

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-48-57

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ ПРЕПРЕГА НА КОРОбЛЕНИЕ И СВОЙСТВА ПКМ НА ЕГО ОСНОВЕ

*Р.С. Савицкий<sup>1</sup>, А.Р. Галиуллин<sup>1</sup>, О.Ю. Мантусова<sup>1</sup>, Е.А. Вешкин<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** Исследовано влияние времени хранения выложенного и неотвержденного полимерного композиционного материала из углепластика на основе жгутового наполнителя, однонаправленной углеродной ткани и равнопрочной углеродной ткани перед автоклавным формованием на возникновение процесса коробления плоских монолитных элементов. Установлено, что длительное (более пяти дней) хранение препрега после выкладки перед формованием негативно сказывается на короблении панели. Разработка технологических рекомендаций в соответствии с полученными результатами обеспечит снижение доли брака готовых изделий.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, коробление плоских крупногабаритных изделий, автоклавная технология, прочность, углепластик

**Для цитирования:** Савицкий Р.С., Галиуллин А.Р., Мантусова О.Ю., Вешкин Е.А. Оценка влияния времени хранения препрега на коробление и свойства ПКМ на его основе // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-48-57.

Scientific article

## VALUATION OF THE EFFECT OF PREPREG STORAGE TIME ON WARPING AND PCM PROPERTIES BASED ON IT

*R.S. Savitskiy<sup>1</sup>, A.R. Galiullin<sup>1</sup>, O.Yu. Mantusova<sup>1</sup>, E.A. Veshkin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal 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 effect of the storage time of lined and uncured polymer composite material made of carbon fiber based on a bundle filler, unidirectional carbon fabric and equal-strength carbon fabric before autoclave forming on the occurrence of the warping process of flat monolithic elements. It was found that prolonged (more than five days) storage of the prepreg after laying out before molding negatively affects the warping of the panel. The development of technological recommendations in accordance with the results obtained will ensure a reduction in the share of defective finished products.

**Keywords:** polymer composite material, warping of large-sized flat products, autoclave technology, strength, carbon fiber

**For citation:** Savitskiy R.S., Galiullin A.R., Mantusova O.Yu., Veshkin E.A. Valuation of the effect of prepreg storage time on warping and PCM properties based on it. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-48-57.

## Введение

Снижение массы и повышение ресурса летательных аппаратов не представляются возможными без применения материалов нового поколения и принципиально новых подходов к созданию элементов конструкции из них. Одним из основных направлений для решения данной задачи является использование в конструкциях авиационной техники полимерных композиционных материалов (ПКМ). Данный тип материалов применяется в отечественном самолетостроении с 1960-х гг., и объем доли ПКМ в летательных аппаратах постоянно растет. Это обусловлено их свойствами (низкой плотностью, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и т. д.) и возможностью создания интегральной конструкции без применения механических крепежей [1–3]. Однако ужесточение требований к авиационным изделиям отражается и на материалах, а также способах их переработки, так как процесс создания конструкции из ПКМ единый: материал–технология–конструкция, т. е. разрабатываются новые связующие, изучаются современные способы получения армирующих наполнителей и используются автоматизированные технологии [4–10].

При разработке новых ПКМ и технологических операций изготовления из них изделий необходимо учитывать изменения технологических свойств, возникающих на различных стадиях их переработки. В процессе формования изделий из ПКМ вследствие деформационных изменений связующего при его отверждении в объеме готового материала могут возникать остаточные напряжения ввиду разных значений температурного коэффициента линейного расширения наполнителя и матрицы. Такие напряжения оказывают влияние на качественные показатели продукции – на образование таких дефектов, как коробление, расслоение и др. [11], что может приводить к сложностям при окончательной сборке изделия. Коробление (изменение геометрической формы) зачастую возникает при изготовлении крупногабаритных деталей из ПКМ и приводит к их отбраковке. Попытки исправить коробление путем высокотемпературной стабилизации готового изделия могут приводить к расстекловыванию матрицы в нем. В связи с увеличением доли крупногабаритных монолитных панелей из ПКМ в конструкции современного планера [2], минимизация коробления при формовании изделия является актуальной задачей.

В настоящее время данная проблема требует решения и рассматривается специалистами авиационных предприятий и учеными. По всему миру увеличение новых перспективных разработок в области ПКМ в соответствии с потребностями отрасли требует новых методов для изучения их технологических свойств. Созданию и разработке математических моделей и методик по изучению влияния остаточных напряжений на коробление и долговечность ПКМ, их расчету и прогнозированию посвящено много работ – в частности [11–15], тогда как влияние технологических параметров на степень коробления мало изучено. В работах [16, 17] опубликованы результаты исследования влияния содержания связующего и схемы армирования на коробление плоских образцов монолитных панелей на основе стеклопластика, а также отклонения угла укладки монослоя на коробление нервюры из углепластика.

Цель данной работы – анализ причин возникновения коробления на этапах изготовления изделия, поиск путей их решения при формовании крупногабаритных деталей из углепластика, выявление возможной закономерности между короблением изделия и продолжительностью цикла его изготовления, начинающегося с момента термостатирования препрега, выкладки на формообразующую оснастку и до проведения режима формования.

Для достижения поставленной цели проведено исследование влияния времени хранения выложенных в заготовку и неотвержденных слоев препрега углепластика перед формованием в автоклаве на возникновение процесса коробления плоских монолитных элементов и на их прочностные свойства, а также исследование препрега методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

**Материалы и методы**

В данной работе проведено исследование влияния времени выдержки в условиях цеха выложенного препрега на свойства готового изделия. Объектом исследования выбраны плоские плиты размером 1000×200 мм. Указанный габаритный размер выбран на основе существующего элемента ПКМ, используемого в летательном аппарате. Количество слоев, схема армирования, а также продолжительность цикла изготовления плиты выбраны в соответствии с чертежом на данный элемент конструкции летательного аппарата. Панели изготовлены из препрегов углепластиков на основе углеродного жгутового наполнителя, однонаправленной и равнопрочной углеродных тканей и расплавленного эпоксидного связующего. Подобные препреги могут применяться для изготовления высоконагруженных конструкций планера авиационной техники, деталей фюзеляжа, крыла и хвостового оперения методом ручной или механизированной выкладки препрега с последующим формованием в автоклаве. Изделия, изготовленные из указанных препрегов, могут эксплуатироваться в диапазоне температур от –60 до +120 °С (в условиях высокой влажности – вплоть до температуры +80 °С) – в частности, они применяются в деталях мотогондолы авиационных двигателей [4]. Указанные конструкции являются крупногабаритными, трудоемкими в изготовлении, имеют сложную геометрическую форму, что увеличивает цикл изготовления данных деталей – с момента термостатирования препрегов, после морозильной камеры и до момента проведения режима формования. Одновременно подобные конструкции являются многослойными и местами достигают толщины >10 мм. Это приводит к необходимости проведения технологических операций послойного уплотнения слоев препрега – так называемых подформовок, что в свою очередь значительно увеличивает цикл производства крупногабаритных деталей из углепластиков.

В настоящее время существует множество методов определения характеристик препрега, но для оценки влияния на их изменение длительности его хранения, а также на изменение свойств плит на его основе выбрали следующие:

- определение коробления в отформованном изделии;
- определение предела прочности и модуля упругости при изгибе на испытательной машине Zwick/Roell Z050 (ГОСТ 25.604–82);
- определение толщины монослоев в отформованных панелях;
- ДСК-анализ препрегов (ГОСТ Р 56755–2015).

Известно, что в процессе хранения препрега, как на основе растворных, так и расплавных связующих, меняются его технологические свойства: липкость, содержание растворимых и летучих веществ, температура начала активной реакции отверждения, время гелеобразования связующего в препреге и др. [18]. В условиях производства выкладка и последующее вакуумно-автоклавное формование крупногабаритной монолитной детали (в зависимости от ее толщины) может составлять в среднем от одного дня и более. В связи с этим были изготовлены плиты для исследования. Особенностью их изготовления являлся временной промежуток при хранении заготовок в диапазоне температур 20–24 °С – с момента начала термостатирования препрега перед выкладкой, выкладки и до вакуум-автоклавного формования: в течение 1, 5, 8 и 11 сут – для плит, изготовленных из препрегов углепластика на основе однонаправленной и равнопрочной углеродных тканей, и 5, 8 и 11 дней – для панелей, изготовленных из препрега углепластика на основе углеродного жгутового наполнителя.

Выкладку слоев препрега проводили на оснастке из углепластика, изготовленного из сходного по составу связующего. Использование оснастки из ПКМ позволяет снизить коробление формуемой панели за счет уменьшения разницы между значениями температурного коэффициента линейного расширения материала оснастки и изделия. Панели предварительно вакуумировали при разряжении  $(8-9) \cdot 10^{-2}$  МПа. Единовременное формование комплектов панелей из каждого препрега с различным временем

хранения проводили по режиму в соответствии с нормативной документацией на препрег углепластика. При проведении технологического режима формования использовали автоклав фирмы MAGNABOSKO 1500×3000.

Измерение коробления путем замера зазоров между отформованными в автоклаве плитами из углепластика и оснасткой проводили в соответствии со схемами, представленными на рис. 1. Данная методика измерения основана на определении величины зазора между отформованной плитой и оснасткой. Измерение проводили с помощью металлической измерительной линейки по ГОСТ 427–75 и металлических щупов по ГОСТ 882–75.

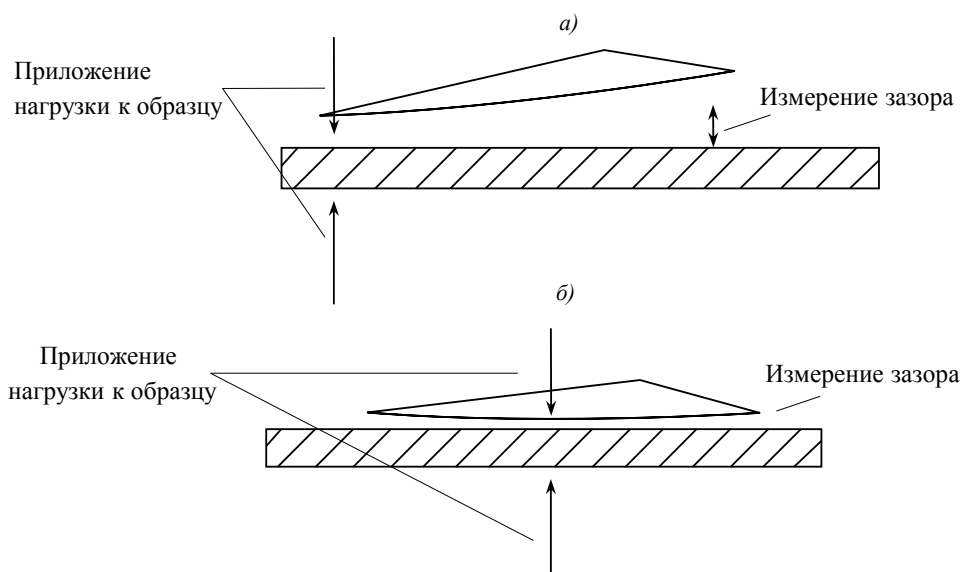


Рис. 1. Схема замеров зазоров при приложении нагрузки к образцу у конца панели (а) и по центру (б)

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

### Результаты и обсуждение

Результаты замеров величины полученных зазоров после автоклавного формования представлены в табл. 1 и 2. Следует отметить, что коробление панелей, изготовленных из препрега углепластика на основе жгутового наполнителя, произошло в поперечном сечении. Установлено также, что с увеличением количества дней хранения препрега до формования увеличивается и коэффициент вариации. Коробление панелей, изготовленных из препрегов углепластика на основе однонаправленной и равнопрочной углеродных тканей, произошло в продольном сечении, что может объясняться разницей в структуре армирующих волокон.

Таблица 1

#### Коробление панелей из препрега углепластика на основе жгутового наполнителя

Количество зазоров	5 дней		8 дней		11 дней	
	Величина зазора, мм	Коэффициент вариации, %	Величина зазора, мм	Коэффициент вариации, %	Величина зазора, мм	Коэффициент вариации, %
1	1,58	19	1,82	31	4,29	42
2	0,91	15	1,05	10	1,86	16

**Коробление панелей из препрега углепластика  
на основе однонаправленной и равнопрочной углеродных тканей**

Количество зазоров	1 день		5 дней		8 дней		11 дней	
	Величина зазора, мм	Коэффициент вариации, %	Величина зазора, мм	Коэффициент вариации, %	Величина зазора, мм	Коэффициент вариации, %	Величина зазора, мм	Коэффициент вариации, %
<i>Однонаправленная ткань</i>								
1	0,3	86	0,7	84	2,1	67	3,9	8
2	0,7	73	1,2	80	3,5	35	3,8	18
<i>Равнопрочная ткань</i>								
1	0,3	86	2,2	16	2,4	32	0,5	82
2	0,7	52	3,8	11	4,9	11	0,4	53

Как видно из результатов замеров, зазоры увеличиваются в зависимости от длительности выдержки выложенной заготовки плиты в цехе, что свидетельствует об изменении свойств препрегов. Следует отметить, что результаты замеров коробления плит на основе равнопрочной углеродной ткани после 11 сут выдержки заготовки в среднем меньше, чем на плите после 8 сут выдержки. Данную аномалию можно объяснить варьированием свойств препрега.

Для изучения зависимости прочностных свойств плит углепластиков от времени хранения выложенных заготовок до формования в автоклаве определяли механические свойства. Из отформованных панелей из ПКМ с помощью механической обработки вырезали образцы для проведения испытаний в соответствии с ГОСТ 25.604–82 и определяли предел прочности при статическом изгибе. Данный метод используется для изучения поведения образцов из ПКМ для испытания при трехточечном изгибе и для определения прочности при изгибе (отношения максимального изгибающего момента в момент разрушения образца к моменту сопротивления сечения при изгибе) и модуля упругости при изгибе. Сущность метода заключается в том, что образец для испытания, свободно лежащий на двух опорах, кратковременно нагружают сосредоточенной нагрузкой в середине между опорами до полного разрушения. Испытание образцов на определение предела прочности при статическом изгибе позволяет оценить, насколько хорошо материал сопротивляется изгибу. Данный вид испытаний наиболее информативен, так как на образец воздействуют вертикальные и горизонтальные силы, верхние слои образца подвергаются сжатию, а нижние слои – растяжению. Испытания проводили на образцах, установленных на опорах наконечника испытательной машины Zwick/Roell Z050, прогибом вниз и вверх. Результаты испытаний представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

**Результаты испытаний образцов из препрега углепластика на основе жгутового наполнителя**

Время хранения препрега, дней	Толщина образца, мм	Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Коэффициент вариации, %
<i>Образцы, установленные прогибом вверх</i>				
5	4,43	46	445	5
8	4,52	44	405	4
11	4,39	45	415	5
<i>Образцы, установленные прогибом вниз</i>				
5	4,48	42	595	8
8	4,49	44	485	20
11	4,37	44	565	5

Таблица 4

**Результаты испытаний образцов из препрега углепластика  
на основе однонаправленной углеродной ткани**

Время хранения препрега, дней	Толщина образца, мм	Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Коэффициент вариации, %
<i>Образцы, установленные прогибом вверх</i>				
1	2,58	54	700	6
5	2,63	45	548	4
8	2,71	41	453	12
11	2,76	32	603	6
<i>Образцы, установленные прогибом вниз</i>				
1	2,58	54	811	6
5	2,64	55	831	6
8	2,73	40	712	3
11	2,75	49	714	6

Таблица 5

**Результаты испытаний образцов из препрега углепластика  
на основе равнопрочной углеродной ткани**

Время хранения препрега, дней	Толщина образца, мм	Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Коэффициент вариации, %
<i>Образцы, установленные прогибом вверх</i>				
1	2,61	48	720	5
5	2,69	49	739	4
8	2,61	46	777	6
11	2,72	47	745	6
<i>Образцы, установленные прогибом вниз</i>				
1	2,61	48	769	4
5	2,66	50	772	5
8	2,71	47	784	2
11	2,73	48	801	3

Из представленных в табл. 3–5 данных можно сделать вывод, что значения предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе образцов из плит углепластика не снижаются с увеличением времени хранения заготовок из слоев препрега при температуре 22–24 °С до проведения режима формования.

При этом замечено, что при увеличении времени хранения препрега толщина отформованного изделия увеличивается в большую сторону. Это может быть связано с повышением вязкости связующего, что в свою очередь приводит к изменению толщины монослоя.

Проведен ДСК-анализ препрегов углепластика на основе однонаправленной и равнопрочной углеродных тканей с различным временем хранения. Измерения производили в соответствии с ГОСТ Р 56755–2015. Результаты ДСК-анализа приведены на рис. 2.

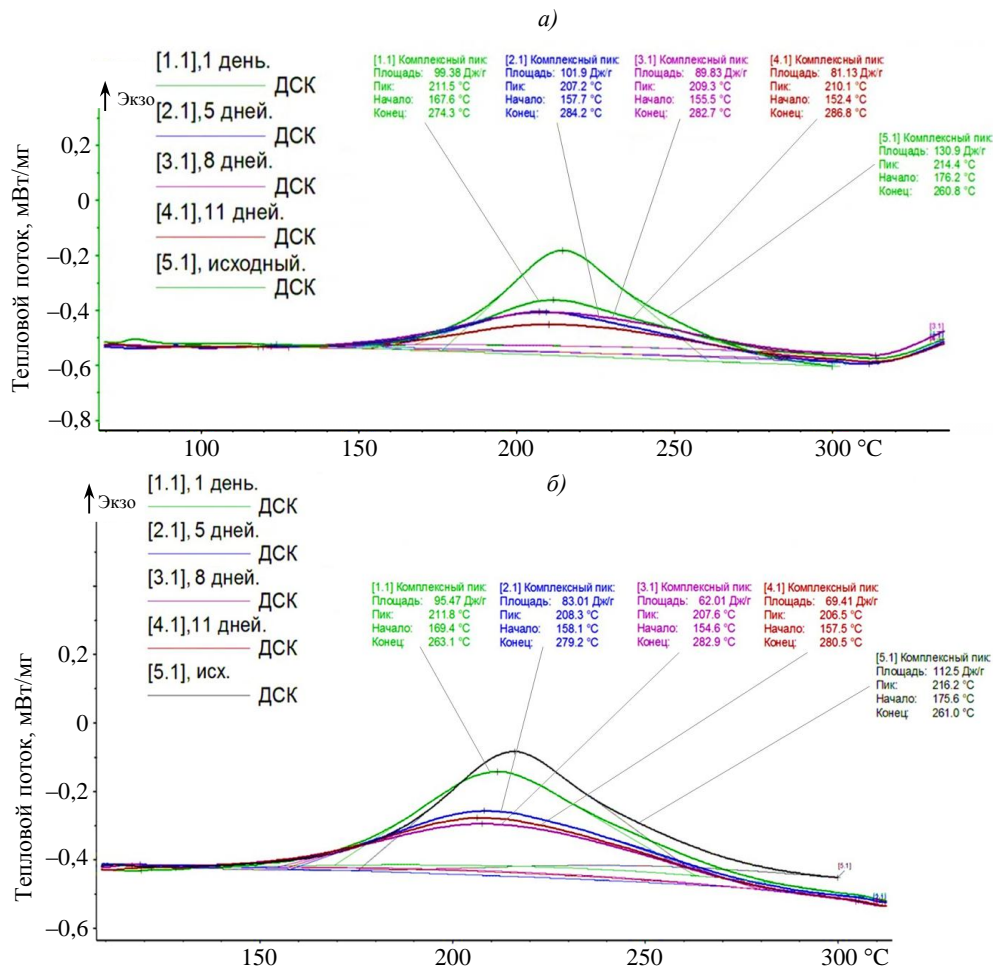


Рис. 2. Кривые ДСК-анализа образцов препрега на основе однонаправленной (а) и равнопрочной (б) углеродных тканей с временем хранения 1, 5, 8 и 11 дней

По результатам ДСК-анализа видно, что начиная с первого дня хранения наблюдается тенденция смещения вправо времени завершения реакции и времени начала повышения температуры пика, одновременно уменьшается количество удельной тепловой мощности, а также происходит изменение формы пика энтальпии. По мере увеличения продолжительности выдержки заготовок препрега пик становится более пологим и занимает больший температурный диапазон, а значит, изменяется кинетика полимеризации связующего, что может оказать влияние на процесс формования детали. Общее направление изменения параметров для препрега углепластика на основе однонаправленной углеродной ткани аналогично изменению для препрега углепластика на основе равнопрочной углеродной ткани, что ожидаемо, так как марка связующего идентична, а меняется только углеродный наполнитель, однако существует разница в количестве связующего в препреге.

### Заключения

На основании исследования плит из углепластика на основе расплавного эпоксидного связующего выявлены и проанализированы некоторые факторы, которые могут повлиять на коробление деталей. Анализ полученных результатов исследования по влиянию продолжительности выдержки заготовок из слоев препрега углепластика до вакуум-автоклавного формования указывает на то, что физико-механические свойства

плит ПКМ соответствуют требованиям нормативной документации, однако наблюдается изменение величины коробления плоских монолитных крупногабаритных плит из углепластика, которая значительно возрастает с увеличением времени выдержки. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что допустимое время нахождения выложенной и неотформованной детали при температуре 20–24 °С соответствует нормативной документации на материал, но следует отметить, что при хранении препрегов в условиях холодильника срок их жизнеспособности возрастает. Выявлено, что при увеличении коэффициента вариации средние значения предела прочности и модуля упругости панелей при статическом изгибе не снижаются. Таким образом, при планировании работ по изготовлению крупногабаритных панелей из углепластиков следует учитывать этот фактор, что должно позволить уменьшить коробление деталей и тем самым оптимизировать их производство для летательных аппаратов. Однако требуются дополнительные исследования влияния толщины плиты на величину коробления, а также количества связующего в заготовке – на степень коробления.

#### Список источников

1. Колпачков Е.Д., Курносое А.О., Петрова А.П., Раскутин А.Е. Гибридные полимерные композиционные материалы для авиации на основе волокнистых наполнителей (обзор) // Вопросы материаловедения. 2020. № 1 (101). С. 126–138. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-126-138.
2. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.
3. Валуева М.И., Евдокимов А.А., Клименко О.Н. Углепластики в конструкциях изделий космической техники (обзор) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 1. С. 12–21.
4. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
5. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
6. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносое 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.
7. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Гириш Р.И., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков в конструкциях летательных аппаратов нового поколения // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 46–52.
8. 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.
9. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Савицкий Р.С. Подход к выбору технологического режима изготовления ПКМ // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111.
10. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
11. Бондарчук Д.А., Федулов Б.Н., Федоренко А.Н., Ломакин Е.В. Анализ остаточных напряжений в слоистых композитах на примере симметричной схемы армирования [0°/90°] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 3. С. 17–26.

12. Шабалин Л.П., Пузырецкий Е.А., Сидоров И.Н., Гирфанова А.М. Методика расчета технологических напряжений для упреждения коробления композитных деталей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 2. С. 52–62. DOI: 10.31857/S0235711921020127.
13. Бондарчук Д.А., Клемарева М.В., Гаделев Р.Р., Назаров Е.В. Использование разных методов определения остаточных напряжений и деформаций в крупногабаритных авиационных деталях из ПКМ на примере стрингерной панели // Вестник машиностроения. 2021. № 12. С. 63–67. DOI: 10.36652/0042-4633-2021-12-63-67.
14. Мантусова О.Ю., Постнов В.И. Расчетно-экспериментальный метод оценки усталостной прочности МПКМ // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4. С. 847–849.
15. Биткина Е.В., Пидодня В.Г., Биткина О.В. Исследование влияния технологических факторов на остаточные напряжения в волокнистом композите // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки. 2011. № 4 (25). С. 59–66.
16. Корольков В.И., Некравцев Е.Н., Сафонов К.С. и др. Исследование процессов устранения коробления авиационных изделий из полимерно-композиционных материалов, полученных методом высокотемпературного формования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10. С. 84–94. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-84-94.
17. Маркин О.В., Кравченко Е.А., Буш А.В., Свиридов А.Г. Анализ причин избыточных короблений нервюры из композиционного материала // Colloquium-Journal. 2021. № 16-1 (103). С. 19–22.
18. Гусева М.А., Петрова А.П. Возможности реологии при исследовании связующих для ПКМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 7. С. 38–44.

#### References

1. Kolpachkov E.D., Kurnosov A.O., Petrova A.P., Raskutin A.E. Hybrid polymer composite materials for aviation based on fibrous fillers (review). *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 1 (101), pp. 126–138. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-126-138.
2. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.
3. Valueva M.I., Evdokimov A.A., Klimenko O.N. Carbon fiber in the design of space technology products (review). *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 1, pp. 12–21
4. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
5. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
6. 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.
7. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N. Constructed layered materials based on sheets of aluminum-lithium alloys and fiberglass in the construction of new generation aircraft. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 12, pp. 46–52.
8. 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. S. 28–34.
9. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Savitsky R.S. Approach to the selection of technological mode for the manufacture of PCM. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111.

10. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
11. Bondarchuk D.A., Fedulov B.N., Fedorenko A.N., Lomakin E.V. Analysis of residual stresses in layered composites on the example of a symmetrical reinforcement scheme  $[0^\circ/90^\circ]$ . *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2019, no. 3, pp. 17–26.
12. Shabalin L.P., Puzyretsky E.A., Sidorov I.N., Girfanova A.M. Technique for calculating technological stresses to prevent warping of composite parts. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2021, no. 2, pp. 52–62. DOI: 10.31857/S0235711921020127.
13. Bondarchuk D.A., Klemareva M.V., Gadelev R.R., Nazarov E.V. The use of different methods for determining residual stresses and strains in large-sized aircraft parts made of PCM on the example of a stringer panel. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021, no. 12, pp. 63–67. DOI: 10.36652/0042-4633-2021-12-63-67.
14. Mantusova O.Yu., Postnov V.I. Calculation-experimental method for estimating the fatigue strength of MPCM. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 847–849.
15. Bitkina E.V., Pidodnya V.G., Bitkina O.V. Study of the influence of technological factors on residual stresses in a fibrous composite. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Physical and mathematical sciences*, 2011, no. 4 (25), pp. 59–66.
16. Korolkov V.I., Nekravtsev E.N., Safonov K.S. et al. Investigation of the processes of eliminating warping of aviation products from polymer-composite materials obtained by high-temperature molding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2021, no. 10, pp. 84–94. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-84-94.
17. Markin O.V., Kravchenko E.A., Bush A.V., Sviridov A.G. Analysis of the causes of excessive distortion of the composite rib. *Colloquium-Journal*, 2021, no. 16-1 (103), pp. 19–22.
18. Guseva M.A., Petrova A.P. Possibilities of rheology in the study of binders for PCM. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2021, no. 7, pp. 38–44.

#### Информация об авторах

**Савицкий Руслан Сергеевич**, инженер-технолог 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Галиуллин Антон Рашидович**, инженер-технолог 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

**Вешкин Евгений Алексеевич**, начальник филиала, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

**Ruslan S. Savitskiy**, Third Category Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Anton R. Galiullin**, Second Category Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Olga Yu. Mantusova**, Third Category Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Evgeny A. Veshkin**, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.10.2022.

The article was submitted 26.09.2022; approved and accepted for publication after reviewing 04.10.2022.