
Научная статья

УДК 678.067.5; 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-47-55

ПРЕПРЕГИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ И ПРЕПРЕГ УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ВСЭ-67 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. Разработаны состав и технология изготовления препрегов и полимерных композиционных материалов (стеклопластиков и углепластика) на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-67 и армирующих наполнителей – стеклоткани Т-64(ВМП)-78, стеклоармированной РВМПН10-1200-14 и углеродного жгутов UMT49S-12K-EP. Рассчитаны значения свойств полученных препрегов. Описаны технологии их изготовления на пропиточной установке и выбор основных параметров пропитки. Приведены результаты исследования свойств препрегов, полученных по установленным технологическим режимам, и изготовленных из них полимерных композиционных материалов.

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

Для цитирования: Колокольцева Т.В., Попов Ю.О., Усачева М.Н., Громова А.А. Препреги стеклопластиков и препрег углепластика на основе связующего ВСЭ-67 для применения в составе конструкций лопастей вертолетов // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-47-55.

PREPREGS OF FIBERGLASS AND PREPREG OF CARBON FIBER ON THE BASIS OF THE RESIN VSE-67 FOR THE USE IN THE STRUCTURES OF 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. This article presents the main results on the development of prepregs and polymer composite materials (fiberglass and carbon fiber) based on the melting epoxy resin union and reinforcing fillers-glass-circuits of the T-64(VMP)-78, glass-winding RVMPN10-1200-14 and carbon fiber UMT49S-12K-EP. The process of developing prepregs, technologies for their manufacture on the impregnation, the choice of the main parameters of impregnation is described. The results of a study of the properties of the prepregs obtained under selected technological regimes and made from them PCM are also given.

Keywords: fiberglass, carbon fiber, prepregs, helicopter blades, resin, polymer composite materials, aviation products

For citation: Kolokoltseva T.V., Popov Yu.O., Usacheva M.N., Gromova A.A. Prepregs of fiberglass and prepreg of carbon fiber on the basis of the resin VSE-67 for the use in the structures of helicopter blades. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-47-55.

Введение

Иностранные производители авиационной техники, такие как «Сикорский Эйркрафт», «Эйрбас» и «Бэлл», используют полимерные композиционные материалы (ПКМ) с конца 1970-х гг. В СССР фирма «Камов» к тому моменту уже 25 лет применяла ПКМ для изготовления лопастей несущего винта [1–4].

Данные материалы нашли широкое применение в конструкциях лопастей вертолетов зарубежных и российских производителей благодаря ряду преимуществ по сравнению с металлическими материалами [5–11]:

- высокий уровень удельных упруго-прочностных характеристик, в том числе статической прочности и сопротивления усталости;
- возможность варьирования свойствами в зависимости от ориентации волокон наполнителя, что обеспечивает в конструкции оптимальное соответствие схем нагружения изделия и армирования ПКМ;
- высокая коррозионная стойкость;
- повышение экономичности конструкций вертолетной техники благодаря снижению массы изделий и энерговооруженности труда, увеличению дальности полета и грузоподъемности.

Опыт отечественных и зарубежных производителей показывает, что использование ПКМ уменьшает массу летательных аппаратов на 25–50 %, материалоемкость – в 1,6–3,5 раза, трудоемкость – в 1,5–3 раза, энергоемкость – в 8–10 раз, увеличивает коэффициенты использования материала с 0,3 до 0,85, ресурса – в 1,5–3 раза [8].

Для получения узлов вертолетов, как правило, применяют угле- и стеклопластики, чаще всего на основе связующих из эпоксидных смол. Они характеризуются доступностью, легкостью переработки, имеют высокий уровень механических свойств и хорошую адгезию к армирующим наполнителям.

Поскольку объем использования и уровень требований к свойствам ПКМ для авиационной промышленности и вертолетостроения растут, необходимо совершенствовать применяемые и разрабатывать новые материалы, процессы и методы изготовления продукции. Важными требованиями к материалам для ответственных конструкций являются воспроизводимость характеристик в процессе производства и сохранение заданных свойств в течение срока эксплуатации изделия в условиях окружающей среды (особенно при повышенных влажности и температуре).

В качестве наполнителей применяют однонаправленные углеродные волокна ЛУ-П/0,1, ЛУ-П/0,2, ЭЛУР-П, ВМН-4, УКН-П, стеклоровинги марок РВМПН10-1200-14 и стеклоткани марок Т-25, Т-10. До сих пор используют эпоксидные связующие растворного типа марок 5-211-БН, ЭТФ, ЭНФБ, ЭДТ-10П.

В Российской Федерации в вертолетах марки Ка лонжерон лопастей несущего винта изготавливают из стеклотекстолита СК-5-211БП (на основе стеклянной ткани Т-25(ВСП)-78 и растворного эпоксидного связующего 5-211-Б) и углепластика КМУ-3Л (на основе однонаправленной углеродной ленты ЛУ-П/0,2-А и растворного эпоксидного связующего 5-211-Б) [12].

В вертолетах семейства Ми при изготовлении лопастей несущего и рулевого винтов используют однонаправленные препреги с наполнителями в виде стеклонитей ВМС-6, стеклотканей марок Т-25, Т-10 и растворного связующего ЭДТ-10П; гибридные однонаправленные препреги с наполнителем из стеклонитей ВМС-6, углеродных жгутов УКН-3К и растворного связующего УП-2227.

Однако производство препрегов на основе традиционно используемых связующих растворного типа базируется на энергоемкой, экологически небезопасной, низкопроизводительной технологии. К тому же такие препреги (например, на основе связующих

5-211-Б, ЭДТ-10) обладают рядом недостатков, которые негативно влияют на качество и стабильность характеристик лопастей несущего винта вертолета [13, 14]:

- ограниченная жизнеспособность (от 3 до 12 сут при температуре 20 °С);
- практически неконтролируемая и неуправляемая высокая текучесть связующих при формовании детали;
- использование большого количества токсичных органических растворителей;
- сложность удаления растворителя в полном объеме во время сушки препрега из-за образующейся пленки полимера;
- избирательная адсорбция компонентов связующего поверхностью пропитываемого наполнителя;
- наличие существенных остатков растворителей в препреге (до 5–8 %), что является причиной образования пористости в деталях и, как следствие, снижения уровня и увеличения разброса механических характеристик (в том числе сопротивления усталости), снижения стойкости к воздействию окружающей среды.

Для проектирования лопастей несущего винта перспективных вертолетов марки Ка необходимо разработать новые материалы на основе наполнителей в виде ткани и однонаправленных лент и расплава связующего. За счет исключения растворителей производство таких препрегов позволяет значительно снизить пористость отвержденного материала, уменьшить энергоемкость процесса в 1,5–2 раза в пересчете на единицу продукции, повысить пожаро- и экологическую безопасность процессов, улучшить условия труда. Длительная жизнеспособность (не менее 1 мес при температуре 20 °С), обусловленная составом связующих расплавно-го типа, позволяет стабилизировать процесс производства крупногабаритных изделий авиационной техники вне зависимости от цикла намотки-выкладки, а также организовать централизованные поставки препрегов предприятиям отрасли.

Препреги – это, по сути, неотвержденный композиционный материал, который представляет собой листовой полуфабрикат, в значительной степени подготовленный для производства изделий и состоящий из связующего и пропитанных им армирующих волокон. После воздействия повышенной температуры в результате происходящих в связующем химических реакций препрег превращается в теплостойкий конструкционный материал (ПКМ), обладающий благодаря наличию армирующих наполнителей высокой прочностью, уникальной жесткостью и низкой плотностью по сравнению с традиционно применяемыми металлами. Волокно является основным несущим элементом, поэтому композиционный материал более прочный и жесткий в направлении волокон. Связующее (матрица) в составе композита соединяет («склеивает») волокна наполнителя в единое монолитное целое, перераспределяет приложенную нагрузку и поддерживает волокна, что сохраняет их заданное положение и выбранную ориентацию в пространстве. Матрица также сообщает композиту необходимую для сохранения исходных свойств стойкость к воздействию различных агрессивных факторов окружающей среды и определяет заданную максимальную рабочую температуру эксплуатации изделия. Варьируя состав эпоксидного связующего, можно получать материал с различным уровнем характеристик (тепло- и влагостойкость, стойкость к агрессивным средам и атмосферному воздействию) и технологических свойств (жизнеспособность, температура и длительность отверждения, давление формования, вязкость для определенных методов выкладки).

Стабильность толщины плиты ПКМ зависит от свойств исходных материалов (препрега). Небольшое отклонение в толщине слоя препрега может привести к большим отклонениям в размерах общего сечения толстостенных конструкций, а также

к повышенной пористости и складкам. Вариация по толщине слоя препрега связана с вариацией весовой доли связующего и массы 1 м^2 наполнителя.

Толщина монослоя является одним из основных факторов, влияющих на структуру конструкции из ПКМ. Получение требуемой толщины монослоя имеет решающее значение для достижения необходимых объемной доли и размеров волокна в ПКМ, а также позволяет определить и спрогнозировать геометрические параметры конструкции и стабильность свойств. Уровень характеристик одного слоя препрега и ПКМ будет определяться соотношением содержаний наполнителя и связующего.

При разработке ПКМ с заданным комплексом физико-механических свойств в первую очередь необходимо определить составы соответствующих полуфабрикатов – препрегов на основе отечественных наполнителей, т. е. рассчитать оптимальное соотношение содержаний наполнителя и связующего.

В препрегах это соотношение зависит от такого параметра, как весовая доля связующего $W_{\text{св}}^{\text{преп}}$ – ключевой характеристики, приводимой в технических условиях. Зная величину $W_{\text{св}}^{\text{преп}}$ и массу 1 м^2 наполнителя, можно спрогнозировать с достаточной точностью толщину монослоя $t_{\text{слоя}}$, объемную долю наполнителя $V_{\text{нап}}$ и плотность [15].

Соотношение содержаний наполнителя и связующего в ПКМ выражают через объемную долю наполнителя $V_{\text{нап}}$ (один из ключевых параметров композитов). Чем больше объемная доля армирующего наполнителя $V_{\text{нап}}$, тем выше уровень упруго-прочностных характеристик изделия из ПКМ. При этом объем связующего должен быть достаточным для того, чтобы обеспечить сплошную беспористую структуру композита. В противном случае наблюдается снижение сопротивления усталости и стойкости материала к воздействию факторов окружающей среды.

Кроме заданных весовых и упруго-механических характеристик композиционное изделие должно отвечать требованиям к толщине и другим геометрическим размерам. Поскольку изделие собирается путем послойной выкладки препрега в соответствии с расчетной схемой армирования, особое значение приобретает толщина одного слоя отформованного препрега (монослоя композита). Эта величина зависит от весовых характеристик (массы 1 м^2 , объемной плотности) и объемной доли $V_{\text{нап}}$ наполнителя в составе композита [15]. Толщину изделия конструктор рассчитывает, исходя из показателя $t_{\text{слоя}}$, среднее значение которого указано в технических условиях. Стабильность геометрических характеристик получаемого изделия будет зависеть от допустимого разброса толщины отформованного слоя препрега $t_{\text{слоя}}$.

После определения оптимального состава композита путем расчетов, изготовления и исследования экспериментальных образцов препрегов и ПКМ необходимо решить технологические задачи – подобрать и отработать режимы производства препрегов.

Материалы и методы

Исследованы характеристики препрегов и ПКМ – стеклопластиков ВПС-74/Т-64(ВМП)-78, ВПС-74 и углепластика ВКУ-70 на основе расплавленного эпоксидного связующего марки ВСЭ-67 и наполнителей соответственно:

- стеклоткани марки Т-64(ВМП)-78 конструкционного назначения (из высокопрочных волокон марки ВМП) – для производства обшивок хвостовой части лопасти;
- однонаправленного стекловолокна марки РВМПН10-1200-14 – для производства силовой части лонжерона;
- углеродного однонаправленного наполнителя марки УМТ49S-12К-EP – для производства силовой части лонжерона.

Основные характеристики, которым должны соответствовать ПКМ, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные характеристики полимерных композиционных материалов
при температуре 20 °С**

Показатель	Значения показателей для материалов		
	ВКУ-70	ВПС-74	ВПС-74/ Т-64(ВМП)-78
Модуль упругости при растяжении, ГПа (среднее значение)	≥140	≥45	≥20
Толщина монослоя, мм (номинальное значение)	0,11–0,15	0,20–0,22	0,08–0,1

К весовой доле связующего в препрегах $W_{св}^{преп}$ предъявляли дополнительное требование: для обеспечения приемлемой стабильности характеристик разрабатываемых материалов отклонение (разброс) от принятого среднего (номинального) значения не должно превышать 4 %.

Образцы препрегов ВСЭ-67/Т-64(ВМП)-78, ВСЭ-67/РВМПН10-1200-14 и ВСЭ-67/УМТ49S-12К-ЕР изготавливали по расплавной технологии Hot Melt на пропиточной установке. Для контроля процесса и исследования физико-химических характеристик препрегов из полученных рулонов отбирали пробы размером 100×100 мм. Характеристики препрегов определяли по ГОСТ Р 56796–2015, ММ 1.595-11-138–2002 и ГОСТ Р 56755–2015.

Для испытаний свойств стеклопластиков ВПС-74/Т-64(ВМП)-78, ВПС-74 и углепластика ВКУ-70 из соответствующих препрегов ВСЭ-67/Т-64(ВМП)-78, ВСЭ-67/РВМПН10-1200-14 и ВСЭ-67/УМТ49S-12К-ЕР методом выкладки собраны пакеты размером 300×300 мм со схемой армирования слоев [0°], из которых методом вакуум-автоклавного формования изготовлены плоские плиты. Для определения характеристик ПКМ из плит вырезали образцы, которые исследовали в соответствии с ГОСТ 15139–69, ГОСТ Р 56682–2015, ГОСТ Р 56753–2015, ГОСТ Р 56785–2015, ГОСТ Р 56812–2015, ГОСТ Р 56805–2015, ГОСТ Р 57745–2017, ГОСТ 32658–2014.

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

Результаты и обсуждение

Весовую долю связующего в препрегах $W_{св}^{преп}$ рассчитывали при объемной доле наполнителя $V_{нап}$ в ПКМ: 50 % – для стеклопластиков и 60 % – для углепластика. Полученные значения весовой доли связующего (табл. 2) обеспечивают бездефектную, беспористую структуру и высокий уровень характеристик ПКМ. Расчеты выполняли согласно формулам, приведенным в ГОСТ Р 56682–2015.

Таблица 2

Расчетные значения характеристик препрега

Препрег	Весовая доля связующего, %	Масса 1 м ² , г		Поверхностная плотность препрега, г/м ²	Толщина монослоя, мм (номинальное значение)
		наполнителя	пленки связующего		
ВСЭ-67/Т-64(ВМП)-78	38	100±5	58–64	153–169	0,09
ВСЭ-67/РВМПН10-1200-14	28	298±18	109–123	389–439	0,21
ВСЭ-67/УМТ49S-12К-ЕР	35	127±7	65–72	184–206	0,125

При формировании ПКМ расплавные связующие в отличие от связующих на основе растворителя практически без потерь остаются внутри плиты (не вытекают неконтролируемо), поэтому расчетные значения весовой доли связующего в композите можно использовать для препрегов: $W_{св}^{преп} = W_{св}^{ПКМ} = W_{св}$.

Режимы производства препрегов ВСЭ-67/Т-64(ВМП)-78, ВСЭ-67/РВМПН10-1200-14 и ВСЭ-67/УМТ49S-12К-ЕР с выбранными весовыми параметрами исследовали на пропиточной установке. Принцип производства препрегов по технологии Hot Melt основан на предварительном равномерном нанесении (распределении) расплава связующего на поверхность подложки – антиадгезионной бумаги. Образующаяся из связующего пленка совмещается с полотном наполнителя путем трехступенчатого каландрирования при температурах, обеспечивающих хорошую пропитываемость наполнителя. Необходимое качество препрега достигается за счет плотного контакта между компонентами, что определяет уровень и стабильность свойств изделия из ПКМ [16].

Для выбора «правильных» режимов производства препрегов на пропиточной установке расплавным методом предварительно рассчитали массу 1 м² пленок для связующего и препрегов, а также толщину одного слоя отвержденных препрегов.

Величину и интервалы допустимых значений массы 1 м² пленки связующего для каждого материала определяли с учетом выбранных значений весовой доли связующего и массы 1 м² наполнителя (учитывая возможные колебания значений этого показателя в пределах, указанных в технических условиях). Данный параметр позволил установить величины зазоров между поверхностями валов в узле распределения расплава связующего (коутеров) при нанесении на антиадгезионную бумагу.

Для контроля технологического процесса рассчитывали массу 1 м² пленок препрегов, исходя из принятой весовой доли связующего (с учетом допустимых отклонений) и массы 1 м² наполнителя.

Толщину одного слоя отвержденного препрега (среднее, или номинальное значение) [15] вычисляли с учетом выбранных значений объемной доли наполнителей в ПКМ и их поверхностной плотности (номинального значения по техническим условиям). При отработке технологии данный параметр позволил определить необходимые для качественной пропитки зазоры пропитывающих и калибрующих узлов установки.

С учетом полученных данных отработали режимы производства пленки связующего ВСЭ-67 на установке для пропитки препрегов. Для получения расчетного значения массы 1 м² препрега корректировали зазор между поверхностями валов в узле распределения расплава связующего (коутеров). Качество пропитки отработывали, меняя зазоры в каландрах и ламинаторах, а также скорость пропитки наполнителей.

Характеристики препрегов, изготовленных по установленным технологическим режимам, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства препрегов на основе расплавного эпоксидного связующего ВСЭ-67 и наполнителей Т-64(ВМП)-78, РВМПН10-1200-14 и УМТ49S-12К-ЕР

Показатель	Значения показателей для препрегов		
	ВСЭ-67/ Т-64(ВМП)-78	ВСЭ-67/ РВМПН10-1200-14	ВСЭ-67/ УМТ49S-12К-ЕР
Весовая доля связующего, %	37–39	28–30	33–35
Масса 1 м ² наполнителя, г	101–103	295–300	127–129
Масса 1 м ² препрега, г	163–166	415–423	189–195
Время гелеобразования связующего в препреге при температуре 130±2 °С, мин	19	17	18
Температура начала активной реакции отверждения, °С	155	149	151–152
Тепловой эффект отверждения связующего в препреге, Дж/г	154	162	96–97
Температура пика на кривых дифференциальной сканирующей калориметрии, °С	173	173	173–174

Показано, что разработанная технология позволяет изготавливать препреги ВСЭ-67/Т-64(ВМП)-78, ВСЭ-67/РВМПН10-1200-14 и ВСЭ-67/УМТ49S-12К-ЕР с расчетными значениями весовой доли связующего и массы 1 м^2 препрега.

Толщина монослоя и модуль упругости при растяжении композитов на основе полученных препрегов ВСЭ-67/Т-64(ВМП)-78, ВСЭ-67/РВМПН10-1200-14 и ВСЭ-67/УМТ49S-12К-ЕР соответствуют предъявляемым требованиям (табл. 4).

Таблица 4

**Свойства полимерных композиционных материалов
ВПС-74, ВПС-74 и ВКУ-70 при температуре испытаний 20 °С**

Показатель	Значения показателей для материалов		
	ВПС-74/Т-64(ВМП)-78	ВПС-74	ВКУ-70
Толщина монослоя, мм	0,083–0,089	0,200–0,207	0,121–0,132
Температура стеклования полимерной матрицы, °С	184–196	183–194	169–173
Плотность, г/см ³	1,821–1,901	1,994–2,051	1,540–1,575
Предел прочности при растяжении, МПа	415–480	1690–1820	1750–2030
Модуль упругости при растяжении, ГПа	30,5–32,5	51,5–58,5	134–153
Относительное удлинение при разрыве, %	2,8–3,5	3,1–3,5	1,1–1,4
Предел прочности, МПа:			
– при сжатии	610–800	1580–1750	1210–1310
– при изгибе	1020–1110	1850–2090	1450–1830
– при межслойном сдвиге	82–103	82–103	96–103
– при сдвиге в плоскости листа	81,5–93,0	77,5–81,0	85,0–88,0

Заключения

Исследованы препреги и ПКМ на основе расплавного связующего ВСЭ-67 и отечественных наполнителей: стеклоткани Т-64(ВМП)-78 конструкционного типа (на основе высокопрочных волокон марки ВМП), однонаправленного стеклоровинга РВМПН10-1200-14 и углеродного однонаправленного наполнителя УМТ49S-12К-ЕР. Разработана технология изготовления препрегов с установленными весовыми параметрами. Уровень физико-механических характеристик ПКМ на основе полученных препрегов позволяет рекомендовать их для применения в лопастях перспективных вертолетов.

Список источников

- Composites take off ... in some civil helicopters // CompositesWorld.com. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-take-off-in-some-civil-helicopters> (дата обращения: 22.07.2023).
- Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // Труды МАИ. 2017. № 92. С. 1–33.
- Composites-intensive helicopter makes commercial debut // CompositesWorld.com. URL: <https://www.compositesworld.com/news/composites-intensive-helicopter-makes-commercial-debut> (дата обращения: 22.07.2023).
- 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.
- Kablov E.N., Erofeev V.T., Zotkina M.M., Dergunova A.V., Moiseev V.V., Rimshin V.I. Plasticized эпоху composites for manufacturing of composite reinforcement // Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Engineering Systems 2020. 2020. Vol. 1687. P. 012031.
- Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.

7. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
8. Гуняев Г.М., Сорина Т.Г., Хорошилова И.П., Румянцев А.Ф. Конструкционные эпоксидные углепластики // *Авиационная промышленность*. 1984. № 12. С. 2–16.
9. Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Цыкун Р.Г., Донецкий К.И. Конструкционная многослойная тканая преформа для изготовления фрагмента интегральной панели летательного аппарата // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
10. Антипов В.В., Сомов А.В., Сидельников В.В., Нефедова Ю.Н., Огурцов П.С., Соловьев В.А. Технологические особенности формообразования огнестойкого легкого слоистого материала для изготовления капота двигателя вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-90-100.
11. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
12. Завалов О.А. Конструкция несущих и рулевых винтов вертолетов. М.: МАИ, 2001. 72 с.
13. 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: 28.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-36-41.
14. Мийченко И.П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов. СПб.: НОТ, 2012. 374 с.
15. Composite Materials Handbook-17. SAE International, 2012. Vol. 1: Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. P. 96.
16. Колокольцева Т.В., Попов Ю.О., Усачева М.Н., Громова А.А. Препреги и стеклопластики на основе связующего ВСП-3М и стеклотканей для применения в составе конструкций лопастей вертолетов // *Труды ВИАМ*. 2022. № 3 (109). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-27-34.

References

1. *Composites take off ... in some civil helicopters*. Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-take-off-in-some-civil-helicopters> (accessed: July 22, 2023).
2. Basharov E.A., Vagin A.Yu. Analysis of the use of composite materials in the design of helicopter airframes. *Trudy MAI*, 2017, no. 92, pp. 1–33.
3. *Composites-intensive helicopter makes commercial debut*. CompositesWorld.com. Available at: <https://www.compositesworld.com/news/composites-intensive-helicopter-makes-commercial-debut> (accessed: July 22, 2023).
4. 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.
5. Kablov E.N., Erofeev V.T., Zotkina M.M., Dergunova A.V., Moiseev V.V., Rimshin V.I. *Plasticized epoxy composites for manufacturing of composite reinforcement*. Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Engineering Systems 2020, 2020, vol. 1687, p. 012031.
6. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vol. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
7. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.

8. Gunyaev G.M., Sorina T.G., Khoroshilova I.P., Rumyantsev A.F. Structural epoxy carbon fiber reinforced plastics. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1984, no. 12, pp. 2–16.
9. Belinis P.G., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Tsykun R.G., Donetskii K.I. Design research on a construal multilayer woven preform of an integral panel fragment for aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
10. Antipov V.V., Somov A.V., Sidelnikov V.V., Nefedova Yu.N., Ogurtsov P.S., Soloviev V.A. Technological features of shaping fire-resistant light laminated material for helicopter engine hood manufacturing. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-90-100.
11. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
12. Zavalov O.A. *Design of helicopter rotors and tail rotors*. Moscow: MAI, 2001, 72 p.
13. 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: July 28, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-42-49.
14. Miychenko I.P. *Technology of semi-finished polymer materials*. St. Petersburg: NOT, 2012. 374 p.
15. *Composite Materials Handbook-17*. SAE International, 2012. Vol. 1: Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials, p. 96.
16. 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*, 2018, no. 3 (109), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 27, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-27-34.

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, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Громова Анна Анатольевна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Tatyana V. Kolokoltseva, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

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

Статья поступила в редакцию 26.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.10.2023.

The article was submitted 26.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 06.10.2023.