

Научная статья

УДК 539.4:551.58

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148

ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПОСЛЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

И.М. Велигодский¹, Т.В. Коваль¹, А.О. Курносов¹, П.С. Мараховский¹

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

Аннотация. Ввиду ограниченной стойкости стеклонаполненных полимерных композиционных материалов к воздействию климатических факторов, представляет интерес проведение натурных испытаний в различных климатических условиях. Проведено исследование изменения прочностных и термомеханических характеристик стеклопластика марки ВПС-48/7781 (с покрытием и без него) после 3 лет экспозиции в разных климатических зонах. Показано, что применение покрытия на основе эмали ВЭ-69 способствует сохранению прочностных и термомеханических характеристик на уровне значений свойств до экспозиции.

Ключевые слова: климатические натурные испытания, стеклопластик ВПС-48/7781, прочность при сжатии, прочность при изгибе, динамический механический анализ

Для цитирования: Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносов А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.

Scientific article

STUDY OF RESISTANCE OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC TO NATURAL WEATHERING IN DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS

I.M. Veligodskiy¹, T.V. Koval¹, A.O. Kurnosov¹, P.S. Marakhovskiy¹

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

Abstract. Because of limited resistance of glass fiber reinforced plastic (GFRP) to influence of climatic factors it is interesting to make natural weathering tests in different climatic conditions. The study of strength and thermomechanical properties changing of GFRP VPS-48/7781 (with or without coating) after 3 year environmental exposure in different climatic zones. It was shown that applying of coating based on VE-69 provides saving strength and thermomechanical properties on the initial level.

Keywords: natural climatic tests, GFRP VPS-48/7781, flexural strength, compressive strength, dynamic mechanical analysis

For citation: Veligodskiy I.M., Koval T.V., Kurnosov A.O., Marakhovskiy P.S. Study of resistance of glass fiber reinforced plastic to natural weathering in different climatic conditions. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.

Введение

Высокие механические, технологические и экономические показатели полимерных композиционных материалов (ПКМ) обуславливают постоянное повышение объемов их производства и применения [1]. В частности, замена алюминиевых сплавов на стеклопластики в изделиях авиационной техники ввиду высокой удельной прочности последних позволяет добиться снижения массы конструкций без увеличения их стоимости [2]. Однако ограниченная стойкость стеклонаполненных полимеров к действию влаги и других внешних факторов существенно ограничивает их применение [3]. Так, влага в полимерной матрице, способствующая релаксационным процессам, в случае действия длительной статической нагрузки способствует необратимой деформации полимера и композиционного материала в целом [4]. При эксплуатации конструкционные авиационные материалы подвергаются как продолжительным статическим, так и динамическим нагрузкам. Кроме того, очень широк спектр воздействия погодных условий на изделия из них, таких как солнечная радиация, температура окружающего воздуха, широкий диапазон влажности среды [5, 6]. Таким образом, очевидна необходимость оценки влияния продолжительной экспозиции на каждый новый перспективный материал в различных климатических условиях с различным соотношением интенсивности влияния погодных факторов [7].

Большинство ПКМ в готовых изделиях авиационной техники используются с нанесенными на них покрытиями (грунт, эмаль). Такие покрытия в ходе эксплуатации испытывают воздействие атмосферных факторов, приводящих к постепенному разрушению защитного покрытия и непосредственному воздействию на ПКМ, вследствие чего возникает необходимость в сопоставлении стойкости к климатическим факторам стеклопластиков с покрытием и без него.

Материалы и методы

Стеклопластик

Для изготовления конструкционных элементов мотогондолы газотурбинных двигателей наряду с другими ПКМ на расплавном связующем ВСЭ-1212 (ВКУ-25/СУТ49S, ВКУ-39/ВТкУ-2.200, ВКУ-29/ВТкУ-3) разработан стеклопластик ВПС-48/7781 в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [8–10]. Наполнитель представляет собой двухосную равнопрочную стеклоткань сатинового переплетения артикула 7781. Связующее ВСЭ-1212 состоит из дифункциональной эпоксидной смолы, полифункциональной смолы, аминного ароматического отвердителя и термопласта, а также других компонентов [7]. При отверждении связующего образуют две фазы: реактопласт и термопласт с рабочей температурой до 120 °С [11], характеризующиеся сеперерывной морфологией и высокой межфазной адгезией, способствующих повышению трещиностойкости композиционных материалов на его основе [12, 13].

В качестве покрытия для композиционного материала использовалась фторполиуретановая эмаль ВЭ-69, обладающая высокими защитными свойствами [14], превосходящими свойства серийно применяемых отечественных и зарубежных аналогов по атмосферостойкости и стойкости к царапанию после действия агрессивных сред [15].

Методика экспозиции

Наиболее достоверно оценить стойкость ПКМ к климатическим воздействиям позволяет натурная экспозиция. Для обеспечения наиболее полного охвата климатического влияния экспозицию проводили в разных зонах, отличающихся друг от друга широким разбросом климатических характеристик (см. таблицу).

Условия натуральных климатических испытаний

Место экспозиции	Средняя температура, °С	Средняя относительная влажность, %	Количество осадков, мм	Средняя скорость ветра, м/с	Доза суммарной солнечной радиации, МДж/м ²	Доза УФ-радиации (UVB), МДж/м ²	Тип климата
г. Геленджик	15,5	70	629	3,2	4865	16	Приморская атмосфера умеренно теплого климата с мягкой зимой
г. Сочи	14,9	77	1518	1,4	5112	–	Приморская атмосфера теплого влажного климата
г. Москва	7,9	72	502	1,4	4343	15	Промышленная атмосфера умеренного климата
г. Якутск	–7,5	68	221	–	3516	–	Очень холодный климат
Поселок Дальние Зеленцы	1,9	80	472	6,6	2519	–	Приморская атмосфера умеренного климата
г. Звенигород	5,6	78	903	2,1	4343*	–	Сельская атмосфера умеренного климата
г. Владивосток	5,2	64	705	3,0	3253	–	Приморская атмосфера умеренно влажного климата

* Ввиду близости географического расположения дозу суммарной солнечной радиации в Звенигороде принимали равной таковой в Москве.

При постановке на натурную экспозицию образцы располагали под углом 45 градусов к горизонту с ориентацией на юг. После 3 лет экспозиции плиты стеклопластика снимали со стенда и обрезали по 2 см от кромки материала с каждого края. Далее заготовки размечали и разрезали на образцы прямоугольной формы для проведения испытаний свойств экспонированного ПКМ.

Методика испытаний

Методика механических испытаний

Определение прочности при сжатии материала ВПС-48/7781 после 3 лет экспозиции проводили по ASTM D6641 при комнатной (20° С) и повышенной (120° С) температурах. Прочность при изгибе определяли по ASTM D7264 при этих же температурах.

Методика ДМА-испытаний

Исследование температурных изменений в полимерной матрице стеклопластика ВПС-48/7781 проводили методом динамического механического анализа (ДМА), подвергая прошедшие экспозицию образцы стеклопластика с покрытием и без него (как в исходном, так и в высушенном состояниях) температурному воздействию в следующих условиях:

Установка динамического механического анализа
Режим измерения

Термоанализатор DMA 242D
(фирма Netzsch, Германия)
Трехточечный изгиб

Атмосфера	Аргон
Скорость потока газа	70 мл/мин
Длина образца	50 мм
Скорость подъема температуры	2 К/мин (постоянная)
Частота колебаний	1 Гц (постоянная)
Амплитуда колебаний	30 мкм
Динамическая сила	1,3 Н
Коэффициент нагрузки	1,3

В процессе анализа с помощью программного обеспечения ДМА (Proteus Analysis) строили термомеханические зависимости, из которых по максимуму пика модуля потерь (E'') определяли температуру стеклования, соответствующую переходу полимера в высокоэластичное состояние. При рассмотрении сдвоенных пиков без явного превалирования одного из них за температуру стеклования принимали среднее значение двух точек перегиба, которые находят по минимуму на графике второй производной термомеханической зависимости модуля потерь от температуры.

Для каждого состояния стеклопластика (исходное/высушенное, а также с покрытием/без покрытия) и для каждой климатической зоны измерено по 5 параллельных образцов, демонстрировавших близкий по форме и расположению экстремумов вид кривых. Для наглядности отображения графики ДМА-измерений экспортировали из программного обеспечения Proteus Analysis в среду MS Excel в виде массивов данных зависимости модуля потерь от температуры. Затем средствами MS Excel каждые 5 графиков (для каждого состояния и климатической зоны) усредняли в один представительный график.

Методика определения влагосодержания

Для определения влагосодержания образцы стеклопластика после экспозиции взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,1 мг, проводя по три параллельных взвешивания на каждый образец. Затем взвешенные образцы подвергали высушиванию в сушильном шкафу при температуре 60 °С в среде сухого воздуха без принудительной конвекции. Воздух в емкости осушали силикагелем. Регенерацию осушающего силикагеля проводили еженедельно, прокаливая его при температуре 180–200 °С. На протяжении процесса сушки массу образцов контролировали, периодически их взвешивая. При достижении постоянной массы в пределах погрешности взвешивания образцы считали высушенными. Влагосодержание рассчитывали как разность масс исходного и высушенного образца, нормированную на массу исходного образца.

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

Результаты и обсуждение

Внешний вид образцов стеклопластика после 3 лет экспозиции

На рис. 1 представлены фотографии типичных образцов стеклопластика с покрытием и без него после экспозиции. На лицевой стороне ПКМ без покрытия (рис. 1, а, з) наблюдается значительное оголение стекловолокна. На оборотной стороне стеклопластика (рис. 1, б, д) заметно частичное оголение волокон. На образцах с покрытием (рис. 1, в, е) визуальных повреждений не наблюдается. Аналогичная картина характерна для образцов во всех климатических зонах.

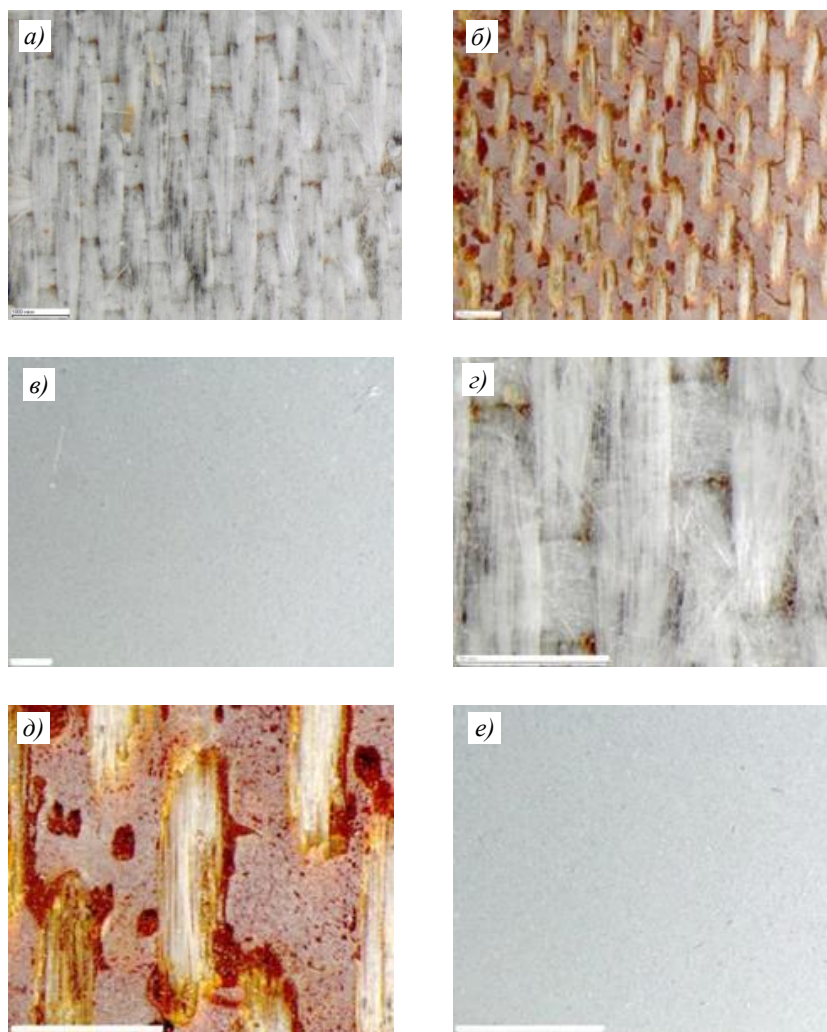


Рис. 1. Увеличенное изображение ($a-b - \times 12$; $c-e - \times 40$) образцов после 3 лет экспозиции

Обсуждение результатов прочностных испытаний

Из данных диаграммы на рис. 2 видно, что после экспозиции прочность при сжатии образцов без покрытия значительно снижается по сравнению со значением до экспозиции (показано пунктирной линией; разброс результатов отражается шириной области серого цвета вокруг пунктира). Так, снижение свойств образцов без покрытия достигает 40 % при 20 °С и 24 % при 120 °С, в то время как максимальное снижение прочности при сжатии большинства образцов с покрытием составило 17 % при 20 °С и 15 % при 120 °С, а для большинства образцов не выходит за рамки погрешности измерения.

Такое поведение стеклопластика повторяется и для результатов измерения прочности образцов при изгибе, приведенных на рис. 3. Снижение свойств образцов без покрытия достигло 20 % при 20 °С и 27 % при 120 °С, в то время как максимальное снижение прочности при сжатии большинства образцов с покрытием составило 10 % при 20 °С и 9 % при 120 °С, а большая часть результатов измерений не выходит за рамки погрешности. Из наблюдаемых результатов можно сделать вывод об эффективности защитного покрытия на основе эмали ВЭ-69 для защиты стеклопластика ВПС-48/7781 от негативных факторов разных климатических зон, в которых проходила экспозиция.

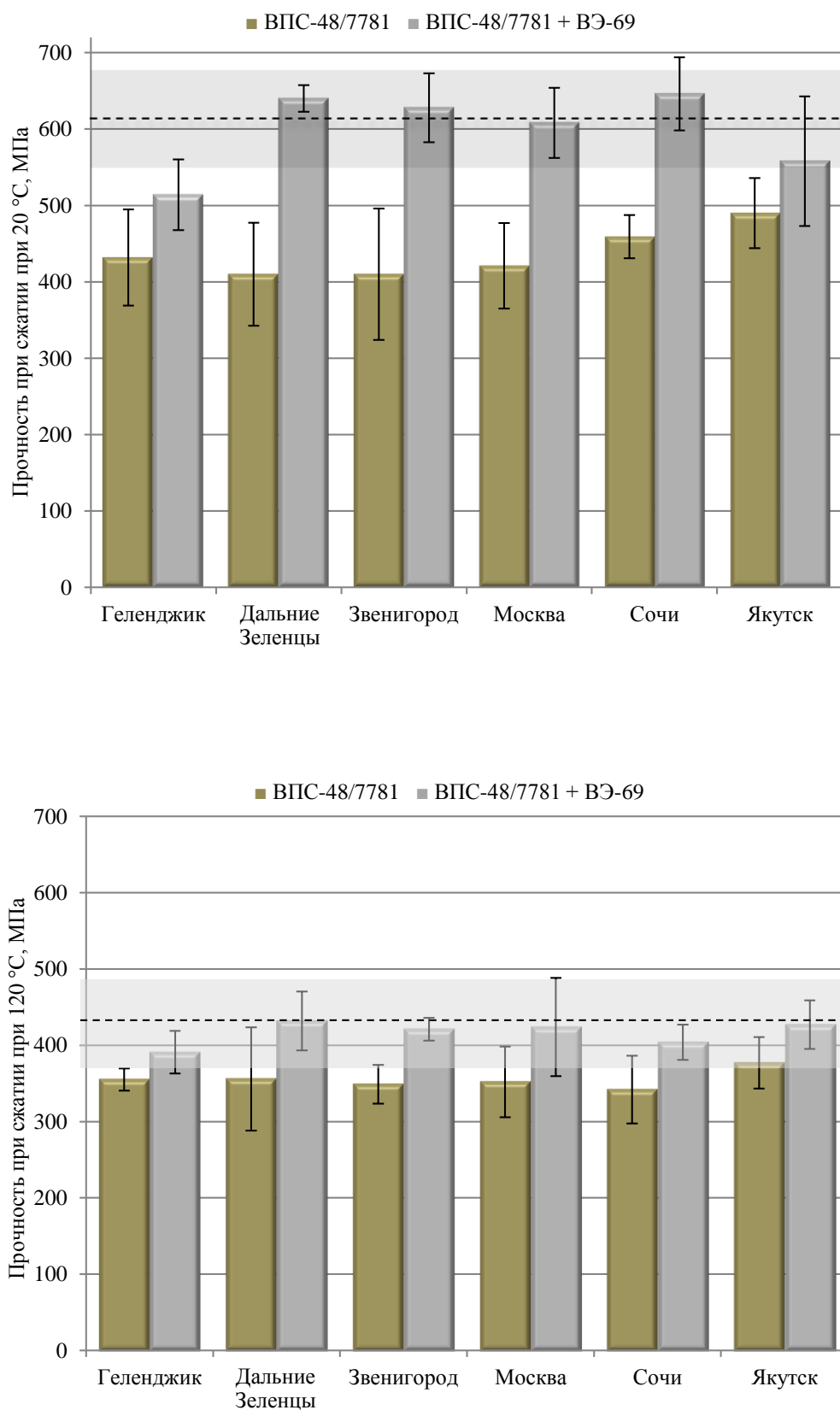


Рис. 2. Изменение прочности при сжатии образцов после 3 лет экспозиции

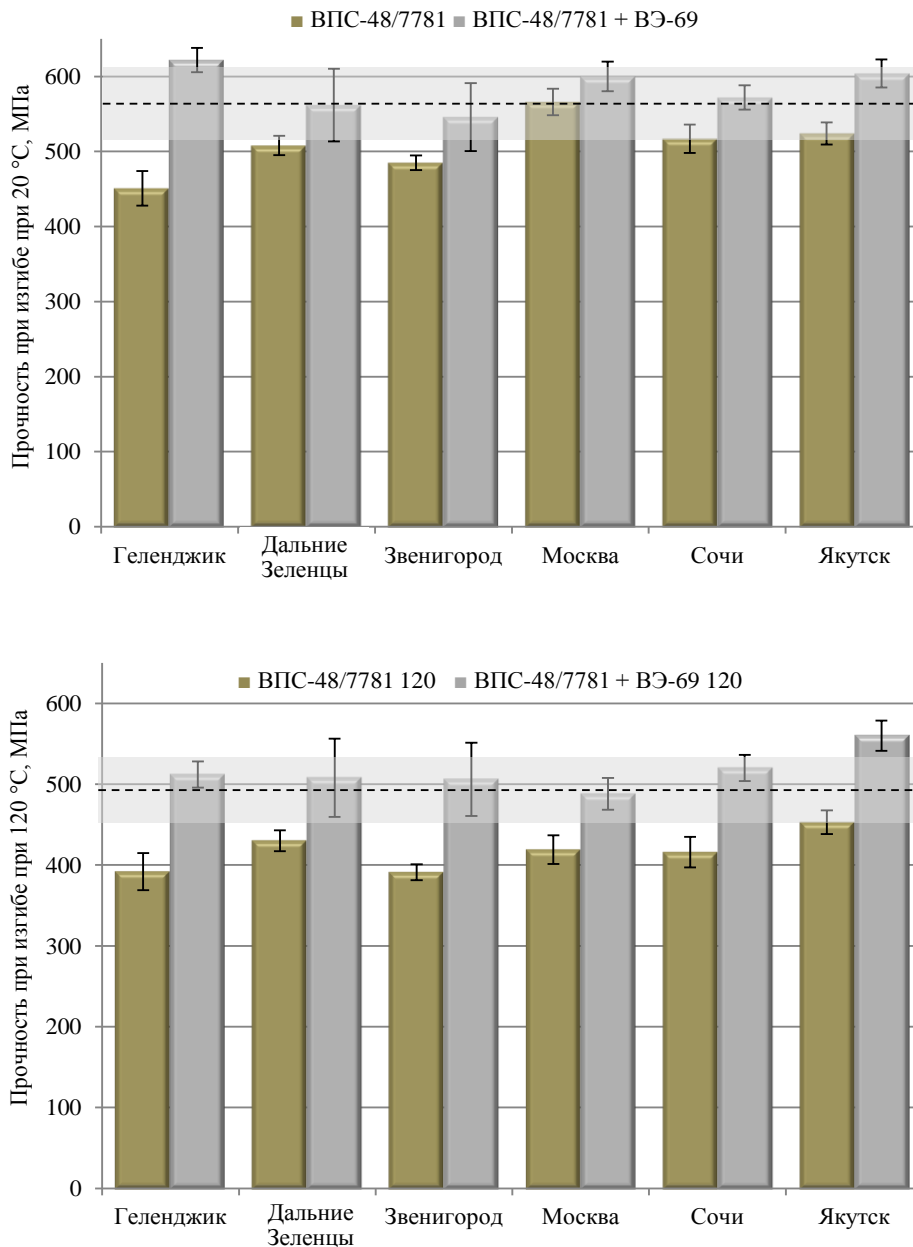


Рис. 3. Изменение прочности при изгибе образцов после 3 лет экспозиции

Обсуждение термомеханических зависимостей

Полученные при ДМА-измерениях усредненные графики термомеханических зависимостей представлены на рис. 4 (данные по образцам, экспонированным в г. Сочи, исключены из рассмотрения). На термомеханических кривых ПКМ без покрытия в исходном состоянии (рис. 4, *a*) наблюдаются раздвоенные пики модуля потерь с большей интенсивностью в области 150 °С. Данная область обусловлена эффектом пластификации полимерной матрицы под действием влаги и в случае образцов без покрытия превалирует над непокрытыми образцами, что является причиной снижения механических свойств материала. Пик в области 170 °С характерен для части полимера, неподверженного эффекту пластификации, и проявляется у высушенных (рис. 4, *б*) и исходных образцов. Эффект пластификации подтверждается отсутствием у высушенных образцов пика в области 150 °С и отсутствием двойного пика модуля потерь.

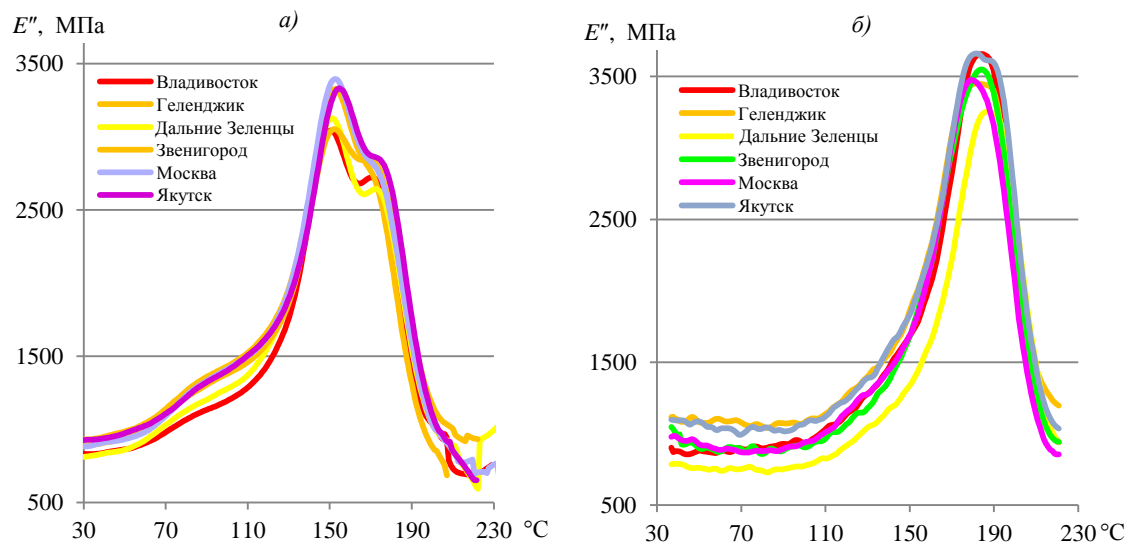


Рис. 4. Зависимости модуля потерь E'' от температуры образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 без покрытия в исходном (а) и высушенном состояниях (б)

Влияние покрытия на термомеханические процессы проиллюстрировано на рис. 5, на котором приведены термомеханические зависимости для образцов стеклопластика без покрытия, с покрытием и с удаленным после экспозиции покрытием (образцы экспонировались в поселке Дальние Зеленцы). В левой части графика термомеханической кривой образца с покрытием наблюдается широкий одиночный пик, который отсутствует у аналогичного образца с удаленным покрытием. При этом форма и положение сдвоенных пиков α -перехода, соответствующих температурным изменениям полимерной матрицы, у образца с покрытием и образца с удаленным покрытием совпадают. В то же время на кривой образца, проходившего экспозицию без покрытия, наряду с отсутствием пика в области меньших температур наблюдается значительное превалирование одного пика над другим. Отсюда следует, что образцы стеклопластика, проходившие экспозицию с нанесенным лакокрасочным покрытием, имеют схожее состояние полимерной матрицы между собой и резко отличаются от образца, экспонированного без покрытия. Следовательно, одиночный пик в области меньших температур обусловлен температурными изменениями в покрытии.

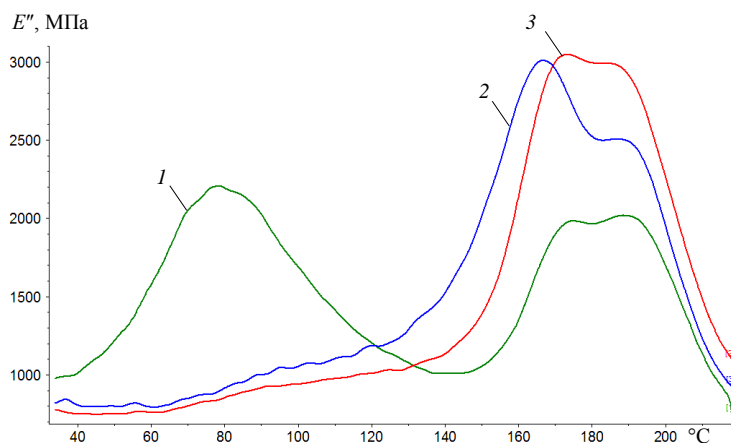


Рис. 5. Зависимости модуля потерь E'' от температуры образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 с покрытием на основе эмали ВЭ-69 (1), без покрытия (2) и с удаленным покрытием (3)

На рис. 6 представлены усредненные графики термомеханических кривых, полученных при ДМА-измерениях образцов с покрытием. В левой части графиков образцов в исходном состоянии (на рис. 6, а) в области от 40 до 130 °С наблюдаются широкие пики с несколькими перегибами, обусловленными влиянием покрытия ВЭ-69 на модуль потерь. Состояние полимерной матрицы на основе связующего ВСЭ-1212 отражается пиками в области температур 150 и 170 °С. Одиночный пик в случае образцов, экспонированных в Геленджике и Сочи, и отсутствие пика пластифицированного полимера в области температуры 150 °С свидетельствуют о низком содержании остаточной влаги в составе полимера, что может быть связано с более теплым климатом зоны экспозиции. Кроме того, на кривых высушенных образцов с покрытием также наблюдаются только одинарные пики полимерной матрицы в области температуры 190 °С, что подтверждает влияние влаги на появление двойных пиков.

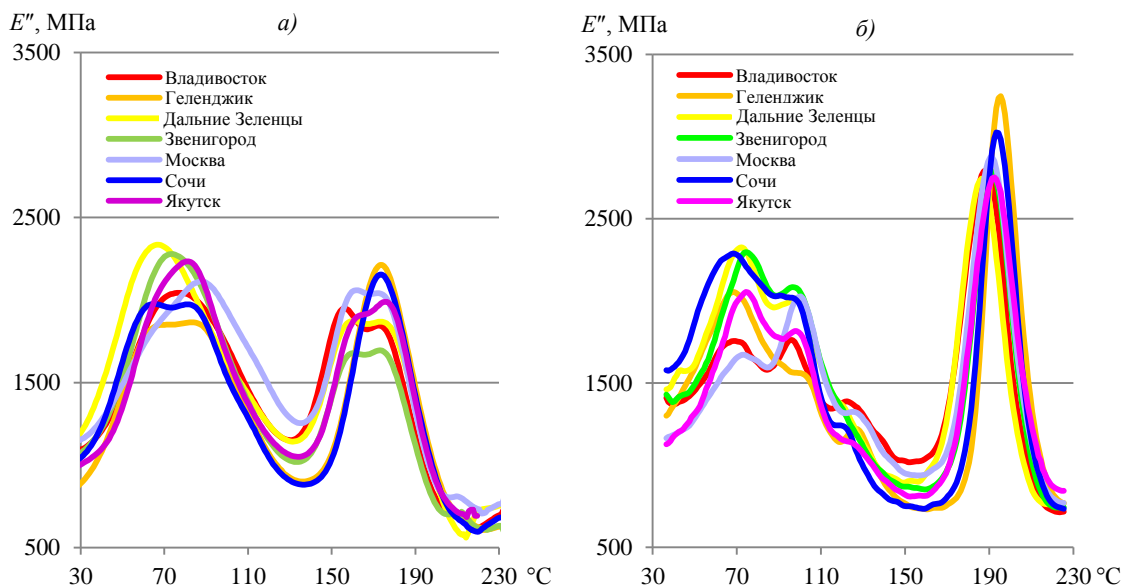


Рис. 6. Зависимости модуля потерь E'' от температуры образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 с покрытием на основе эмали ВЭ-69 в исходном (а) и высушенном состояниях (б)

При строгом сопоставлении графиков термомеханических зависимостей можно заметить также общее смещение обоих пиков полимерной матрицы (в области температур 150 и 170 °С) в низкотемпературную область на величину от 3 до 8 °С у образцов без покрытия по сравнению с образцами с нанесенным составом эмали ВЭ-69. Такое смещение также свидетельствует о барьерном эффекте применяемого покрытия.

На рис. 7 представлены температуры стеклования стеклопластика ВПС-48/7781 после 3 лет экспозиции в различных климатических условиях. На диаграмме видно заметное снижение температуры стеклования у образцов без покрытия по сравнению с образцами с покрытием во всех климатических зонах. Следует также отметить значительное снижение, достигающее до 46 °С, температур стеклования образцов в исходном состоянии (рис. 7, а) после экспозиции по сравнению со значением температуры стеклования 211 °С до экспозиции (на диаграммах показана пунктирной линией) [16]. В то же время образцы без покрытия демонстрировали снижение температуры на ~60 °С. В случае с высушенными образцами (рис. 7, б) наблюдается значительно меньшее снижение температур стеклования (~20 °С – у образцов с покрытием и 30 °С – у образцов без покрытия). Таким образом, высушивание прошедших экспозицию образцов

не восстанавливает температуру стеклования полимера до значения, характерного для состояния материала до экспозиции, что выявляет необратимую деградацию полимерной матрицы и позволяет сделать вывод, что снижение температур стеклования стеклопластика в исходном состоянии обусловлено эффектами пластификации и необратимой деградации полимера.

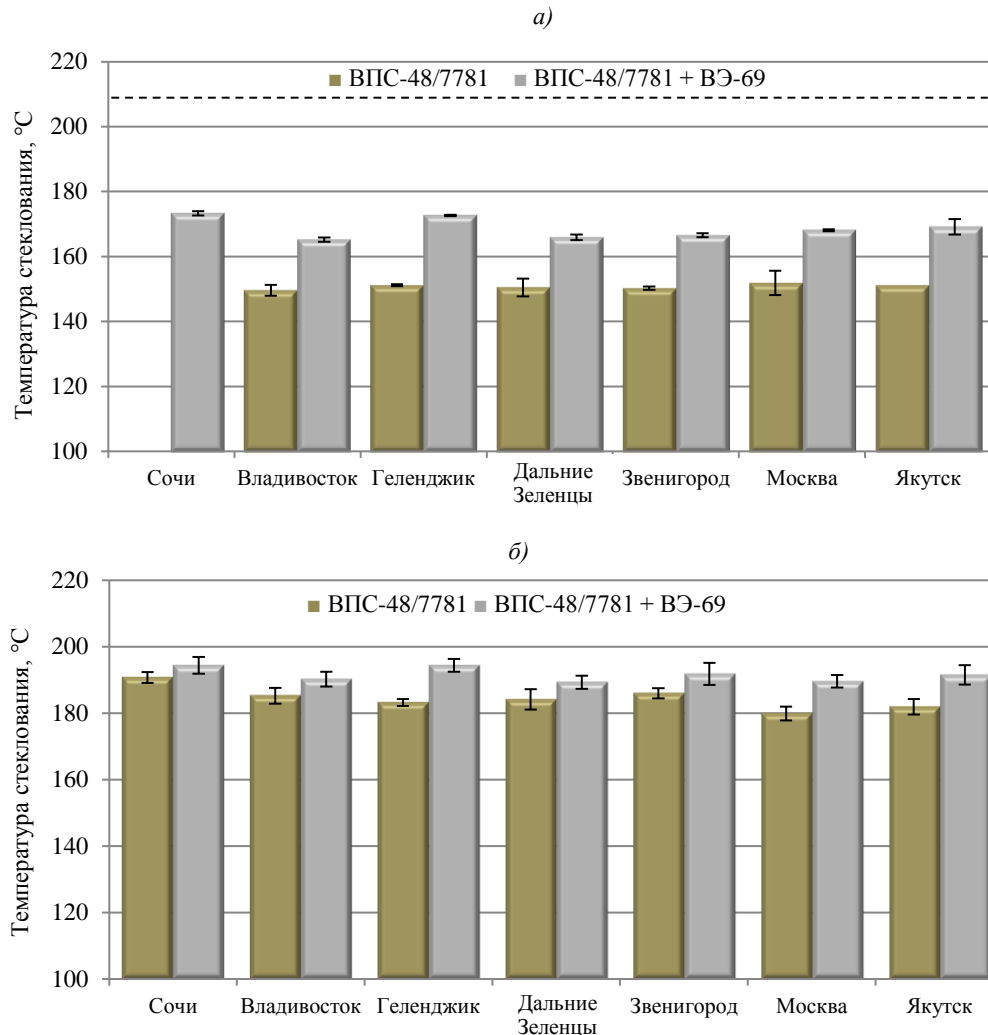


Рис. 7. Температуры стеклования в зависимости от зон экспозиции стеклопластика ВПС-48/7781 с покрытием на основе эмали ВЭ-69 и без него в исходном (а) и высушенном состоянии (б)

На рис. 8 видно, что в большинстве прошедших экспозицию образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 без покрытия содержание влаги выше, чем у образцов с покрытием на основе эмали ВЭ-69. Таким образом, при экспозиции в большинстве климатических зон проявляется барьерный эффект, создаваемый покрытием на основе эмали ВЭ-69.

Различия между значениями, полученными после экспозиции в Дальних Зеленцах, не выходят за рамки погрешности измерения. В таблице показано, что для указанной климатической зоны характерна минимальная из рассмотренных доз суммарной годовой солнечной радиации. Следовательно, можно предположить, что низкая солнечная активность приводит к меньшему уносу полимера и, как следствие, к меньшему оголению стекловолокна, способствующему проникновению влаги в материал за счет капиллярного эффекта и других физико-химических процессов.

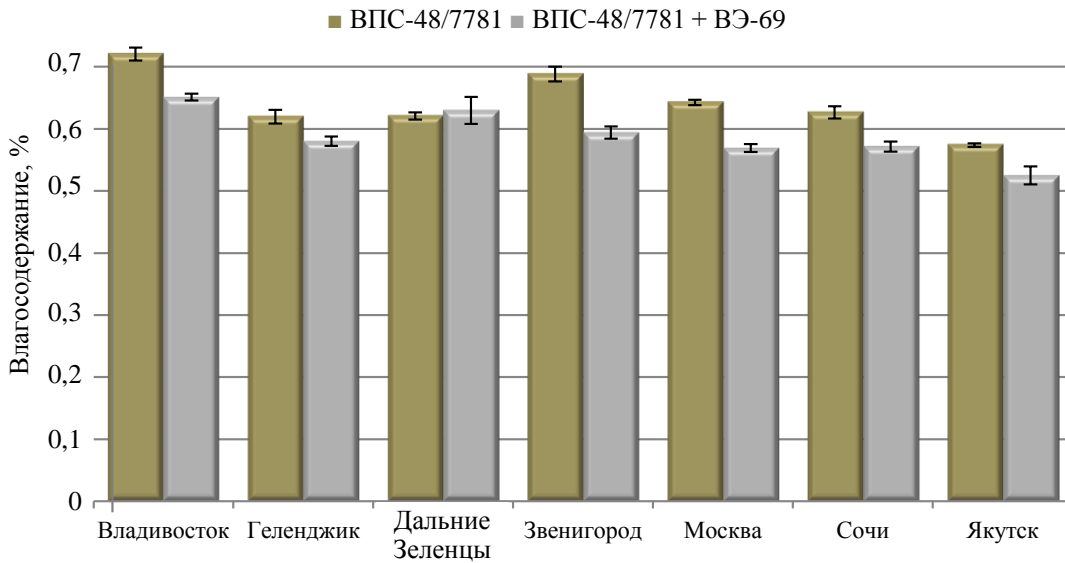


Рис. 8. Влагосодержание в зависимости от зон экспозиции стеклопластика ВПС-48/7781 с покрытием на основе эмали ВЭ-69 и без него

На рис. 9 представлены зависимости температур стеклования от влагосодержания в исследованных образцах стеклопластика ВПС-48/7781 с покрытием на основе эмали ВЭ-69 и без него. Видно, что различия между температурами стеклования, полученными для образцов стеклопластика без покрытия, экспонированных в различных климатических зонах, сопоставимы с погрешностью методов определения температуры стеклования и влагосодержания, а также с разницей этих параметров у параллельных образцов в рамках одной серии.

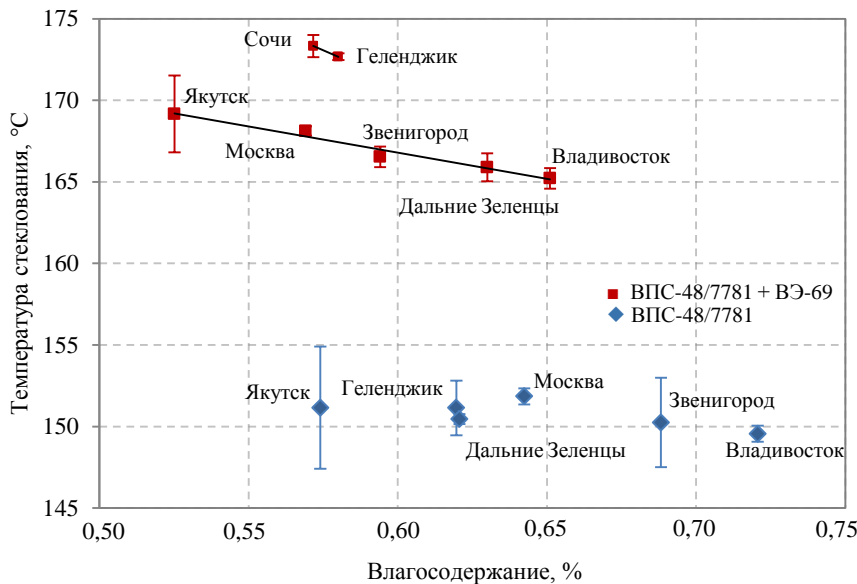


Рис. 9. Температуры стеклования в зависимости от влагосодержания образцов в различных зонах экспозиции стеклопластика ВПС-48/7781 с покрытием на основе эмали ВЭ-69 и без него

Для образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 с покрытием на основе эмали ВЭ-69 можно наблюдать снижение температуры стеклования с повышением влагосодержания в ряду мест экспозиции Якутск–Москва–Звенигород–Дальние Зеленцы. Выпадение результатов для Сочи и Геленджика из общего ряда обусловлено наличием на

соответствующих графиках термомеханических кривых для модуля потерь (E'') одного пика вместо сдвоенного пика, как в остальных случаях (рис. 6). Применение одинаковой математической обработки (с целью получения одного центрального максимума) пиков гауссовской формы и сдвоенных пиков (с наложением одного пика на другой) не представляется возможным. Поэтому для определения температур стеклования применяли два разных подхода (описанных в методике проведения эксперимента), что привело к эффекту смещения точек α -перехода, характерных для Сочи и Геленджика, в область более высоких температур. Однако для выпавших точек общий характер зависимости к снижению температуры стеклования с повышением влагосодержания повторяется.

Таким образом, значительное снижение прочности при сжатии и изгибе образцов из стеклопластика ВПС-48/7781 без покрытия коррелирует с увеличением температуры области перехода полимерной матрицы на основе связующего ВСЭ-1212 в высокоэластичное состояние. Сохранение прочности у образцов с покрытием на основе эмали ВЭ-69 соотносится с сохранением зоны α -перехода в высокотемпературной области полимера, что свидетельствует о влиянии влаги на снижение температуры стеклования, а следовательно, и прочностных характеристик материала. Аналогичный эффект отмечен авторами работы [17], в которой при проведении термовлажностного старения утверждается наличие взаимосвязи снижения уровня прочности стеклопластика ВПС-48/7781 с количеством поглощенной в процессе экспозиции влаги. В то же время результаты исследования влияния различных режимов температурного старения стеклопластика ВПС-48/7781 не выявили статистически значимых различий в значениях прочности данного ПКМ после старения как при температуре 120 °С, так и при 200 °С для различной экспозиции [18]. Это свидетельствует об эффекте синергии влияния влаги и температуры на пластификацию и деструкцию полимерной матрицы исследованного стеклопластика, что также подтверждается результатами работы [19], в которой отмечено ускорение релаксационных процессов в условиях теплого влажного климата Флориды по сравнению с теплым сухим климатом Аризоны, приводящее к снижению прочности при межслойном сдвиге. В работе [20] также сделаны выводы об эффекте синергии влияния термовлажностного фактора и УФ-излучения на состояние ПКМ (в том числе стеклопластика ВПС-48/7781) как о неэквивалентности воздействия последовательного и одновременного воздействия этих факторов. Нельзя также исключать вероятность взаимного влияния и других климатических факторов (колебания температуры, количество переходов через ноль градусов и др., количество осадков) друг на друга. В таком случае построение модели состояния ПКМ как суммы отдельных эффектов влияния климатических факторов, снижающих первоначальные характеристики материала на определенную величину, затрудняется синергией (или, наоборот, нивелированием) эффектов между собой. В перспективе возможность прогнозирования свойств ПКМ на основании метеорологической статистики в той или иной зоне экспозиции может быть обеспечена изучением многофакторного воздействия на материал совокупности возможных условий с установлением характера их взаимного влияния друг на друга.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что система покрытия с фторполиуретановой эмалью ВЭ-69 эффективно предохраняет стеклопластик ВПС-48/7781 от неограниченного проникновения влаги и пластификации полимерной матрицы на основе связующего ВСЭ-1212, что положительно сказывается на его прочности при экспозиции в течение 3 лет в различных климатических зонах. Кроме того, в сериях образцов, экспонированных в Сочи и Геленджике, содержание влаги находится на среднем уровне (рис. 8), а на термомеханической кривой имеется сдвоенный пик в соответствующей покрытию области, а также несдвоенный пик в соответствующей полимерной матрице области. Принимая во внимание указанные наблюдения можно заключить, что влага в образцах с покрытием в случае теплого климата Сочи и Геленджика концентрируется в самом покрытии, оставляя полимерную матрицу стеклопластика ВПС-48/7781 минимально подверженной пластификации.

Заключения

При исследовании образцов с покрытием, экспонированных в различных климатических зонах, наблюдается обратно пропорциональная зависимость между температурой стеклования и содержанием влаги.

Барьерный эффект, создаваемый покрытием на основе эмали ВЭ-69, способствует сохранению прочности образцов стеклопластика ВПС-48/7781 на протяжении срока экспозиции на уровне первоначальной прочности, т. е. до климатических испытаний.

Уменьшая проникновение влаги в стеклопластик ВПС-48/7781, покрытие на основе эмали ВЭ-69 предотвращает снижение температуры стеклования полимерной матрицы при экспонировании в различных климатических зонах.

Влага в образцах с покрытием в случае теплого климата Сочи и Геленджика концентрируется в самом покрытии, оставляя полимерную составляющую стеклопластика ВПС-48/7781 в меньшей степени подверженной ее воздействию.

Список источников

1. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
2. Ткачук А.И., Гуревич Я.М., Гусева М.А., Мишуров К.С. Технологические и эксплуатационные характеристики и области применения эпоксидного связующего ВСЭ-1212, перерабатываемого по препреговой технологии // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 4. С. 29–34.
3. 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.
4. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.06.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
5. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 12. С. 7–16. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-12-7-16.
6. 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. DOI: 10.31044/1814-4632-2020-1-15-21.
7. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенков Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (42). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
8. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
9. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 2–9. DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-3-2-9.
10. Осадчий Н.В., Малышев В.А., Шепель В.Т. Исследование деформации пятислойной балки с податливым на сдвиг заполнителем при нагружении сосредоточенной силой // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 7. С. 11–16.
11. Раскутин А.Е. Конструкционные углепластики на основе новых связующих расплавленного типа и тканей Porcher // Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. № 5. Ст. 01. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 08.07.2022).
12. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Крылов В.Д., Шуртаков С.В. Микромеханика разрушения стеклопластиков при расслоении по модам I и II // Материаловедение. 2016. № 2. С. 13–22.

13. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Крылов В.Д., Лашов О.А. Применение фрактографического анализа при исследовании межслоевого разрушения ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3 (48). С. 65–73. DOI: 10.18577/9140-2071-2017-0-3-65-73.
14. Семенова Л.В., Нефедов Н.И. Технология восстановления систем ЛКП с полиуретановыми эмалями для эксплуатируемых изделий АТ после удаления старых ЛКП // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S3. С. 47–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-47-50.
15. Нефедов Н.И. Вопросы импортозамещения в лакокрасочной отрасли // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2015. № 8. С. 25–28.
16. Старцев В.О., Славин А.В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
17. Вавилова М.И., Соколов И.И., Ахмадиева К.Р., Ямщикова Г.А. Полимерные композиционные материалы с низкой пористостью, получаемые по технологии пропитки пленочным связующим // *Вопросы материаловедения*. 2017. № 1 (89). С. 140–146. DOI: 10.22349/1994-6716-2017-89-1-140-146.
18. Лобанов Д.С., Зубова Е.М. Влияние температурного старения на механическое поведение конструкционного стеклопластика при межслоевом сдвиге // *Сб. тр. XXXI Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения*. М.: Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2020. С. 779–782.
19. Николаев Е.В., Павлов М.Р., Андреева Н.П., Славин А.В., Скирта А.А. Исследование процессов старения полимерных композиционных материалов в натуральных условиях тропического климата Северной Америки // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2018. № 3–4 (30). Ст. 8. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 08.07.2022).
20. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // *Известия Алтайского государственного университета*. 2020. № 1 (111). С. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.

Reference

1. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 29, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-67-29-37.
2. Tkachuk A.I., Gurevich Ya.M., Guseva M.A., Mishurov K.S. Technological and operational characteristics and applications of the epoxy binder VSE-1212, processed by prepreg technology. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2018, no. 4, pp. 29–34.
3. Laptev A.B., Nikolayev E.V., Korpachkov 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.
4. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 29, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
5. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. I. Evaluation of the influence of significant factors of influence. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2019, no. 12, pp. 7–16. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-12-7-16.
6. 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 razrushenie materialov*, 2020, no. 1, pp. 15–21. DOI: 10.31044/1814-4632-2020-1-15-21.
7. Nikolaev E.V., Barbotko S.L., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Grashchenkov D.V. Complex research of influence of climatic and operational factors on new generation epoxy binding and polymeric composite materials on its basis. Part 4. Natural climatic tests of polymeric composite materials on the basis of epoxy matrix. *Trudy VIAM*, 2016, no. 6, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 29, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
8. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.

9. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Investigation of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9. DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-3-2-9.
10. Osadchiy N.V., Malyshev V.A., Shepel V.T. Investigation of the deformation of a five-layer beam with a shear-compliant filler under concentrated force loading. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2018, no. 7, pp. 11–16.
11. Raskutin A.E. Structural carbon plastics based on new melt-type binders and Porcher fabrics. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2013, no. 5, art. 01. Available at: <http://materialsnews.ru> (date of access: 07/08/2022).
12. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Krylov V.D., Shurtakov S.V. Fracture micromechanics of glass-reinforced plastics during delamination by modes I and II. *Materialovedenie*, 2016, no. 2, pp. 13–22.
13. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Krylov V.D., Lashov O.A. Application of fractographic analysis in the study of interlayer fracture of PCM. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-65-73.
14. Semyonova L.V., Nefyodov N.I. Recovery technology for PWC systems with polyurethane enamel for the operating aviation articles after wornout PLC removal. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S3, pp. 47–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-47-50.
15. Nefedov N.I. Issues of import substitution in the paint and varnish industry. *All materials. Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2015, no. 8, pp. 25–28.
16. Startsev V.O., Slavin A.V. Carbon and glass reinforced polymer based on solvent-free binders resistance to the impact of a moderate cold and moderate warm climate. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 29, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
17. Vavilova M.I., Sokolov I.I., Akhmadieva K.R., Yamschikova G.A. Polymer composite materials with low porosity obtained by the technology of impregnation with a film binder. *Voprosy materialovedeniya*, 2017, no. 1 (89), pp. 140–146. DOI: 10.22349/1994-6716-2017-89-1-140-146.
18. Lobanov D.S., Zubova E.M. Influence of temperature aging on the mechanical behavior of structural fiberglass during interlaminar shear. *Works of XXXI Intern. innovative conf. young scientists and students on problems of mechanical engineering*. Moscow: Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of RAS, 2020, pp. 779–782.
19. Nikolaev E.V., Pavlov M.R., Andreeva N.P., Slavin A.V., Skirta A.A. Investigation of the aging processes of polymer composite materials in natural conditions of the tropical climate of North America. *Novosti materialovedeniya. Science and technology*, 2018, no. 3–4 (30), art. 8. Available at: <http://materialsnews.ru> (accessed: July 08, 2022).
20. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymeric composite materials in conditions of extremely cold climate. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1 (111), pp. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.

Информация об авторах

Велигодский Илья Михайлович, инженер 1 категории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коваль Татьяна Васильевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Курнос Артем Олегович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мараховский Петр Сергеевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Piia M. Veligodskiy, First Category Engineer, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatyana V. Koval, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem O. Kurnosov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Petr S. Marakhovskiy, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru