

Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-27-34

ПРЕПРЕГИ И СТЕКЛОПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ВСР-3М И СТЕКЛОТКАНЕЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ КОНСТРУКЦИЙ ЛОПАСТЕЙ ВЕРТОЛЕТОВ

Т.В. Колокольцева¹, Ю.О. Попов¹, М.Н. Усачева¹, А.А. Громова¹

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

Аннотация. Представлены основные результаты по разработке препрегов и стеклопластиков на основе связующего ВСР-3М и стеклотканей марок Т-25(ВМП)-78, Т-10-14 и артикула 120. Описаны процесс разработки препрегов и технологии их изготовления на пропиточной установке, проведен выбор основных параметров пропитки. Правильный подбор параметров пропитки гарантирует получение материалов с требуемыми свойствами. Приведены также результаты исследования свойств препрегов, полученных по выбранным технологическим режимам, и изготовленных из них стеклопластиков.

Ключевые слова: стеклопластик, препреги, лопасти вертолета, связующее, полимерные композиционные материалы, изделия авиационного назначения, стеклоткани

Для цитирования: Колокольцева Т.В., Попов Ю.О., Усачева М.Н., Громова А.А. Препреги и стеклопластики на основе связующего ВСР-3М и стеклотканей для применения в составе конструкций лопастей вертолетов // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-27-34.

Scientific article

PREPREGS AND FIBERGLASS BASED ON VSR-3M BINDER AND FIBERGLASS FABRICS FOR USE IN HELICOPTER BLADES

T.V. Kolokoltseva¹, Yu.O. Popov¹, M.N. Usacheva¹, A.A. Gromova¹

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

Abstract. Presents the main results on the development of glassfiber/epoxy fabric prepregs and composites based on epoxy resin VSR-3M and fiberglass woven fabrics T-25 (VMP)-78, T-10-14 and art. 120. The process of development of prepregs, technology of their manufacture at the impregnation plant, the choice of the main parameters of impregnation are described. Correct selection of impregnation parameters guarantees obtaining materials with the required properties. The results of studying the properties of prepregs obtained according to the selected technological modes and properties of fiberglass composites are also presented.

Keywords: fiberglass, prepregs, helicopter blades, resin, matrix, polymer composite materials, aviation products, woven fabric

For citation: Kolokoltseva T.V., Popov Yu.O., Usacheva M.N., Gromova A.A. Prepregs and fiberglass based on VSR-3M binder and fiberglass fabrics for use in helicopter blades. *Trudy VIAM*, 2022, no. 3 (109), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-27-34.

Введение

В настоящее время ведущие зарубежные производители вертолетов, такие как Eurocopter, Agusta Westland, Sikorsky, Bell, в своих разработках используют широкий спектр полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях лопастей несущих и рулевых винтов [1–3].

Применение ПКМ в конструкциях вертолета обусловлено рядом преимуществ по сравнению с металлами (алюминиевыми сплавами) [4–7], а именно:

- высоким уровнем удельных характеристик прочности как статической, так и длительной при относительно низкой плотности по сравнению с алюминиевыми сплавами;
- высокой стойкостью к концентраторам напряжений, технологическим и эксплуатационным дефектам, позволяющей иметь «мягкий и длительный» характер разрушений;
- отсутствием возможности коррозионных повреждений, которые у металлов приводят к возникновению усталостных трещин с последующим катастрофическим разрушением лопасти.

Преимущества лопастей из ПКМ по сравнению с металлическими общеизвестны, однако слабым звеном при производстве лопастей всегда являлись «недолгоживущие» препреги на основе связующих растворного типа – например, ЭДТ-10П (3–5 сут при температуре 20 °С), а также низкопроизводительная, экологически опасная, энергоемкая растворная технология их производства [8].

Кроме того, опыт эксплуатации вертолетов с лонжеронами несущих лопастей из стеклопластика ВПС-18 (на связующем ЭДТ-10) в странах с тропическим климатом показал наличие такого явления, как значительный «стояночный свес» лопастей, вызываемый изменением упруго-прочностных свойств материала при естественном нагреве, что, очевидно, связано с недостаточной теплостойкостью связующего ЭДТ-10П в стеклопластике ВПС-18 [9–11].

С учетом этих проблем для лопастей вертолетов нового поколения в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны и нашли применение препрег и однонаправленный стеклопластик конструкционного назначения марки ВПС-31 на основе стеклянного ровинга РВМПН10-1200-14 и расплавного эпоксидного связующего ВСП-3М, работающий в диапазоне температур от –60 до +80 °С, включая условия эксплуатации, характеризующиеся повышенной температурой и влажностью (тропические условия) [12–15]. Изделия получают методом намотки или выкладки препрега с последующим формованием в автоклаве или прессе. Материал предназначен для изготовления силовых элементов летательных аппаратов, а также высоконагруженных изделий авиационной техники.

В связи с тем, что для реализации конструктивного решения по изготовлению современных лопастей из ПКМ необходим комплекс материалов на основе единого связующего и наполнителей не только однонаправленной, но и тканой структуры, возникла необходимость разработки препрегов и ПКМ на основе эпоксидного расплавного связующего ВСП-3М и тканых стеклонаполнителей различного функционального назначения типа Т-25(ВМП), Т-10 и стеклоткани артикула 120.

В данной статье представлены основные результаты выполнения работы по разработке таких материалов: описана последовательность действий при разработке препрегов, начиная с определения расчетных значений весового содержания связующего в препрегах, обеспечивающих в стеклопластиках заданный уровень свойств. Особое внимание уделено описанию процесса изготовления препрегов на основе расплавных связующих по технологии *hot-melt* на установке пропитки тканей расплавным методом. Описан процесс выбора основных параметров техпроцесса (температур и зазоров пропитывающих и калибрующих узлов установки), гарантирующих получение препрегов с расчетными весовыми характеристиками и в итоге получение стеклопластиков с заданными свойствами. Приведены результаты исследования свойств препрегов, полученных по выбранным технологическим режимам, и изготовленных из них стеклопластиков.

Материалы и методы

В данной работе разработаны и исследованы препреги и стеклопластики на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСП-3М и стеклонаполнителей:

- конструкционной стеклоткани марки Т-25 (на основе высокопрочных волокон ВМП) для усиления комлевой части лопасти;

- конструкционной стеклоткани типа Т-10 (на основе нитей стекла Е) и стеклоткани артикула 120 для изготовления конструкций противообледенительной системы лопасти.

К разрабатываемым препрегам предъявлялось требование по величине отклонения показателя весового содержания связующего ВСП-3М – не более 4 % от выбранного номинала весового содержания, что должно обеспечить достаточную стабильность свойств в стеклопластиках.

Образцы разрабатываемых препрегов ВСП-3М/Т-25, ВСП-3М/Т-10 и ВСП-3М/120 изготавливали по расплавленной технологии на установке пропитки тканей расплавленным методом.

В процессе исследования технологических режимов изготовления отбирали пробы препрегов (по длине и ширине рулонов) размером 100×100 мм для определения физико-химических свойств препрегов по ГОСТ Р 56796–2015, ММ 1.595-11-138–2002 и ГОСТ Р 56755–2015.

Стеклопластики для проведения испытаний (в виде плит) изготавливали методом послойной выкладки заготовок препрегов ВСП-3М/Т-25, ВСП-3М/Т-10 и ВСП-3М/120 размером 300×300 мм со схемой армирования наполнителей [0°] и последующим формованием в высокотемпературном автоклаве. Из плит вырезали образцы для определения физико-механических свойств стеклопластиков, испытания проводили в соответствии с ГОСТ Р 56682–2015, ГОСТ Р 57739–2017 и ГОСТ Р 56785–2015.

Результаты и обсуждение

В связи с тем, что ПКМ на основе препрегов являются слоистыми материалами, структура которых образуется путем послойной выкладки листов препрега с ориентацией основы наполнителя в соответствии с заданной конструктором схемой армирования, отвечающей схеме нагружения изделия, главным вопросом для конструктора при выборе такого материала для изготовления конкретного изделия из ПКМ является вопрос – что представляет собой монослой и каковы его свойства? Монослой (точнее, его толщина или толщина слоя отвержденного препрега) и заданное количество слоев будут определять геометрические параметры изделия, а стабильность этих параметров ПКМ – разбросом значений показателя толщины монослоя. Что касается свойств монослоя, то их уровень будет определяться соотношением «связующее–армирующий наполнитель». В препрегах это соотношение характеризуется показателем весового содержания, или массовой доли связующего в препреге. В композитах основной характеристикой соотношения «связующее–армирующий наполнитель» является показатель объемного содержания наполнителя. Эта важнейшая характеристика используется в процессе разработки ПКМ при прогнозировании (с использованием закона аддитивности) его физико-механических свойств (плотности, упруго-прочностных свойств, толщины монослоя).

С целью выбора оптимального соотношения «связующее–армирующий наполнитель» в препрегах и ПКМ на первом этапе работы проведен расчет номинальных значений массовой доли связующего в каждом из разрабатываемых препрегов, исходя из типового объемного содержания наполнителя в стеклопластиках конструкционного назначения ~50 %. Соответствующая этому показателю массовая доля связующего, как правило, обеспечивает в изделии получение сплошной, монолитной, беспористой структуры (связующего для этого вполне достаточно), и в то же время упруго-прочностные свойства композита достаточно высоки. Необходимые расчеты выполняли с использованием формул, приведенных в ГОСТ Р 56682–2015. Таким образом, расчетные номинальные значения массовой доли связующего составили:

- для стеклопластика на основе препрега ВСП-3М/Т-25: ~32 %;
- для стеклопластика на основе препрега ВСП-3М/Т-10: ~32 %;

– для стеклопластика на основе препрега ВСП-3М/120: ~36 % (содержание связующего было увеличено, так как данный материал является не конструкционным, а электроизоляционным, для которого типовое объемное содержания наполнителя ~45 %).

В связи с тем, что связующие расплавного типа (в отличие от растворных связующих) практически не вытекают при формовании изделий, полученные значения массовой доли связующего в стеклопластиках можно принять также для препрегов в качестве исходных данных для проведения исследований с целью отработки технологических режимов получения препрегов с заданной (расчетной) массовой долей связующего, причем эти значения при необходимости можно скорректировать по результатам испытаний физико-механических свойств ПКМ.

С учетом того, что отклонение по массовой доле связующего в каждом из препрегов не должно превышать 4 % от выбранного номинала, необходимо провести исследования и окончательно выбрать технологические режимы изготовления, обеспечивающие получение препрегов ВСП-3М/Т-25, ВСП-3М/Т-10 с массовой долей связующего в пределах 32 ± 4 % и препрега ВСП-3М/120 с – в пределах 36 ± 4 %.

Исследование технологических режимов изготовления препрегов ВСП-3М/Т-25, ВСП-3М/Т-10 и ВСП-3М/120 проводили на пропиточной установке расплавным методом. Процесс изготовления препрегов на основе расплавных связующих по технологии *hot-melt* на этой установке заключается в ряде последовательных операций, заложенных в технологический процесс ее работы: нанесение расплава связующего на бумажные технологические подложки (коутеры), совмещение пленки связующего с армирующим наполнителем с помощью серии нагревательных столов и каландров, охлаждение препрега на «холодном» столе, удаление технологических бумажных подложек с помощью деламинатора, нанесение защитной полиэтиленовой пленки с помощью валов ламинатора и намотке готового препрега на картонную гильзу на намоточном устройстве.

Технологические режимы изготовления препрегов представляют собой совокупность параметров пропиточной установки для пропитки тканей расплавным методом: температур нагрева валов устройств нанесения связующего из расплава (коутеров) и вспомогательных нагревательных плит, температур и зазоров калибрующих устройств установки (валов и каландров), скорости протяжки ленты препрега (скорости линии). Эти параметры должны обеспечить достаточную стабильность реологических свойств расплава связующего в процессе нанесения его на подложку для получения препрегов с заданными весовыми характеристиками (поверхностной плотностью препрега и массовой долей связующего в нем); качественную пропитку наполнителей, которые позволят изготовить изделия из ПКМ на основе данных препрегов монолитной, беспористой структуры и с требуемым (заданным) уровнем физико-механических характеристик, а также иметь приемлемую производительность процесса. При этом (в данном конкретном случае) указанные параметры техпроцесса должны обеспечивать стабильное содержание связующего ВСП-3М с отклонениями от выбранного номинального значения не более ± 4 %.

Перед началом исследований с целью выбора оптимальных технологических режимов изготовления препрегов на установке пропитки тканей расплавным методом, обеспечивающих получение расчетных номинальных значений массовой доли связующего, предварительно выполнен ряд необходимых расчетов величин: поверхностных плотностей пленки связующего в препрегах, поверхностных плотностей самих препрегов, толщин монослоя стеклопластиков.

Расчет значений параметра *поверхностной плотности пленки* связующего выполняли исходя из расчетных номинальных значений массовой доли связующего и поверхностной плотности каждого наполнителя (с учетом разброса этого показателя в пределах требований соответствующих технических условий на стеклоткани). Получены следующие интервалы допустимых значений поверхностной плотности пленки связующего, которые использовались при пропитке для настройки зазора между валами устройств нанесения (коутеров) расплава связующего ВСП-3М на бумажную подложку:

- для препрега ВСП-3М/Т-25: 164–180 г/м²;
- для препрега ВСП-3М/Т-10: 131–141 г/м²;
- для препрега ВСП-3М/120: 56–62 г/м².

Расчет *прогнозируемой толщины монослоя* [16] стеклопластиков на основе разрабатываемых препрегов проводили на основе значений поверхностной и объемной плотности каждого наполнителя и его объемного содержания в композите.

Полученные величины использовали для установления оптимальных зазоров калибрующих устройств установки (валов и каландров). Зазоры в каландрах обеспечивают равномерное распределение связующего в препрегах и качественное совмещение с наполнителями, зазоры в ламинаторах – совмещение (прикатку) наполнителя с бумажными подложками и полиэтиленовой защитной пленкой. Все зазоры определяли для каждого препрега исходя из толщины монослоя его стеклопластика с учетом толщин бумажной подложки и полиэтиленовой пленки.

Получены следующие расчетные значения толщин монослоя:

- для препрега ВСП-3М/Т-25: 0,28 мм;
- для препрега ВСП-3М/Т-10: 0,23 мм;
- для препрега ВСП-3М/120: 0,09 мм.

Расчет величины *поверхностной плотности препрегов* проводили для каждого препрега исходя из выбранного номинала массовой доли связующего и поверхностной плотности соответствующей стеклоткани. По этому показателю контролировали правильность выбранных параметров техпроцесса. Получены следующие значения требуемой поверхностной плотности препрегов:

- для препрега ВСП-3М/Т-25: 515–560 г/м²;
- для препрега ВСП-3М/Т-10: 408–446 г/м²;
- для препрега ВСП-3М/120: 154–175 г/м².

В случае, когда поверхностная плотность препрега не соответствовала данным пределам, проводили корректировку зазора между валами коутеров. При этом в процессе отработки режимов визуально оценивали качество пропитки, дополнительно корректируя зазоры в калибрующих устройствах пропиточной установки (каландрах и ламинаторах) и меняя скорость протяжки.

Температуры нагрева валов устройств нанесения связующего из расплава (коутеров), температуры вспомогательных нагревательных плит и калибрующих устройств установки (валов и каландров) выбирали исходя из реологических свойств связующего ВСП-3М в диапазоне температур от 60 до 135 °С, и его реакционной способности, определенной ранее [8] методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термомеханического анализа. В процессе отработки технологических режимов изготовления разрабатываемых препрегов установлено, что при температуре коутера меньше требуемой качественная пропитка возможна лишь на низких скоростях, что непроизводительно, а при более высокой температуре начинается неконтролируемое нарастание вязкости расплава связующего между валами коутеров вследствие начинающейся полимеризации и весь процесс пропитки становится нестабильным.

Температуру каландров и нагревательных столов также выбирали в соответствии с реологическими характеристиками связующего ВСП-3М. В процессе пропитки установлено, что при температурах плит и каландров меньше требуемой качество пропитки наполнителя становится неудовлетворительным (визуально), и в стеклопластике на основе такого препрега существует вероятность возникновения дефектов (непропитанных областей, повышенной пористости) и, как следствие, снижения прочностных характеристик ПКМ. При температурах плит и каландров больше необходимой препрег становился недостаточно технологичным – более жестким и менее липким.

В соответствии с выбранными технологическими параметрами процессов пропитки на установке для пропитки тканей расплавным методом изготовлены препреги и исследованы их весовые характеристики (табл. 1). Приведены также показатели реакционной способности связующего и время гелеобразования связующего в препрегах.

Таблица 1

**Свойства препрегов на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСП-3М
и стеклонаполнителей конструкционного и функционального назначения –
тканей марок Т-25, Т-10 и артикула 120**

Свойства	Значения свойств для препрега марки		
	ВСП-3М/Т-25	ВСП-3М/Т-10	ВСП-3М/120
Массовая доля связующего, %	30–33	28–32	33–37
Поверхностная плотность препрега, г/м ²	525–548	412–436	158–168
Поверхностная плотность наполнителя, г/м ²	363–366	292–296	106–108
Тепловой эффект при отверждении связующего в препреге, Дж/г	125–127	120–122	144–145
Температура начала активной реакции отверждения, °С	156–157	157–158	156–157
Температура пика ДСК, °С	176–177	176–177	176–177
Время гелеобразования связующего в препреге при температуре 130±2 °С, мин	24–25	28–29	25–26

Установлено, что поверхностная плотность изготовленных препрегов ВСП-3М/Т-25, ВСП-3М/Т-10 и ВСП-3М/120 укладывается в интервалы расчетных значений данного параметра, что свидетельствует о правильности выбранных значений параметров техпроцесса изготовления препрегов. Массовая доля связующего в препрегах не выходит за пределы 32±4 % – для препрегов ВСП-3М/Т-25, ВСП-3М/Т-10 и 36±4 % – для препрега ВСП-3М/120.

Из полученных препрегов в высокотемпературном автоклаве изготовили опытные партии плит стеклопластиков со схемой армирования наполнителей [0°], из которых вырезали образцы и провели испытания. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Свойства стеклопластиков на основе препрегов ВСП-3М/Т-25(ВМП),
ВСП-3М/Т-10 и ВСП-3М/120 в сравнении с аналогами**

Свойства	Значения свойств для стеклопластика					
	на основе препрега ВСП-3М/Т-25(ВМП)	аналога – ВПС-20 (связующее ЭДТ-10)	на основе препрега ВСП-3М/Т-10	аналога – ВПС-7 (связующее ЭДТ-10)	на основе препрега ВСП-3М/120	аналога – ВПС-53/120 (связующее ВСЭ-34)
Толщина монослоя, мм	0,283	–	0,225	–	0,09	0,095
Температура стеклования полимерной матрицы в стеклопластике, °С	175	110	180	110	180	154
Прочность при растяжении при температуре 20 °С, МПа	1290	1035	585	560	450	440
Модуль упругости при растяжении по основе при температуре 20 °С, ГПа	43	46	26	27	22	24
Примечание. Приведены средние значения.						

Анализ результатов, представленных в табл. 2, показывает, что по уровню механических свойств стеклопластики на основе разработанных препрегов ВСП-3М/Т-25(ВМП), ВСП-3М/Т-10 и ВСП-3М/120 практически не уступают материалам-аналогам, применяемым в конструкциях лопастей вертолетной техники, и превосходят их по теплостойкости.

Заключения

Разработанные препреги ПКМ на основе расплавленного связующего ВСП-3М и российских наполнителей (конструкционной стеклоткани марки Т-25 (на основе волокон ВМП), стеклотканей типа Т-10 и артикула 120 (на основе нитей стекла Е)) и технологии их

изготовления обеспечивают в стеклопластиках на их основе характеристики прочности и жесткости при растяжении на уровне аналогов по применению и могут быть рекомендованы для применения в конструкциях лопастей – особенно в конструкциях, лонжерон которых изготовлен из однонаправленного стеклопластика марки ВПС-31 на основе стеклянного ровинга РВМПН10-1200-14 и связующего ВСП-3М. При этом материалы на основе связующего ВСП-3М имеют большое преимущество по теплостойкости, что обеспечивает надежность работы изделий в условиях эксплуатации, характеризующихся повышенной температурой и влажностью. Кроме того, применение разработанных препрегов позволит существенно снизить выбросы в атмосферу вредных веществ благодаря использованию расплавленного эпоксидного связующего ВСП-3М в технологии их изготовления.

Список источников

1. Composites take off... in some civil helicopters // CompositesWorld.com: офиц. сайт. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-take-off-in-some-civil-helicopters> (дата обращения: 22.09.2021).
2. Composites-intensive helicopter makes commercial debut // CompositesWorld.com: офиц. сайт. URL: <https://www.compositesworld.com/news/composites-intensive-helicopter-makes-commercial-debut> (дата обращения: 22.09.2021).
3. Weber T.A., Ruff-Stahl H.-J.K. Advances in Composite Manufacturing of Helicopter Parts // International Journal of Aviation, Aeronautics and Aerospace. 2017. Vol. 4. Is. 1. P. 1–33.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
6. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
7. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
8. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Гусев Ю.А., Громова А.А. Разработка конструктивно-технологического решения листового стеклопластика для обшивок хвостовых отсеков лопасти несущего винта вертолета // Труды ВИАМ. 2016. № 1 (37). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-36-41.
9. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Беспалова Л.С., Хрульков А.В., Коган Д.И. Стеклопластик ВПС-31 и гибридный композиционный материал ВКГ-5 из однонаправленных препрегов на основе расплавленного связующего и жгутовых угле-, стеклонаполнителей // Авиационные материалы и технологии. 2006. № 1. С. 10–20.
10. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 16–18.
11. 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.
12. Elkington M., Bloom D., Ward C. et al. Hand layup: Understanding the manual process // Advanced Manufacturing: Polymer & Composite Science. 2015. Vol. 1. P. 128–141.
13. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В. Новые термостойкие гетероциклические связующие и экологически безопасные технологии получения композиционных материалов // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 57–62.
14. Колесник К.А. Моделирование влагонасыщения полимерных композитов в реальных климатических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 77–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-77-86.
15. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
16. Composite Materials Handbook-17. SAE International, 2012. Vol. 1: Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. P. 96.

References

1. *Composites take off... in some civil helicopters*. Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-take-off-in-some-civil-helicopters> (accessed: September 22, 2021).
2. *Composites-intensive helicopter makes commercial debut*. Available at: <https://www.compositesworld.com/news/composites-intensive-helicopter-makes-commercial-debut> (accessed: September 22, 2021).
3. Weber T.A., Ruff-Stahl H.-J.K. Advances in Composite Manufacturing of Helicopter Parts. *International Journal of Aviation, Aeronautics and Aerospace*, 2017, vol. 4, is. 1, pp. 1–33.
4. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFBR*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
6. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
7. Zhelezina G.F., Solovyeva N.A., Makrushin K.V., Rysin L.S. Polymer composite materials for manufacturing engine air particle separation of advanced helicopter engine. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
8. Popov Y.O., Kolokolceva T.V., Gusev Y.A., Gromova A.A. Development of the constructive and technological solution for a sheet fibreglass for tail section skins of helicopter rotor blades. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-42-49.
9. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Bepalova L.S., Khrulkov A.V., Kogan D.I. Fiberglass VPS-31 and hybrid composite material VKG-5 from unidirectional prepregs based on a melt binder and tow carbon and glass fillers. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2006, no. 1, pp. 10–20.
10. Doroshenko N.I., Chursova L.V. Evolution of materials for blades of helicopters. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 16–18.
11. 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.
12. Elkington M., Bloom D., Ward C. et al. Hand layup: Understanding the manual process. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composite Science*, 2015, vol. 1, pp. 128–141.
13. Mukhametov R.R., Akhmadieva K.R., Chursova L.V. New heat-resistant heterocyclic binders and environmentally friendly technologies for the production of composite materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 57–62.
14. Kolesnik K.A. Modeling of moisture saturation in polymer composites in real climatic environmental conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 77–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-77-86.
15. Kablov E.N., Startsev V.O., Inozemtsev A.A. The moisture absorption of structurally similar samples from polymer composite materials in open climatic conditions with application of thermal spikes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
16. *Composite Materials Handbook-17*. SAE International, 2012. Vol. 1: Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. P. 96.

Информация об авторах

Колокольцева Татьяна Вениаминовна, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Попов Юрий Олегович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Усачева Мария Николаевна, техник 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Громова Анна Анатольевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Tatiana V. Kolokoltseva, Leading Design Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yuri O. Popov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria N. Usacheva, Second Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna A. Gromova, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.12.2021.
The article was submitted 15.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 28.12.2021.