



УДК 539.217.3:539.219.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-8-8

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОПЕРЕНОСА
УГЛЕПЛАСТИКА АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ НАТУРНОЙ
КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ**

А.С. Фролов

С.В. Панин

Июль 2014

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.

А.С. Фролов¹, С.В. Панин¹

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОПЕРЕНОСА УГЛЕПЛАСТИКА АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ НАТУРНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ

Выполнено сравнение параметров влагопереноса для углепластика авиационного назначения на основе препрега фирмы Hexcel, рассчитанных с помощью аддитивной модели влагопереноса, на начальной стадии натурной климатической экспозиции. Обнаружены признаки разрушения эпоксидного связующего в поверхностном слое углепластика на глубине до 10 мкм. Проведен анализ влияния полученных разрушений на показатели влагопереноса углепластика.

Ключевые слова: *углепластик, влагоперенос, климатическое старение, диффузия влаги, предельное влагонасыщение.*

A.S. Frolov, S.V. Panin

EARLY STAGES OF ENVIRONMENTAL DEGRADATION INVESTIGATED BY MOISTURE TRANSFER PARAMETERS OF CFRP USED FOR AEROSPACE APPLICATIONS

Moisture transfer parameters were evaluated for Hexcel CFRP, used in aerospace applications. The additive moisture transfer model was used to investigate the early stages of environmental degradation. After 6 month of outdoor exposure in warm temperate maritime climate initial stages of polymer degradation were discovered in surface layer less than 10 μm. Influence of CFRP degradation on the moisture transfer parameters was evaluated.

Keywords: *carbon fiber reinforced plastic (CFRP), moisture transfer, environmental degradation, diffusion, moisture-holding capacity.*

¹ Федеральное 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

В аэрокосмическом и автомобильном секторах экономики увеличивается спрос на использование полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе и углепластиков [1, 2]. В последние годы наблюдается скачкообразный рост применения

углепластиков в конструкциях гражданских самолетов [3, 4]. Характерным примером являются самолеты семейства Boeing 787 Dreamliner, фюзеляж, лопадки турбины, форсунки которых на 50% изготовлены из композиционных материалов. В самолетах Airbus 350, Bombardier C Series и других часть конструкций фюзеляжа также изготовлена из ПКМ. В настоящее время ведутся работы по вводу в эксплуатацию среднемагистрального самолета МС-21, крыло которого целиком выполнено из углепластика. В модернизированном среднемагистральном пассажирском самолете Ту-204СМ рули высоты и направления, а также элементы механизации крыла изготовлены из углепластиковых композиционных материалов фирмы Hexcel.

Для авиастроения важны такие материалы, свойства которых незначительно изменяются в процессе эксплуатации. В связи с этим, представляют интерес такие методы диагностики композиционных материалов, которые крайне чувствительны даже к незначительным изменениям свойств. В частности, таким показателем является один из параметров влагопереноса – коэффициент диффузии влаги [5].

Целью данной работы является оценка параметров влагопереноса углепластиков на основе препрега HexPly 8552 фирмы Hexcel на начальной стадии натурной климатической экспозиции для проверки гипотезы о том, что параметры влагопереноса являются чувствительными показателями накопления повреждений на начальной стадии климатического старения материала. В соответствии с выбранной целью поставлены следующие задачи: расчет параметров влагопереноса для исходных образцов углепластика и для образцов, прошедших стадию натурной климатической экспозиции; оценка влияния полученных разрушений материала в процессе экспозиции на параметры влагопереноса.

Модель влагопереноса в ПКМ

Для расчета параметров влагопереноса различных материалов обычно используют модели, основанные на втором законе Фика [5–7]. Однако при расчете параметров влагопереноса в ПКМ обнаружено, что диффузия влаги в ПКМ часто носит отличающийся от этого закона характер. Это объясняется протеканием различных процессов в ПКМ при взаимодействии с влагой (пластификация связующего, химические реакции гидролиза и доотверждения связующего, релаксация напряжений, образование и развитие микрповреждений) [5, 6, 8–11]. Влияние сторонних процессов можно отделить, если разбить сорбционную задачу на стадии «сорбции» и «десорбции». В этом случае считаем, что на стадии десорбции все неравновесные процессы отсутствуют [5, 6]. Опреде-

ляем диффузионные параметры на стадии десорбции с использованием второго закона Фика (1) в одномерном приближении с постоянными граничными условиями:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l, \quad t > 0; \quad (1)$$

$$c(x, t)|_{t=0} = c_0, \quad c(x, t)|_{x=0} = m_0; \quad c(x, t)|_{x=l} = m_0;$$

$$M(t) = \int_0^l c(x, t) dx,$$

где c – концентрация влаги в единице объема образца; c_0 – начальное значение концентрации влаги при $t \rightarrow 0$; m_0 – значение концентрации влаги на границах образца; x – координата, вдоль которой диффундирует влага, мм; l – характерная толщина образца, мм; t – продолжительность сушки, сут; D – коэффициент диффузии, мм²/сут; $M(t)$ – влагосодержание модельного образца длиной L , шириной W и толщиной h в момент времени t .

Рассчитываем изменение массы для каждой i -й формы в десорбционном эксперименте. Аппроксимируем значения прироста массы в зависимости от продолжительности сушки с помощью уравнения (2) и находим предельную убыль массы и коэффициент диффузии:

$$M(t) = \begin{cases} C_0 + 2(2M_0 - C_0) \sqrt{\frac{dt}{\pi}}, & t < \tau; \\ M_0 + 8(C_0 - M_0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-n_k^2 dt}}{n_k^2}, & t \geq \tau, \end{cases} \quad (2)$$

где $n_k = \pi(2k+1)$; M_0 – предельная убыль массы; C_0 – начальная убыль массы; $dt = Dt/l^2$ – влажностной аналог числа Фурье, где D – коэффициент диффузии, мм²/сут; t – продолжительность увлажнения или сушки, сут; τ – продолжительность смены вида формулы, составляет ~ 1 сут; l – длина диффузионного пути, см.

Длина диффузионного пути вычисляется по формуле (3):

$$\frac{1}{l_i^2} = \frac{1}{L_i^2} + \frac{1}{W_i^2} + \frac{1}{h_i^2}, \quad (3)$$

где L – длина стороны вдоль основного направления армирования образца, мм; W, h – соответственно ширина и толщина образца, мм.

Одним из существенных факторов, влияющих на рассчитанные параметры, является наличие дефектной кромки [12], образующейся при вырезке образцов (рис. 1); размеры кромки задаются параметрами r_L и r_W . Поэтому для оценки влияния кромки используется набор образцов с различными линейными размерами.

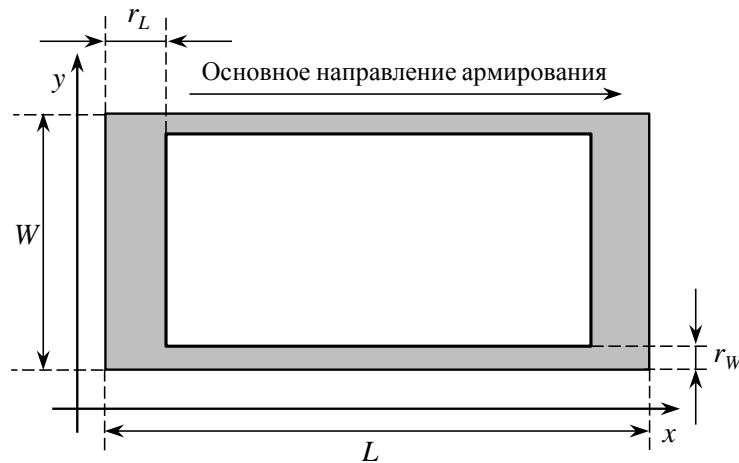


Рисунок 1. Образец длиной L и шириной W с характерной поврежденной кромкой на краях (■); □ – неповрежденная часть образца

Полученный предельный прирост массы как функция глубины поврежденного слоя аппроксимируется соотношением (4):

$$M_0 = M_1 + \frac{M_2}{L} + \frac{M_3}{W} + \frac{M_4}{LW}, \quad (4)$$

где M_1 – предельное влагосодержание неповрежденной части образцов; M_2, M_3, M_4 – поправочные коэффициенты предельного влагосодержания.

Дополнительные параметры также вносятся в расчет коэффициента диффузии (5):

$$D = D_0 + d_h h + d_{LW} 2 \frac{(L+W)}{(LW)}, \quad (5)$$

где D_0 – коэффициент диффузии неповрежденной части, мм²/сут, d_h – доля коэффициента диффузии, учитывающая изменение толщины, мм/сут; d_{LW} – доля коэффициента диффузии, учитывающая влияние поврежденной кромки по длине и ширине образца, мм³/сут.

Найденные диффузионные параметры на стадии десорбции фиксируем и рассчитываем предполагаемый прирост массы на стадии сорбции с использованием найденных параметров. Рассчитываем разницу экспериментальных и смоделированных значений на стадии сорбции:

$$Y_{rc}(t) = M_c(t) - M(t), \quad (6)$$

где $M(t)$ – влагосодержание при моделировании диффузионной части сорбционного эксперимента с параметрами материала ($C_0, M_1, M_2, M_3, M_4, D_0, d_h, d_{LW}$), найденными из десорбционного эксперимента с помощью модели (2); $M_c(t)$ – влагосодержание при сорбционном эксперименте.

Полученная разность $Y_{rc}(t)$ аппроксимируется суммой слагаемых структурной релаксации и химической реакции, активируемых влагой:

$$\begin{aligned} Y_{rc}(t) &= Y_r(t) + Y_c(t); \\ Y_r(t) &= A(1 - \exp[-tk_1])(B + \exp[-tk_2]), \\ Y_c(t) &= \frac{C}{1 + \exp[-(t-T_0)k_3]}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $Y_r(t)$ – релаксационная составляющая; $Y_c(t)$ – слагаемое, ответственное за протекание химических реакций; A – константа начального значения показателя релаксации; B – величина разности между влагонасыщением и убылью массы, при которой стабилизируются релаксационные процессы; k_1, k_2 – скорости релаксации, 1/сут; C – разность между предельным влагонасыщением, найденным в десорбционном эксперименте, и предельным влагонасыщением на стадии сорбции; T_0 – продолжительность наиболее интенсивной химической реакции, сут; k_3 – константа скорости химической реакции, 1/сут.

Экспериментальная часть

В данном эксперименте оценивались параметры влагопереноса однонаправленного углепластика на основе связующего HexPly 8552 фирмы Hexcel и наполнителя – однонаправленной углеродной ленты UD134/AS-4-12k. Экспонирование образцов проводилось в ГЦКИ им. Г.В. Акимова – филиале ФГУП «ВИАМ».

Из исходной и экспонированной пластин углепластика вырезали образцы в виде пластин следующих размеров: 10×10 мм², 25×25 мм², 50×50 мм², 100×10 мм², 100×25 мм², 100×50 мм², 10×100 мм², 25×100 мм², 50×100 мм², где первая цифра – длина стороны вдоль основного направления армирования ортотропного материала. Данный набор образцов разных геометрических размеров нужен для того, чтобы оценить влияние поврежденной кромки. Приготовлено по 10 наборов образцов по 3 штуки в каждом из исходной и экспонированной пластин.

Все образцы были предварительно высушены над прокаленным силикагелем при повышенной температуре до стабилизации массы и толщины образцов. После этого, образцы были разложены в закрытом эксикаторе над свободной поверхностью воды, избегая соприкосновения образцов, и помещены в термокамеру с постоянной температурой ($60 \pm 2^\circ\text{C}$) и относительной влажностью $99 \pm 1\%$. Периодически производилось измерение массы и толщины образцов до стабилизации массы и толщины (стадия «сорбция»). Затем при постоянной температуре ($60 \pm 2^\circ\text{C}$) образцы высушивали над прокаленным силикагелем, также проводя измерение массы и толщины образцов, до стабилизации массы и толщины (стадия «десорбция»).

С помощью микроскопа «Olympus» с лазерной сканирующей системой «LEXT» определены профили поверхности образцов.

Результаты эксперимента

При сравнении кривых изменения массы на стадиях сорбции или десорбции влаги образцов одинаковых размеров, но по-разному разрезанных относительно основного направления армирования (рис. 2), можно сделать вывод, что ширина поврежденной кромки различна относительно основного направления армирования при однонаправленном армировании ($r_L > r_W$) (см. рис. 1).

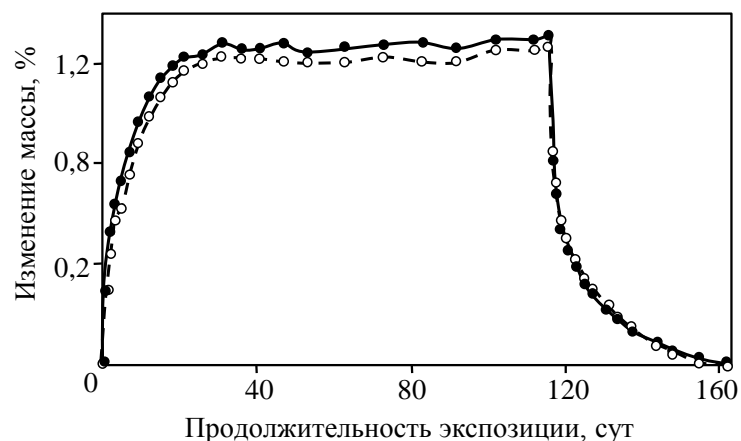


Рисунок 2. Изменение массы образцов одинаковых размеров, но по-разному разрезанных относительно основного направления армирования, на примере образцов размерами 100×10 (○) и 10×100 мм (●) после стадии экспозиции, где первая цифра – длина стороны вдоль основного направления армирования

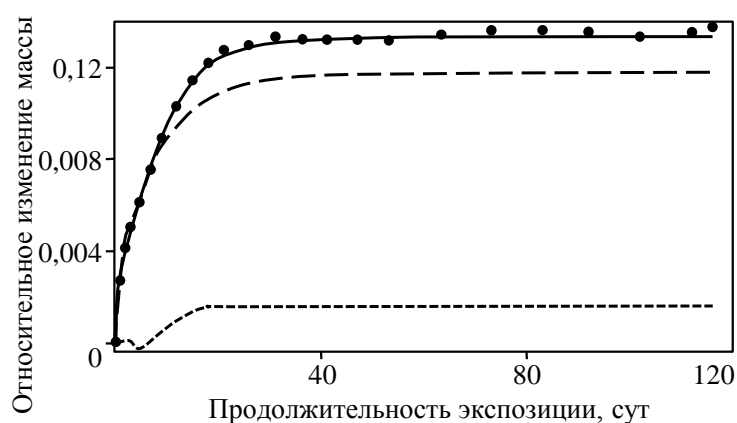


Рисунок 3. Кинетика сорбционного эксперимента исходного образца размером 100×50 мм: M_c – влагосодержание образца в момент времени t в сорбционном эксперименте (●); M – модель (2) с параметрами, полученными при десорбционном эксперименте (---); Y_{rc} – модель (7; - - -); $M+Y_{rc}$ – сумма моделей (2) и (7) (—)

В качестве примера на рис. 3 показаны экспериментальные значения относительно-го прироста массы исходного образца размером 100×50 мм, где M_c – влагосодержание образца в момент времени t в сорбционном эксперименте, M – модель (2) с параметрами, полученными из десорбционного эксперимента, Y_{rc} – модель (7), $M+Y_{rc}$ – сумма моделей (2) и (7). Видно, что процессы структурной релаксации и химической реакции, активируемые сорбированной влагой, сравнительно невелики и завершаются за 20 сут от начала влагонасыщения.

Результаты обработки образцов с помощью данной методики представлены в таблице. Из полученных результатов видно, что используемая модель с точностью 4–6% определяет коэффициент диффузии влаги D_0 и коэффициент предельного влагосодержания M_1 . Это доказывается рассчитанным коэффициентом детерминации $R^2=0,94–0,96$, определяющим соответствие модели экспериментальным данным.

Параметры модели диффузии влаги (1–5) для исходных образцов углепластика и образцов после стадии натурной климатической экспозиции

Параметр	Значения параметра		
	в исходном состоянии	после 6 мес старения	
Коэффициент диффузии неповрежденной части D_0 , мм ² /сут	0,145	0,239	
Доля коэффициента диффузии, учитывающая изменение толщины d_n , мм/сут	-0,098	-0,17	
Доля коэффициента диффузии, учитывающая влияние поврежденной кромки d_{LW} , мм ³ /сут	0,039	0,042	
Предельное влагосодержание неповрежденной части образцов M_1	0,0118	0,0120	
Поправочные коэффициенты для предельного влагосодержания (5), учитывающие размеры образцов	длины M_2	-0,001	0,001
	ширины M_3	-0,003	-0,004
	площади M_4	0,142	0,115
Начальная убыль массы C_0	0,0008	0,0009	
Коэффициент детерминации модели (2) R^2	0,939	0,964	

Хорошее соответствие между результатами расчетов по модели (2)+(7) и соответствующими им экспериментальными данными иллюстрирует рис. 4.

При сравнении механических показателей исходных и экспонированных образцов из углепластика не было выявлено значительных изменений, так как деструктивные процессы на начальной стадии экспозиции затрагивают только незначительный поверхностный слой материала (менее 10 мкм – 0,5% от толщины образцов). Отклонение значений прочности и модуля упругости при изгибе, температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), температуры стеклования связующего и других показателей от исходного уровня после 6 мес экспонирования не превысило 5–7%. Предельное влагосодержание M_1 неповрежденной части углепластика после 6 мес старения

также практически не изменилось (1,18 и 1,20% соответственно), но коэффициент диффузии влаги D_0 в экспонированных образцах увеличился на 65%.

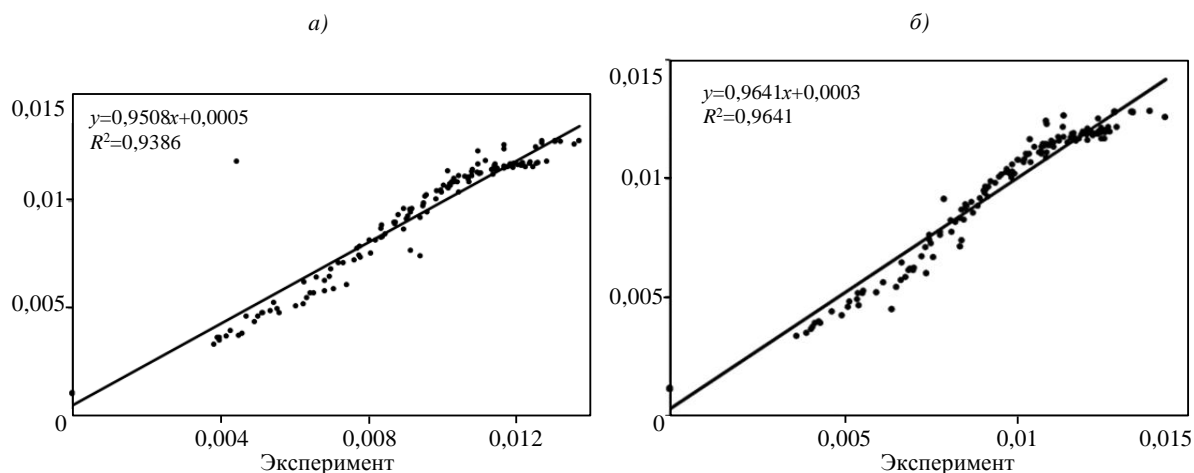


Рисунок 4. Корреляция модели с экспериментом для исходных образцов (а) и образцов после экспозиции (б)

Сравнение профилей поверхности исходного и экспонированного образцов показали, что у исходного образца максимальная глубина дефектов обычно достигает 2–4 мкм, а у образца, прошедшего стадию натурной климатической экспозиции, глубина дефектов может достигать 6–8 мкм (рис. 5). Из этого следует, что коэффициент диффузии является очень чувствительным показателем, пригодным для диагностики деструкции поверхности материала.

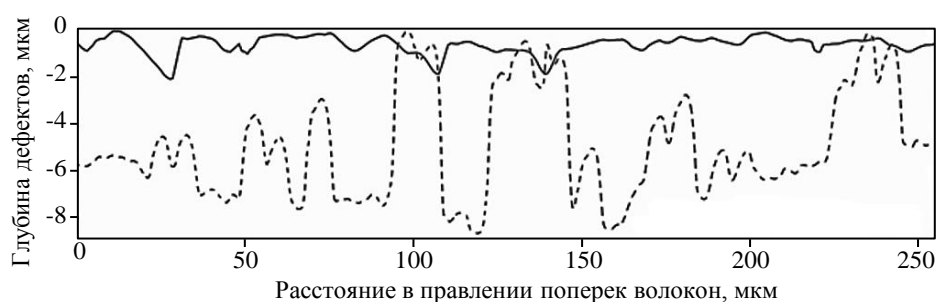


Рисунок 5. Профиль поверхности исходного образца (—) и образца после 6 мес экспозиции (---)

Предложенный метод может быть использован для уточнения результатов исследований влияния климатических факторов на старение конструкционных материалов [13–16].

Таким образом, в данной работе рассчитаны параметры влагопереноса для углепластика на основе препрега HexPly 8552 фирмы Hexcel и однонаправленной угле-

родной ленты UD134/AS-4-12k для исходных образцов и образцов, прошедших стадию натурной климатической экспозиции. Сравнение полученных параметров показало, что значение предельного влагопоглощения данного углепластика не изменилось после 6 мес экспонирования, но значение коэффициента диффузии влаги образцов, прошедших стадию натурной климатической экспозиции, значительно увеличилось (на 65%) по сравнению с исходными образцами. Это объясняется образованием дефектов в поверхностном слое экспонированных образцов. Коэффициент диффузии влаги крайне чувствителен даже к незначительным повреждениям поверхности материала, и его можно использовать в качестве оценочного показателя при выявлении дефектов поверхности на стадии экспозиции композита.

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. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 242–253.
3. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
4. 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.
5. Старцев О.В., Кузнецов А.А., Кротов А.С., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г. Моделирование влагопереноса в слоистых пластиках и стеклопластиках //Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. №2. С. 109–114.
6. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Антипов В.В., Гращенко Д.В. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» //Материаловедение. 2011. №12. С. 38–44.
7. Мелёхина М.И., Кавун Н.С., Ракитина В.П. Эпоксидные стеклопластики с улучшенной влаго- и водостойкостью //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 29–31.
8. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение досто-

- верности прогнозирования свойств полимерных композитных материалов при термовлажностном старении //ДАН. 2009. Т. 428. №1. С. 56–60.
9. Старцев О.В., Филистович Д.В., Кузнецов А.А., Кротов А.С., Аниховская Л.И., Дементьева Л.А. Деформируемость листовых стеклопластиков на основе клеевых препрегов при сдвиговых нагрузках во влажной среде //Перспективные материалы. 2004. №1. С. 20–26.
 10. Старцев О.В., Прокопенко К.О., Литвинов А.А., Кротов А.С., Аниховская Л.И., Дементьева Л.А. Исследование термовлажностного старения авиационного стеклопластика //Герметики. Клеи. Технологии. 2009. №8. С. 18–22.
 11. Антипов В.В., Старцев О.В., Сенаторова О.Г. Закономерности влагопереноса в СИАЛах //Коррозия: материалы, защита. 2012. №3. С. 13–18.
 12. Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Скирта А.А., Гращенко 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. 19–26.
 14. 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. 2010. №12. С. 40–46.
 15. 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.
 16. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.

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] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Guljaev I.N., Gunjaev G.M., Raskutin A.E. Polimernye kompozicionnye materialy s funkcijami adaptacii i diagnostiki sostojanija [Polymer composite materials with fea-

- tures of adaptation and diagnosis of the condition] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 242–253.
3. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K., Nikolaev E.V. Issledovanie vlijanija klimaticeskikh faktorov i mehanicheskogo nagruzhenija na strukturu i mehanicheskie svojstva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical loading on the structure and mechanical properties of the PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 41–45.
 4. Kirillov V.N., Vapirov Ju.M., Drozd E.A. Issledovanie atmosfernoj stojkosti polimernyh kompozicionnyh materialov v uslovijah atmosfery teplogo vlazhnogo i umerenno teplogo klimata [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.
 5. Starcev O.V., Kuznecov A.A., Krotov A.S., Anihovskaja L.I., Senatorova O.G. Modelirovanie vlagoperenosa v sloistyh plastikah i stekloplastikah [Modelling of moisture transfer in layered plastic and fiberglass] //Fizicheskaja mezomehanika. 2002. T. 5. №2. S. 109–114.
 6. Starcev O.V., Krotov A.S., Senatorova O.G., Anihovskaja L.I., Antipov V.V., Grashenkov D.V. Sorbcija i diffuzija vlagi v sloistyh metallopolimernyh kompozicionnyh materialah tipa «SIAL» [Sorption and diffusion of moisture in layered metal-polymer composite materials such as «SIAL»] //Materialovedenie. 2011. №12. S. 38–44.
 7. Meljohina M.I., Kavun N.S., Rakitina V.P. Jepoksidnye stekloplastiki s uluchshennoj vlago- i vodostojkost'ju [Epoxy fiberglass with improved moisture resistance and water resistance] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 29–31.
 8. Starcev O.V., Anihovskaja L.I., Litvinov A.A., Krotov A.S. Povyshenie dostovernosti prognozirovaniya svojstv polimernyh kompozitnyh materialov pri termovlazhnostnom starenii [Increasing the reliability of predicting the properties of polymeric composite materials under Hygrothermal aging] //DAN. 2009. T. 428. №1. S. 56–60.
 9. Starcev O.V., Filistovich D.V., Kuznecov A.A., Krotov A.S., Anihovskaja L.I., Dement'eva L.A. Deformiruemost' listovyh stekloplastikov na osnove kleevyh prepregov pri sdvigovyh nagruzkah vo vlazhnoj srede [Deformability sheet GRP based adhesive prepreg under shear stress in a wet environment] //Perspektivnye materialy. 2004. №1. S. 20–26.
 10. Stapev O.V., Prokopenko K.O., Litvinov A.A., Krotov A.S., Anihovskaja L.I., Dement'eva L.A. Issledovanie tepmovlazhnostnogo stapenija aviacionnogo stekloplastika

- [Study tepmovlazhnostnogo stopeniya aircraft fiberglass] //Germetiki. Klei. Tehnologii. 2009. №8. S. 18–22.
11. Antipov V.V., Starcev O.V., Senatorova O.G. Zakonomernosti vlagoperenosa v SIALah [Laws of moisture transfer in SIAL] //Korrozija: materialy, zashhita. 2012. №3. S. 13–18.
 12. Nikolaev E.V., Kirillov V.N., Skirta A.A., Grashhenkov D.V. Issledovanie zakonomernostej vlagoperenosa i razrabotka standarta po opredeleniju koeficienta dif-fuzii i predel'nogo vlagosoderzhaniya dlja ocenki mehanicheskikh svojstv ugleplastikov [Study patterns of moisture transfer and development of a standard to determine the dif-fusion coefficient and moisture content limit to evaluate the mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 44–48.
 13. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozicionnykh materialov aviacionnogo naznachenija. I. Mehanizmy starenija [Cli-matic aging aviation applications of composite materials. I. Mechanisms of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2010. №11. S. 19–26.
 14. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozicionnykh materialov aviacionnogo naznachenija. II. Relaksacija ishodnoj strukturnoj neravnovesnosti i gradient svojstv po tolshhine [Climatic aging aviation ap-plications of composite materials. II. Relaxation of the initial disequilibrium and struc-tural properties of the gradient across the thickness] //Deformacija i razrushenie materi-alov. 2010. №12. S. 40–46.
 15. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozicionnykh materialov aviacionnogo naznachenija. III. Znachimye faktory starenija [Climatic aging aviation applications of composite materials. III. Significant factors of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2011. №1. S. 34–40.
 16. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. C. 16–21.