зависимости от количества циклов N при термоциклическом воздействии для стеклопластиков с различным содержанием связующего для направлений I и II (см. рис. 3): 1 – для однонаправленных стеклопластиков КС-1, КС-4 и КС-7; 2 – для перекрестно армированных стеклопластиков КС-2, КС-5 и КС-8; 3 – для квазизотропных стеклопластиков КС-3, КС-6 и КС-9



Рис. 6. Диаграммы изменения предела прочности при сжатии для стеклопластиков с различными вариантами армирования (1 – однонаправленные; 2 – перекрестно армированные; 3 – квазизотропные) в зависимости от содержания в них полимерного связующего

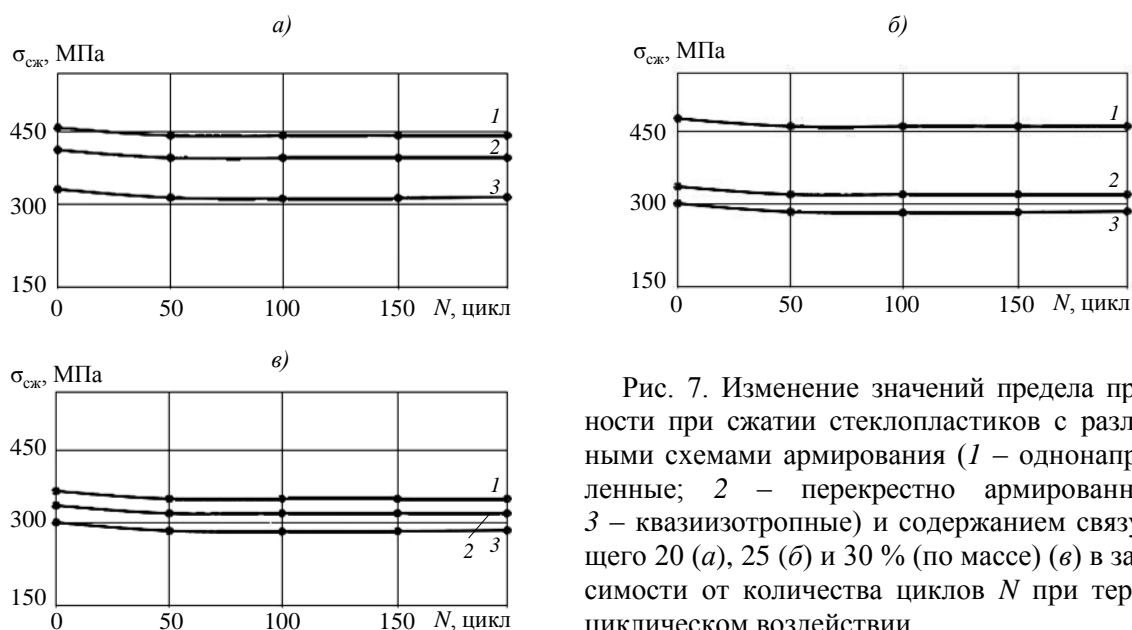


Рис. 7. Изменение значений предела прочности при сжатии стеклопластиков с различными схемами армирования (1 – однонаправленные; 2 – перекрестно армированные; 3 – квазиизотропные) и содержанием связующего 20 (а), 25 (б) и 30 % (по массе) в зависимости от количества циклов N при термоциклическом воздействии

На основании приведенных результатов исследований можно сделать вывод о незначительном влиянии термоциклического воздействия на прочностные характеристики стеклопластиков.

Исследование прочности стеклопластиков при изгибе и сдвиге проводили на образцах, вырезанных только в направлении I (см. рис. 3) в соответствии с ГОСТ 4648–2014 и ГОСТ 14759–69.

Из данных рис. 8. видно, что предел прочности при изгибе ($\sigma_{изг}$) у нетермоциклированных стеклопластиков зависит от схемы армирования и содержания связующего, при этом он заметно уменьшается. Наибольший порядок снижения значений $\sigma_{изг}$ наблюдается у однонаправленных стеклопластиков. Термоциклические воздействия на образцы из стеклопластиков КС-1–КС-9 вызывают (рис. 9) резкое снижение значений $\sigma_{изг}$ уже после первых термоциклов. При дальнейшем наращивании количества циклов снижение прочности несколько уменьшается. Последовательность расположения зависимостей $\sigma_{изг}(N)$ друг над другом для данных материалов сохраняется независимо от содержания полимерного связующего в ПКМ.



Рис. 8. Диаграмма изменения значений предела прочности при изгибе в зависимости от содержания полимерного связующего в нетермоциклированных стеклопластиков: 1 – однонаправленных; 2 – перекрестно армированных; 3 – квазиизотропных

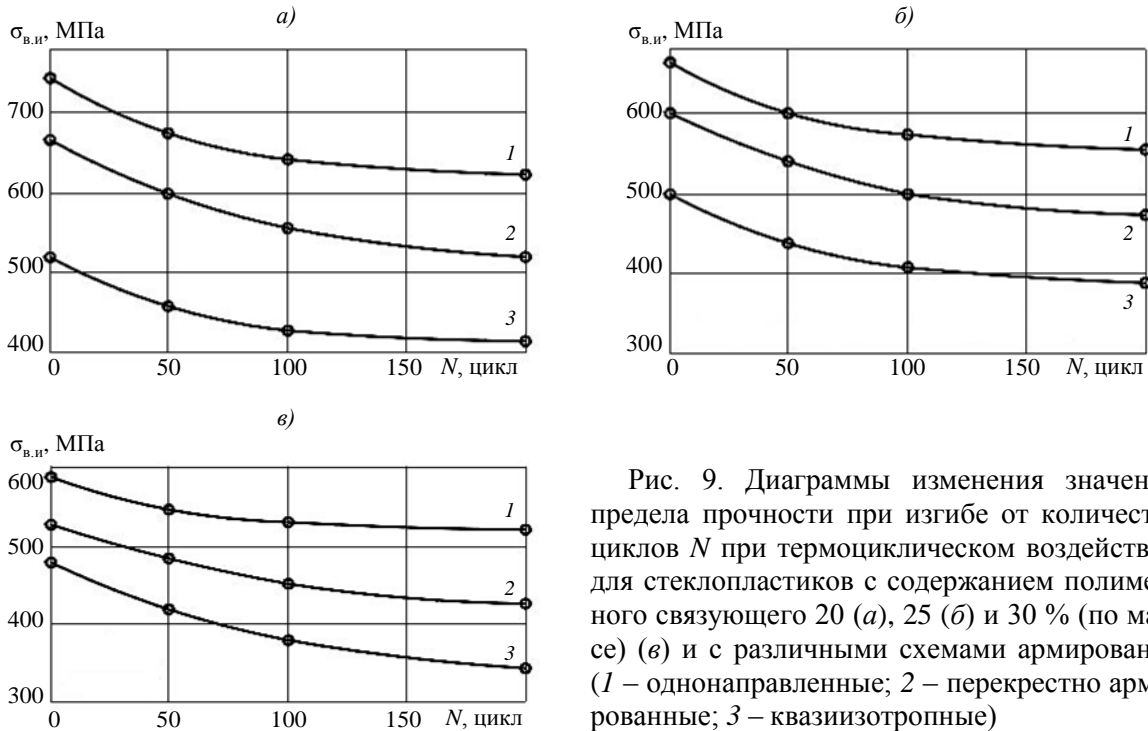


Рис. 9. Диаграммы изменения значений предела прочности при изгибе от количества циклов N при термоциклическом воздействии для стеклопластиков с содержанием полимерного связующего 20 (а), 25 (б) и 30 % (по массе) (в) и с различными схемами армирования (1 – однонаправленные; 2 – перекрестно армированные; 3 – квазиизотропные)

Исследовано влияние вариантов армирования, процентного содержания полимерного связующего у тех же стеклопластиков на предел прочности при сдвиге ($\tau_{сдв}$) на образцах, вырезанных в направлении I (см. рис. 3), и представлено для случаев отсутствия термоциклирования в виде графиков, изображенных на рис. 10.

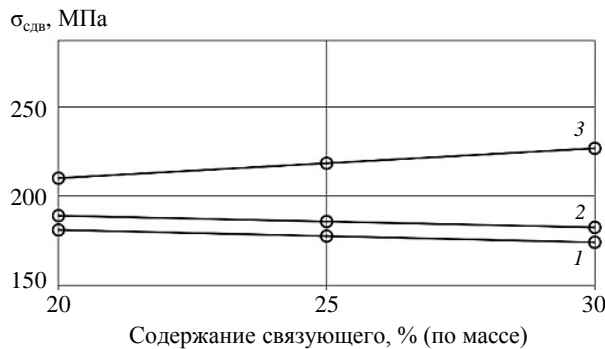


Рис. 10. Диаграммы изменения значений предела прочности при сдвиге от содержания полимерного связующего для стеклопластиков с различными вариантами армирования (см. обозначения на рис. 9)

Изменение значений предела прочности при сдвиге у всех рассмотренных стеклопластиков носит линейный характер, причем для стеклопластиков с квазиизотропным армированием (кривая 3) наблюдается небольшое их увеличение, а для стеклопластиков с однонаправленным и перекрестным армированием (кривые 1 и 2 соответственно) – незначительное уменьшение.

Предварительные термоциклические воздействия на материал приводят к уменьшению значений пределов прочности при сдвиге (рис. 11), причем, так же как и при изгибе, основное снижение прочности происходит на первой стадии ($N < 1000$ циклов) накопления внутренних изменений микроструктуры. Общее снижение значений $\tau_{сдв}$ для некоторых материалов достигает 50 % от исходного значения.

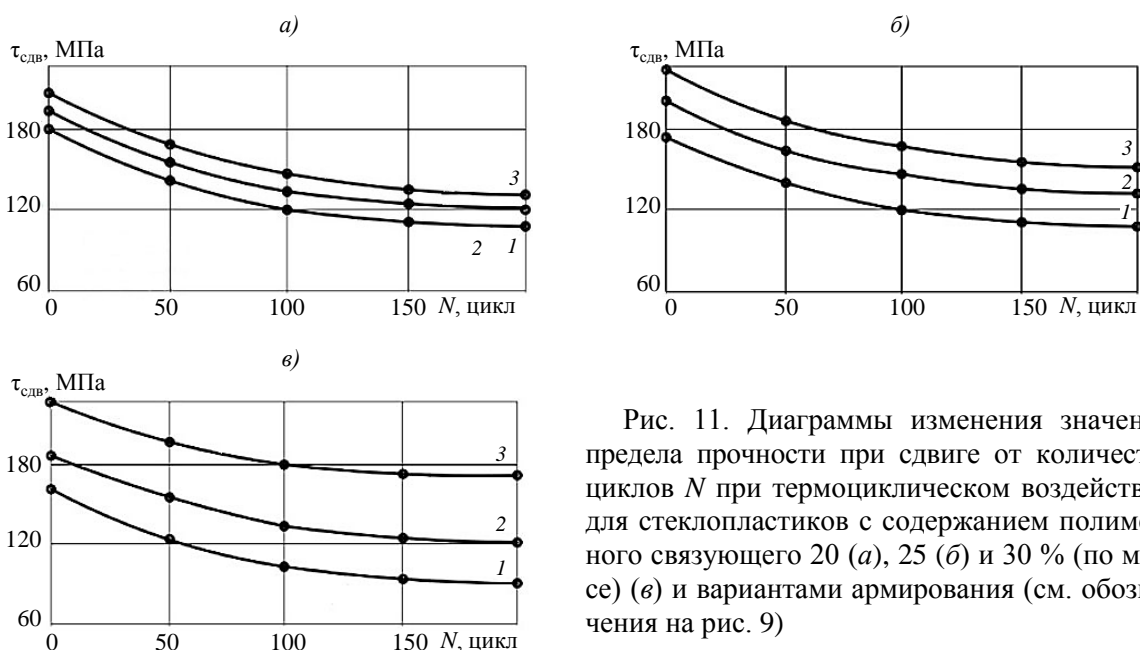


Рис. 11. Диаграммы изменения значений предела прочности при сдвиге от количества циклов N при термоциклическом воздействии для стеклопластиков с содержанием полимерного связующего 20 (а), 25 (б) и 30 % (по массе) (в) и вариантами армирования (см. обозначения на рис. 9)

Таким образом, имеет место существенное влияние предварительных термоциклических воздействий на пределы прочности при изгибе и сдвиге, объясняемое разупрочнением полимерной матрицы [13] за счет происходящих в период термоциклического воздействия химических превращений (деструкции, дополимеризации), образования микротрещин от появления тепловых напряжений и т. д., а также за счет нарушения адгезионной прочности между волокнами и полимерной матрицей из-за различия в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР), которые в основном определяют уровни возникающих в армированных материалах напряжений второго рода.

Для проведения исследований на длительную прочность образцы вырезали в направлении I (см. рис. 3) из плит размером $400 \times 400 \times 3$ мм. Образцы достаточно быстро нагружали, после чего производили замер развивающейся деформации в виде зависимостей деформации от времени $\varepsilon-t$ (при постоянном нагружении). Уровни нагрузок составляли 0,2–0,3 от соответствующего предела прочности при растяжении. Испытательная установка состояла из системы «быстрого» нагружения, устройства для замера деформации и счетчика времени. Испытания проводили при температуре 20°C и относительной влажности 80 %.

В экспериментах на длительную прочность стеклопластиков после предварительных термоциклических воздействий рассматривались материалы только после 100 циклов «нагрев–охлаждение».

Функции ползучести $J(t)$ являются линейно возрастающими функциями (рис. 12), причем для квазиизотропных стеклопластиков рост значений более заметен, чем для однонаправленных, которые из всех рассмотренных материалов обладают наименьшей прогрессирующей податливостью. Следует отметить, что изменение содержания полимерного связующего стеклопластика на 5 % (по массе) приводит к изменению значений $J(t)$ в среднем до 8 %.

Влияние предварительных термоциклических воздействий (рис. 12, б) на стеклопластики в части, касающейся ползучести, выразилось в большем росте кривых ползучести с сохранением порядка расположения полученных зависимостей (рис. 12, а), что можно объяснить в том числе снижением прочностных характеристик полимерной матрицы.

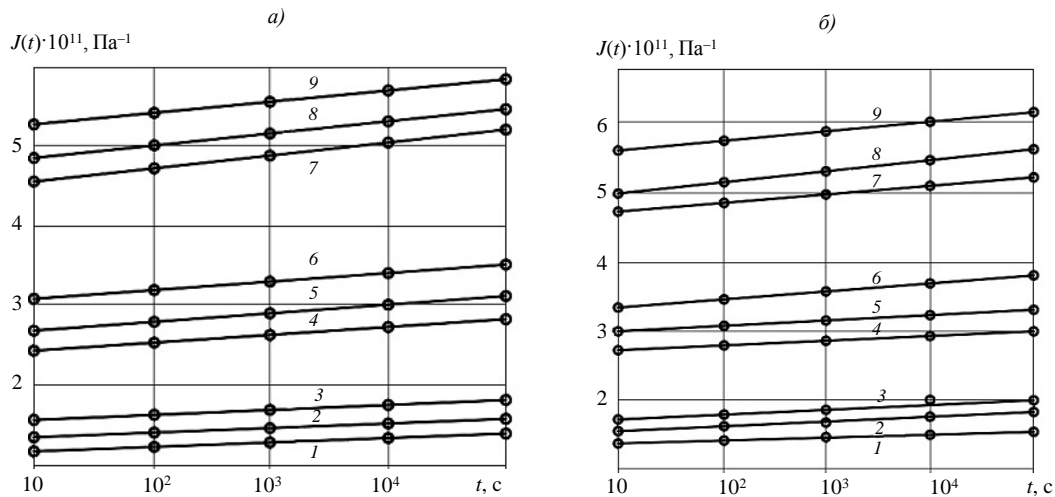


Рис. 12. Функции ползучести $J(t)$ для стеклопластиков в исходном состоянии (а) и после предварительного термоциклического воздействия ($N = 100$ циклов) (б) для образцов КС-1 (1), КС-2 (4), КС-3 (7), КС-4 (2), КС-5 (5), КС-6 (8), КС-7 (3), КС-8 (6), КС-9 (9)

Известно, что скорости деформирования оказывают существенное влияние на прочностные и упругие характеристики испытываемого материала [14], на механизм его разрушения [13]. Для металлических сплавов повышение скорости деформирования приводит в большинстве случаев к возрастанию значений пределов текучести и прочности металла [15]. Экспериментальные результаты исследования влияния скорости деформирования на прочностные свойства армированных пластиков показывают, что углепластики обладают немонотонной зависимостью прочности при растяжении от скорости нагружения, а у однонаправленных композитов прочность при ударном нагружении контролируется свойствами армирующих волокон, если соотношение модулей волокон и матрицы равно не менее 20, а сдвиговая прочность во всех случаях определяется свойствами матрицы.

При больших скоростях деформирования установлено [14], что в среднем при изменении скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ на один порядок прочность при комнатной температуре изменяется на 10–20 % у полимеров и на 5–10 % у стеклопластиков, а при повышенных температурах – на 30–40 % у полимеров и на 15–20 % у стеклопластиков.

В связи с этим исследование динамической прочности конкретных ПКМ представляет значительный интерес, так как его результаты могут повлиять на методы проектирования конструкций, работающих в условиях ударного нагружения, и, в частности, на проектирование защитных экранов ГТД. В том числе необходим учет влияния термоциклических воздействий, имеющих место в процессе реальной эксплуатации ГТД в связи с тем, что они могут внести коррективы в изменение значений характеристик динамической прочности.

Для исследования степени влияния скорости деформирования на прочностные и упругие характеристики ПКМ, а также установления зависимости динамической прочности от термоциклических воздействий использовали ту же группу стеклопластиков КС-1–КС-9 (см. таблицу). Образцы вырезали в направлении I (см. рис. 3). Испытания проводили на вертикальном копре при скоростях деформирования $\dot{\epsilon} = 2\text{--}3 \text{ с}^{-1}$. Регистрацию напряжений и деформаций, вызванных ударным нагружением, производили с помощью пьезоэлектрического датчика силы и фольговых тензодатчиков типа 2ФПКА-5-200, наклеенных на рабочую поверхность образца. Затем полученные зависимости $P = P(t)$ и $\epsilon = \epsilon(t)$ перестраивали в координаты $\sigma\text{--}\epsilon$.

Значения динамического предела прочности (σ_B^d), найденные из диаграмм σ - ϵ , с увеличением содержания связующего уменьшаются, но незначительно (рис. 13). В то же время для однонаправленных стеклопластиков наблюдается значительный рост динамического предела прочности (на ~60 %) по отношению к статическому (рис. 13, б), причем с увеличением содержания связующего отношение σ_B^d/σ_B^c увеличивается для рассмотренных материалов.

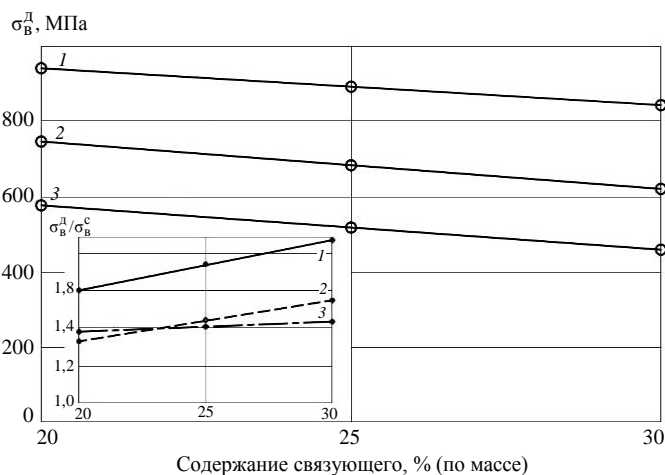


Рис. 13. Диаграммы динамического предела прочности σ_B^d и отношения σ_B^d/σ_B^c (где σ_B^c – статический предел прочности) в зависимости от содержания связующего для разных вариантов укладки (см. обозначения на рис. 9; значения σ_B^d получены при скорости деформирования $\dot{\epsilon} = 2-3 \text{ с}^{-1}$)

На рис. 14 показаны зависимости динамического модуля упругости E^d от содержания связующего, также полученные из диаграмм σ - ϵ . Видно, что значения модуля упругости немного снижаются, однако из сравнения полученных значений E^d с соответствующим статическим значением E^c видно, что наибольшее увеличение значений модуля упругости (в ~2 раза) наблюдается у квазиизотропных стеклопластиков (кривая 3 на рис. 14), а наименьшее (в 1,8 раза) – у однонаправленных стеклопластиков.

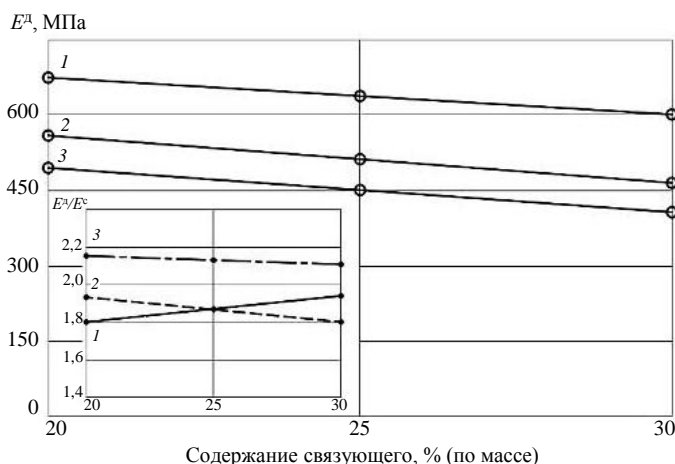


Рис. 14. Зависимость динамического модуля упругости при растяжении от содержания связующего в стеклопластиках с различными вариантами армирования (1 – однонаправленные; 2 – перекрестно армированные; 3 – квазиизотропные), а также зависимость относительного изменения модуля упругости при растяжении от содержания связующего при скорости деформирования $\dot{\epsilon} = 2-3 \text{ с}^{-1}$

Графики изменения динамического предела прочности σ_B^d от количества циклов N представлены на рис. 15 и фактически являются линейно-убывающими функциями, причем снижение значений σ_B^d в исследованном диапазоне N составляет (в зависимости от содержания связующего) для однонаправленных стеклопластиков 11–15 %, для перекрестно армированных 13–17 %, для квазиизотропных 30–35 %.

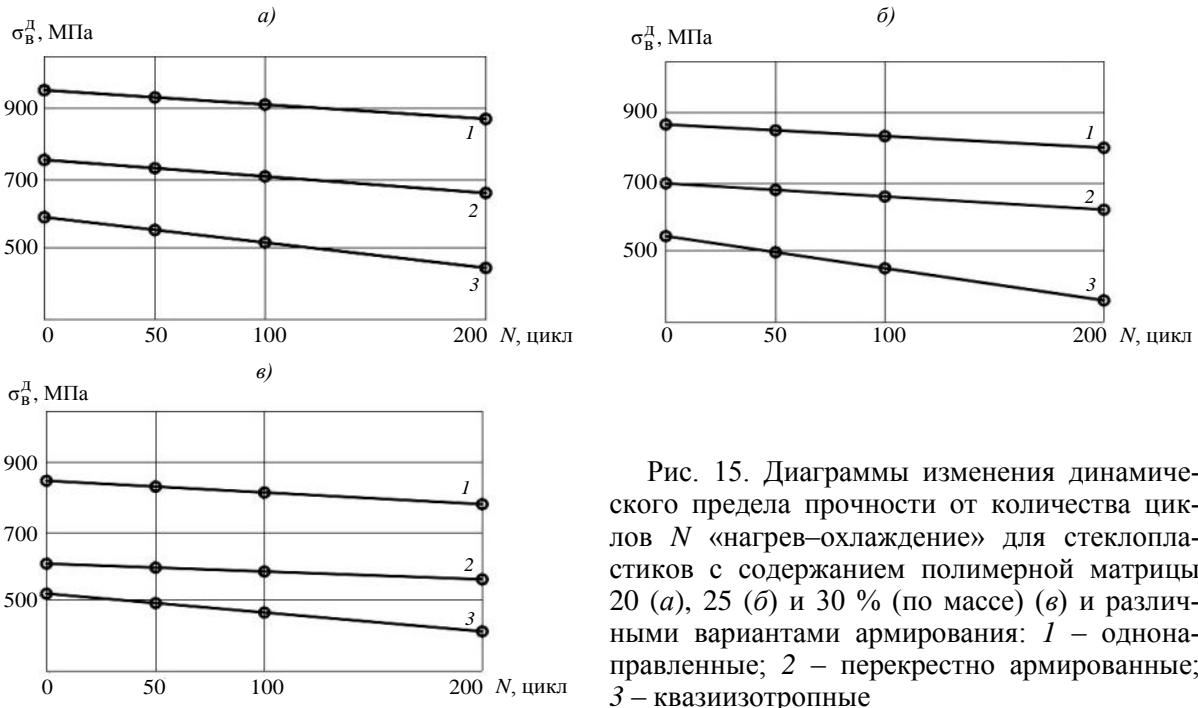


Рис. 15. Диаграммы изменения динамического предела прочности от количества циклов N «нагрев–охлаждение» для стеклопластиков с содержанием полимерной матрицы 20 (а), 25 (б) и 30 % (по массе) (в) и различными вариантами армирования: 1 – однонаправленные; 2 – перекрестно армированные; 3 – квазиизотропные

Заключения

Результаты исследования влияния термоциклических воздействий на свойства стеклопластиков, показали, что они не оказывают существенного воздействия на исследуемые стеклопластики и все показатели соответствуют требованиям, предъявляемым для эксплуатации конструктивных элементов из них.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что увеличение скорости деформирования приводит к значительному увеличению значений предела прочности при растяжении и модуля упругости. Предварительные термоциклические воздействия вызывают некоторое снижение значений прочностных и упругих динамических характеристик, что в свою очередь не сказывается отрицательно на работе стекловолоконистых ПКМ в конструкции защитных экранов или мотогондол для ГТД.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
2. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 28–34.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
4. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Гусев Ю.А., Громова А.А. Разработка конструктивно-технологического решения листового стеклопластика для обшивок хвостовых отсеков лопасти несущего винта вертолета // Труды ВИАМ. 2016. № 1 (37). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-36-41.

5. Соловьев П.В., Дмитриев Н.Н. Влияние технологических параметров и термоциклических воздействий на прочностные свойства модифицированных углепластиков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23. № 2 (84). С. 75–80.
6. Каблов Е.Н., Ерасов В.С., Панин С.В., Курс М.Г., Гладких А.В., Автаев В.В., Сорокина Н.И., Лукьянычев Д.А. Исследование совместного влияния механических нагрузок и климатических факторов на свойства материалов в составе крупногабаритной конструкции экспериментального отсека крыла после 4 лет испытаний // Докл. II Междунар. науч.-техн. конф. «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате». М.: ВИАМ, 2016. С. 6.
7. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
8. 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.
9. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Громова А.А., Гусев Ю.А. Влияние эксплуатационных факторов на основные физико-механические свойства изделия из стеклопластика ВПС-31 // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.
10. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
11. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Баранников А.А. Анизотропия свойств полимерной матрицы в композиционных материалах // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. «Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». М., 2020. С. 14–35.
12. 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.
13. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Хрульков А.В. Новое поколение материалов и технологий для изготовления лонжеронов лопастей вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2 (34). С. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
14. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 1. С. 15–21.
15. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Шелемба И.С. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.

References

1. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports of XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
2. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. On the need to create a unified information and analytical center for aviation materials of the Russian Federation. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, no. 3, pp. 28–34.
3. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. Popov Y.O., Kolokolceva T.V., Gusev Y.A., Gromova A.A. Development of the constructive and technological solution for a sheet fibreglass for tail section skins of helicopter rotor blades. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 12, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-42-49.

5. Soloviev P.V., Dmitriev N.N. Influence of technological parameters and thermal cycling effects on the strength properties of modified carbon plastics. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, vol. 23, no. 2 (84), pp. 75–80.
6. Kablov E.N., Erasov V.S., Panin S.V., Kurs M.G., Gladkikh A.V., Avtaev V.V., Sorokina N.I., Lukyanchev D.A. Investigation of the combined effect of mechanical loads and climatic factors on the properties of materials in the composition of a large-sized design of the experimental wing compartment after 4 years of testing. *Reports of II Int. sci.-tech. conf. "Corrosion, Aging, and Biostability of Materials in Marine Climates"*. Moscow: VIAM, 2016, p. 6.
7. Kablov E.N., Startsev V.O., Inozemtsev A.A. The moisture absorption of structurally similar samples from polymer composite materials in open climatic conditions with application of thermal spikes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
8. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of aviation composite materials. I. Mechanisms of aging. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2010, no. 11, pp. 19–27.
9. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Gromova A.A., Gusev Yu.A. Influence of operational factors on the main physical and mechanical properties of a fiberglass product VPS-31. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 12, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.
10. Laptev A.B., Nikolayev E.V., Kolpachkov E.D. Thermodynamic characteristics of aging of polymeric composite materials under conditions of real exploitation. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
11. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Barannikov A.A. Anisotropy of the properties of the polymer matrix in composite materials. *Proceedings of the VI All-Rus. Sci.-techn. conf. "The role of fundamental research in the implementation of strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030"*. Moscow, 2020, pp. 14–35.
12. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic 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.
13. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Khrulkov A.V. The new generation of materials and technologies for helicopter blade spars. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S2-5-9.
14. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. II. Development of methods for studying the early stages of aging. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2020, no. 1, pp. 15–21.
15. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M., Shelemba I.S. Fiber optic sensors for monitoring corrosion processes in units of aviation engineering (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.

Информация об авторах

Постнов Вячеслав Иванович, заместитель начальника филиала, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мантусова Ольга Юрьевна, инженер-технолог 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Постнова Мария Вячеславовна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баранников Александр Александрович, инженер-технолог 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vyacheslav I. Postnov, Deputy Head of USTC, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga Yu. Mantusova, Third category design engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria V. Postnova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Barannikov, Third category design engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.03.2022.

The article was submitted 09.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 23.03.2022.