



УДК 620.165.79

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-12-12

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС СТАРЕНИЯ НОВЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ МОТОГОНДОЛЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Е.В. Николаев

Т.Г. Коренькова

А.К. Шведкова

Е.О. Валевин

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Е.В. Николаев¹, Т.Г. Коренькова¹, А.К. Шведкова¹, Е.О. Валеви¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС СТАРЕНИЯ НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОТОГОНДОЛЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Показаны выбор и обоснование режимов теплового старения полимерных композиционных материалов (ПКМ), предназначенных для деталей двигателя авиационного назначения. Проведено исследование изменения прочности ПКМ при изгибе, сжатии и межслоевом сдвиге, интервала и температуры стеклования при различных температурах в исходном состоянии и после воздействия теплового старения. По результатам исследования зависимости прочности от температуры испытаний, значений интервала и температуры стеклования определены режимы теплового старения материалов и наиболее чувствительная прочностная характеристика к воздействию температуры – прочность при межслоевом сдвиге.

По выбранным режимам теплового старения проведено исследование изменения прочности при межслоевом сдвиге ПКМ в зависимости от температуры и продолжительности экспозиции. Определено влияние температуры предполагаемой эксплуатации и температуры, значительно превышающей ее. Выявлено влияние температуры от продолжительности экспозиции.

Ключевые слова: *полимерные композиционные материалы, тепловое старение, структурные превращения, прочность при изгибе, сжатии и межслоевом сдвиге, область и температура стеклования.*

E.V. Nikolaev, T.G. Korenkova, A.K. Shvedkova, E.O. Valevin

RESEARCH OF AN INFLUENCE OF TEMPERATURE FACTORS ON AGING OF NEW POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR AVIATION ENGINE NACELLE

The choice and substantiation of conditions of thermal aging of polymer composite materials intended for aviation components were described in the paper. Researches of changes in PCM strength at compression, interlayer shift and bending, and in glass-transition area and temperature were conducted at various test temperatures both in an initial state and after an impact of

thermal aging. Conditions of thermal aging of materials and a strength characteristic most sensitive to temperature influence, i.e. strength at interlayer shift were defined by the results of research of a «strength/test temperatures» dependence and glass-transition area and temperature. Strength of polymer composite materials at interlayer shift was defined depending on temperature and exposition duration within the chosen conditions of thermal aging. An influence of some assumed operation temperatures and considerably higher temperatures was defined. An influence of temperature depending on the exposition duration was revealed.

Keywords: *polymer composite materials, thermal aging, structural transformations, strength at bending, compression and interlayer shift, glass-transition area and temperature.*

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

С совершенствованием технологий создания полимерных композиционных материалов (ПКМ) и увеличением значений их рабочих характеристик [1–5] их применение в конструкциях авиационной техники увеличилось с 2 (истребитель армии США компании «Макдоннел–Дуглас» – F-15, 1972 г.) до >50% (пассажирский лайнер Boeing 787, 2009 г.) [6, 7], а в некоторых случаях достигает 70% (транспортный конвертоплан Bell V-22 Osprey, 1989 г.). Применение ПКМ в авиационной технике способствует уменьшению массы изделия, повышению весовой нагрузки и скорости полета, снижению расхода топлива и затрат на эксплуатацию.

Однако климатические факторы окружающей среды оказывают негативное воздействие на физико-механические характеристики ПКМ [8, 9]. К основным климатическим факторам, влияющим на рабочие характеристики ПКМ, относятся температура и влажность окружающей среды [10–13].

В рамках создания перспективного двигателя ПД-14 для ближне-среднемагистрального самолета МС-21 производства ОАО «Корпорация Иркут» будет разработана мотогондола двигателя, состоящая на 65% из ПКМ. В мотогондоле двигателя одним из основных воздействующих факторов на физико-механические характеристики ПКМ является температура эксплуатации, при воздействии которой в материалах протекают процессы старения в полимерной матрице [14], которые в свою очередь влияют на ресурс и срок службы материала в составе изделия.

В существующей нормативной документации показаны общие подходы к порядку проведения испытаний, что не позволяет оценить ресурс материала при температурах эксплуатации в составе изделия. В данной работе представлен подход к выбору и обоснованию температур старения ПКМ для последующего расчета энергии активации процесса теплового старения и ресурса ПКМ в составе изделия.

Для выбора и обоснования режимов теплового старения ПКМ, предназначенных для изготовления мотогондолы двигателя ПД-14, проведено исследование изменения прочности при изгибе, сжатии и межслоевом сдвиге при различных температурах испытаний, интервала и температуры стеклования ПКМ в исходном состоянии и после воздействия теплового старения.

Материалы и методы

Для проведения исследований выбраны ПКМ нового поколения [15], предназначенные для изготовления мотогондолы двигателя ПД-14:

- углепластик ВКУ-39 на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродной ткани Porcher (арт. 3692);
- стеклопластик ВПС-48/7781 на основе связующего ВСЭ-1212 и стеклоткани Porcher (арт. 7781);
- углепластик ВКУ-27ТР на основе связующего ВСТ-1208 и углеродной ткани Porcher (арт. 3105);
- стеклопластик ВПС-47/7781 на основе связующего ВСТ-1208 и углеродной ткани Porcher (арт. 7781).

Из панелей углепластиков ВКУ-39 и ВКУ-27ТР и стеклопластиков ВПС-47/7781 и ВПС-48/7781 размером 300×300×2,5 мм изготовлены образцы для определения прочности:

- при изгибе по ASTM D7264/D7264M размером 15×5×2,5 мм;
- при сжатии по ASTM D6641/D6641M размером 140×12×2,5 мм.

Из панелей углепластиков ВКУ-39 и ВКУ-27ТР и стеклопластиков ВПС-47/7781 и ВПС-48/7781 размером 300×300×4 мм изготовлены образцы размером 155×13×4 мм – для определения прочности при межслоевом сдвиге по ASTM D2344/D2344M.

Тепловое старение проводили согласно СТП 1-595-11-101–83.

Определение прочности при сжатии и межслоевом сдвиге проводили на испытательной машине TERA test 2200, при изгибе – на TERA test 2300.

Определение интервала и температуры расстекловывания проводили с использованием прибора TMA 202 C по ASTM E 228–85.

Испытания образцов угле- и стеклопластиков на основе связующих ВСЭ-1212 и ВСТ-1208 на прочность при сжатии, изгибе и межслоевом сдвиге в исходном состоянии и после теплового старения проводили при различных температурах:

- для углепластика ВКУ-27ТР и стеклопластика ВПС-47/7781 – температуры испытаний 20, 160 (предполагаемая температура эксплуатации), 180 и 200°C;
- для стеклопластика ВПС-48/7781 – температуры физико-механических испытаний 20, 120 (предполагаемая температура эксплуатации), 140 и 160°C;
- для углепластика ВКУ-39 – температуры физико-механических испытаний 20, 120 (максимально допустимая температура эксплуатации), 150 и 170°C.

Результаты

Согласно существующей нормативной документации для расчета энергии активации процесса старения необходимо получить монотонно падающую кривую кинетики изменения свойств материала при воздействии температуры, для чего надо определить наиболее чувствительную прочностную характеристику.

На рис. 1 приведена кинетика изменения прочностных характеристик ПКМ в зависимости от температуры испытаний.

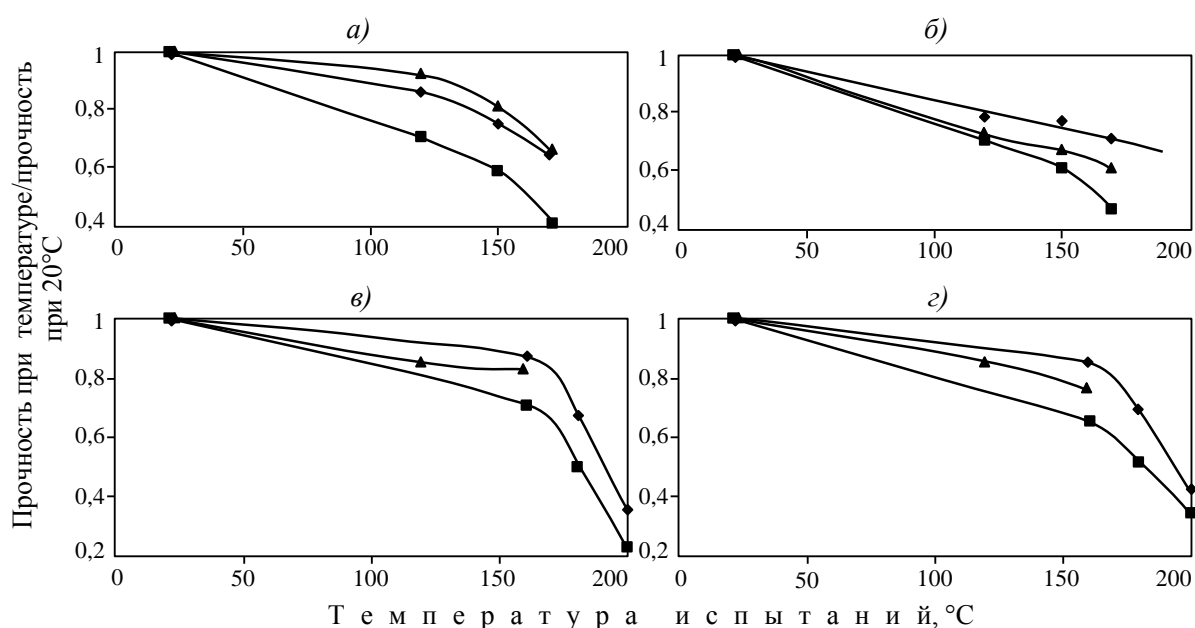


Рис. 1. Температурная зависимость изменения прочностных характеристик (изгиб (◆), сдвиг (■), сжатие (▲)) полимерных композиционных материалов марок ВКУ-39 (а), ВПС-48/7781 (б), ВКУ-27ТР (в) и ВПС-44/7781 (г)

В углепластике ВКУ-39 и стеклопластике ВПС-48/7781 на основе связующего ВСЭ-1212 при температуре $>150^{\circ}\text{C}$ наблюдается резкое снижение прочности, в углепластике ВКУ-27ТР и стеклопластике ВПС-47/7781 на основе связующего ВСТ-1208 – при температуре $>160^{\circ}\text{C}$. Резкое снижение прочности ПКМ объясняется тем, что выше данных температур начинается процесс расстекловывания полимерной матрицы, с увеличением температуры повышается скорость перегруппировки сегментов макромолекул под действием прилагаемой нагрузки [16], что может приводить к снижению прочности.

Результаты исследования показывают, что для данных материалов прочность при трехточечном изгибе менее чувствительна к воздействию температуры, чем прочность при сжатии и межслоевом сдвиге. Прочность при межслоевом сдвиге более чувствительна к воздействию температуры, чем прочность при сжатии. Это может объясняться тем, что при испытаниях на прочность при межслоевом сдвиге разрушение материала, т. е. образование и рост трещин, происходит в полимерной матрице и межфазном слое, при этом на образование и рост трещины затрачивается меньше энергии, чем при испытании на сжатие, во время которого разрушающая нагрузка воздействует на полимерную матрицу и наполнитель, за счет наполнителя замедляется рост трещин, увеличивается площадь и длина трещин, вследствие этого затраты энергии на разрушение материала увеличиваются [17, 18].

В таблице приведены интервалы и температуры стеклования для материалов ВКУ-39, ВПС-48/7781, ВКУ-27ТР и ВПС-47/7781 в исходном состоянии.

Интервалы и температуры стеклования для материалов ВКУ-39, ВПС-48/7781, ВКУ-27ТР и ВПС-47/7781 в исходном состоянии

Материал	Температура/интервал стеклования, $^{\circ}\text{C}$
ВКУ-39	$\frac{167}{150-180(30)}$
ВПС-48/7781	$\frac{167}{148-180(37)}$
ВКУ-27ТР	$\frac{182}{155-200(45)}$
ВПС-47/7781	$\frac{180}{160-200(40)}$

Нижняя граница интервала стеклования составляет 150°C для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 и 160°C для углепластика ВКУ-27ТР и стеклопластика ВПС-47/7781, которые совпадают с началом резкого снижения прочности.

По результатам исследования зависимости прочности от температуры испытаний, интервала и температуры стеклования определены режимы теплового старения материалов:

– для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 на основе связующего ВСЭ-1212 – температуры 130, 140, 150 и 160°C;

– для углепластика ВКУ-27ТР и стеклопластика ВПС-47/7781 на основе связующего ВСТ-1208 – температуры 160, 170, 180 и 190°C.

По выбранным режимам теплового старения проведено исследование изменения прочности при межслоевом сдвиге ПКМ в зависимости от температуры и продолжительности экспозиции.

На рис. 2 приведена кинетика изменения прочности при межслоевом сдвиге для углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48.

При воздействии температур старения 130, 140 и 150°C прочность при межслоевом сдвиге у углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48 в течение 2000 ч экспозиции практически не меняется. При температуре старения 160°C прочность при сдвиге в течение 2000 ч экспозиции снижается на 8% для стеклопластика ВПС-48 и на 15% для углепластика ВКУ-39. Такое изменение прочности при сдвиге связано с тем, что при температурах старения 130, 140 и 150°C процесс теплового старения полимерной матрицы протекает с меньшей скоростью, чем при 160°C [19, 20].

На рис. 3 приведена кинетика изменения прочности при межслоевом сдвиге для углепластика ВКУ-27ТР и стеклопластика ВПС-47.

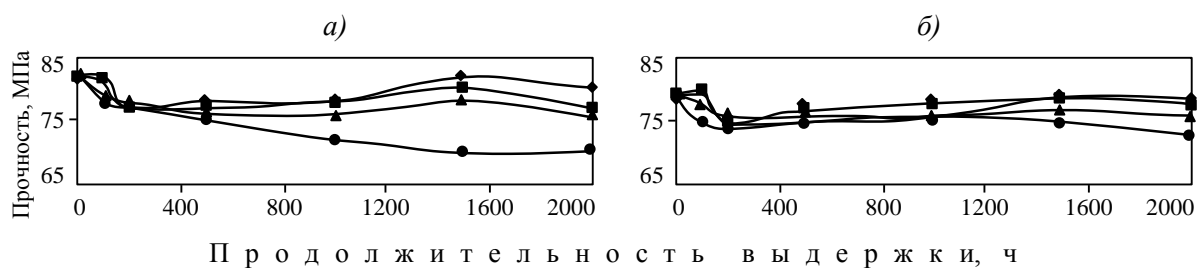


Рис. 2. Изменение прочности при межслоевом сдвиге в зависимости от продолжительности выдержки для углепластика ВКУ-39 (а) и стеклопластика ВПС-48 (б) после старения при температуре 130 (◆), 140 (■), 150 (▲) и 160°C (●)

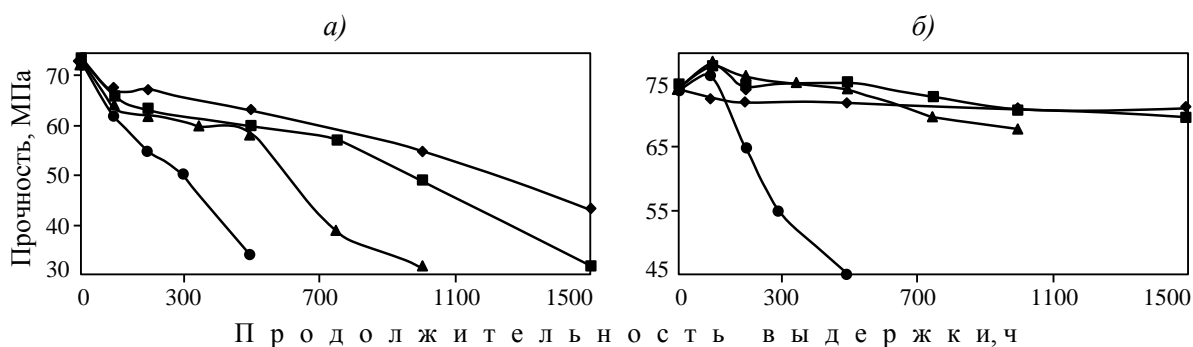


Рис. 3. Изменение прочности при межслоевом сдвиге в зависимости от продолжительности выдержки для углепластика ВКУ-27ТР (а) и стеклопластика ВПС-47 (б) после старения при температуре 160 (◆), 170 (■), 180 (▲) и 190°C (●)

Для углепластика ВКУ-27ТР после 1500 ч экспозиции при температуре старения 160°C прочность при межслоевом сдвиге снижается на 41%, при 170°C – на 56%; при температуре теплового старения 180°C в течение 500 ч определено снижение прочности на 58%, при достижении 1000 ч экспозиции – до уровня 45% от исходного значения. Это объясняется протеканием двух параллельных процессов старения в полимерной матрице и образованием новых связей за счет процессов тепловой деструкции и релаксации напряжений. Данные процессы на различных этапах теплового старения протекают с различной скоростью.

При температуре старения 190°C в течение 500 ч прочность при межслоевом сдвиге монотонно падает до уровня 47% от исходного значения, что объясняется преобладанием процессов старения над другими параллельными процессами.

Для стеклопластика ВПС-47 в течение 100 ч экспозиции при температурах старения 170, 180 и 190°C наблюдается незначительное повышение прочности, что объясняется протеканием процесса релаксации напряжений в полимерной матрице. При температуре 170°C после 100 ч экспозиции прочность при межслоевом сдвиге начинает снижаться и при достижении 1000 ч экспозиции возвращается к уровню исходного значения и не меняется в течение еще 500 ч экспозиции. При температуре старения 160°C в течение 1500 ч экспозиции прочность при межслоевом сдвиге остается на уровне исходных значений. Это объясняется тем, что при температуре 160°C (рабочая температура материала) и 170°C процесс теплового старения протекает с низкой скоростью и не оказывает значительного влияния на прочность при межслоевом сдвиге в течение данной продолжительности экспозиции. При температуре старения 180°C прочность

при межслоевом сдвиге после 100 ч экспозиции начинает снижаться и при достижении 1000 ч экспозиции составляет 68% от исходного значения, что объясняется преобладанием процесса старения над процессами релаксации и образования новых связей. При температуре старения 190°C прочность при межслоевом сдвиге после 100 ч экспозиции начинает снижаться и при достижении 500 ч экспозиции составляет 61% от исходного значения. Температура 190°C значительно превышает температуру предполагаемой эксплуатации, процесс теплового старения преобладает над процессами релаксации и перестроения структуры.

Обсуждение и заключения:

- при выборе температур теплового старения необходимо применять комплексный подход, сочетающий теплофизические и физико-механические методы;
- температура, необходимая для проведения теплового старения, должна быть равной или выше предполагаемой температуры эксплуатации;
- прочность при межслоевом сдвиге является наиболее чувствительной характеристикой к воздействию температуры для исследованных материалов;
- уменьшение прочности зависит от температуры и продолжительности экспозиции при тепловом старении;
- при температуре старения выше температуры эксплуатации процессы старения преобладают над процессами релаксации и образования новых связей;
- материалы на основе связующего ВСЭ-1212 показали более высокую стойкость к тепловому старению по сравнению с материалами на основе связующего ВСТ-1208.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М. Туманов А.Т. – инициатор создания композитов /В сб. тезисов докл. Межотраслевой науч.-технич. конф. «Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении». 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. 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.
6. Mishra G., Mohapatra S.R., Behera P.R., Dash B., Mohanty U.K., Ray B.C. (National Institute Technology, Rourkela, India) Aircraft Eng. and Aerosp. technol. 2010. V. 82. №4. P. 258–266.
7. 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; distribution unlimited. 88ABW-2012-0190, 10 January 2012.
8. Espec Technology Report. 2007. №25.
9. 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.
10. 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. №S. С. 412–423.
11. 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.
12. 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. 2013. №1. Ст. 05 (viam-works.ru).
13. Скрылёв Н.С., Вольный О.С., Постнов В.И., Барботько С.Л. Исследование влияния тепловых факторов климата на изменение характеристик пожаробезопасности полимерных композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №9. Ст. 05 (viam-works.ru).
14. Кириллов В.Н., Ефимов В.А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 379–388.
15. Григорьев М.М., Коган Д.И., Твердая О.Н., Панина Н.Н. Особенности изготовления ПКМ методом RFI //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 03 (viam-works.ru).
16. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия. 1977. Т. 3. С. 491–492.
17. Менсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты. М.: Химия. 1979. С. 200–202.
18. Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнев В.Н. Принципы создания композиционных материалов. М.: МИХМ. 1989. 85 с.
19. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия. 1971. Т. 2. С. 627–633.
20. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной нерав-

новесности и градиент свойств по толщине //Деформация и разрушение материалов. 2012. №6. С. 17–19.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 7–17.
2. Kablov E.N., Gunjaev G.M. Tumanov A.T. – iniciator sozdaniya kompozitov [Tumanov A.T. – Initiator of the composites] /V sb. tezisov dokl. Mezhotraslevoj nauch.-tehnič. konf. «Kompozicionnye materialy v aviakosmicheskom materialovedenii». M.: VIAM. 2009. S. 6–9.
3. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticeskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. III. Znachimye faktory starenija [Climatic aging of composite materials aviation applications. III. Significant factors of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2011. №1. S. 34–40.
4. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [New polymeric binders for advanced manufacturing methods of structural fiber PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
5. Kirillov V.N., Vapirova Ju.M., Drozd E.A. Issledovanie atmosfernoj stojkosti polimernyh kompozicionnyh materialov v uslovijah atmosfery teplogo vlazhnogo i umerenno teplogo klimata [The study of atmospheric resistance of polymer composite materials in the atmosphere warm, moist and moderately warm climate] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 31–38.
6. Mishra G., Mohapatra S.R., Behera P.R., Dash B., Mohanty U.K., Ray B.C. (National Institute Technology, Rourkela, India) Aircraft Eng. and Aerosp. technol. 2010. V. 82. №4. P. 258–266.
7. 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; distribution unlimited. 88ABW-2012-0190, 10 January 2012.
8. Espec Technology Report. 2007. №25.
9. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticeskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. I. Mehanizmy starenija [Climatic aging of composite materials aviation applications. I. Mechanisms of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2010. №11. S. 19–27.
10. Kirillov V.N., Starcev O.V., Efimov V.A. Klimaticeskaja stojkost' i povrezhdaemost' polimernyh kompozicionnyh materialov, problemy i puti reshenija [Weather resistance and defectiveness of polymer composite materials, problems and solutions] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 412–423.

11. Nikolaev E.V., Kirillov V.N., Skirta A.A., Grashhenkov D.V. Issledovanie zakonomernostej vlagoperenosa i razrabotka standartov po opredeleniju koeficienta diffuzii i predel'nogo vlagosoderzhanija dlja ocenki mehanicheskikh svojstv ugleplastikov [Study patterns of moisture transfer and development of a standard to determine the diffusion coefficient and limit the moisture content to assess the mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 44–48.
12. Efimov V.A., Shvedkova A.K., Koren'kova T.G., Kirillov V.N. Issledovanie polimernyh konstrukcionnyh materialov pri vozdejstvii klimaticeskikh faktorov i nagruzok v laboratornyh i naturnyh uslovijah [The study of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and stress in laboratory and field conditions] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 05 (viam-works.ru).
13. Skryljov N.S., Vol'nyj O.S., Postnov V.I., Barbot'ko S.L. Issledovanie vlijaniya teplovyh faktorov klimata na izmenenie harakteristik pozharobezopasnosti polimernyh kompozicionnyh materialov [Investigation of the influence thermal factors of climate change on fire safety characteristics of polymer composite materials] //Trudy VIAM. 2013. №9. St. 05 (viam-works.ru).
14. Kirillov V.N., Efimov V.A. Problemy issledovaniya klimaticeskoy stojkosti aviacionnyh nemetallicheskih materialov [Problems of research aircraft climatic resistance of nonmetallic materials] /V kn. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007. M.: VIAM. 2007. S. 379–388.
15. Grigor'ev M.M., Kogan D.I., Tverdaja O.N., Panina N.N. Osobennosti izgotovlenija PKM metodom RFI [Peculiarities of RMB by RFI] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 03 (viam-works.ru).
16. Jenciklopedija polimerov [Encyclopedia of polymer]. M.: Sovetskaja jenciklopedija. 1977. T. 3. S. 491–492.
17. Menson Dzh., Sperling L. Polimernye smesi i kompozity [Polymer blends and composites]. M.: Himija. 1979. S. 200–202.
18. Simonov-Emel'janov I.D., Kuleznev V.N. Principy sozdaniya kompozicionnyh materialov [Principles of creation of composite materials]. M.: MIHM. 1989. 85 s.
19. Jenciklopedija polimerov. M.: Sovetskaja jenciklopedija [Encyclopedia of polymer]. 1971. T. 2. S. 627–633.
20. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticeskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. II. Relaksacija ishodnoj strukturnoj neravnovesnosti i gradient svojstv po tolshhine [Climatic aging of composite materials aviation applications. II. Relaxation of the original structural and non-equilibrium properties of gradient across the thickness] //Deformacija i razrushenie materialov. 2012. №6. S. 17–19.