

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-56-65

ПРЕПРЕГ И УГЛЕПЛАСТИК НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ВСР-3М И УГЛЕРОДНОЙ ТКАНИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ КОНСТРУКЦИЙ ЛОПАСТЕЙ РУЛЕВОГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТОВ

Т.В. Колокольцева¹, Ю.О. Попов¹, И.А. Ланцов¹, Ю.А. Гусев¹

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 препрега и углепластика на основе связующего ВСР-3М и углеродной ткани марки ВТкУ-2.200. Описаны процесс исследования препрега, технология его изготовления на пропиточной установке, выбор основных параметров пропитки. Правильный подбор параметров пропитки гарантирует получение материалов с требуемыми свойствами. Приведены также результаты исследования свойств препрега, полученного по выбранному технологическому режиму, и изготовленного из него углепластика.

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

Для цитирования: Колокольцева Т.В., Попов Ю.О., Ланцов И.А., Гусев Ю.А. Препрег и углепластик на основе связующего ВСР-3М и углеродной ткани для применения в составе конструкций лопастей рулевого винта вертолетов // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-56-65.

Scientific article

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

T.V. Kolokoltseva¹, Yu.O. Popov¹, I.A. Lantsov¹, Yu.A. Gusev¹

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 prepreg and carbon fiber based on the VSR-3M resin and carbon fabric grade VTkU-2.200. The process of studying prepreg, the technology of its production in an impregnation installation, and the selection of the main parameters of impregnation are described. Correct selection of impregnation parameters guarantees the production of materials with the required properties. The results of a study of the properties of prepreg obtained using the selected technological mode and carbon fiber reinforced plastic made from it are also presented.

Keywords: carbon plastic, prepreg, helicopter blades, resin, polymer composite materials, aviation products

For citation: Kolokoltseva T.V., Popov Yu.O., Lantsov I.A., Gusev Yu.A. Prepregs and fiberglass based on VSR-3M resin and fiberglass fabrics for use in helicopter blades. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-56-65.

Введение

В общем случае термин *композит* обычно означает *состоящий из нескольких частей*. В материаловедении, упоминая *композиционный материал*, имеют в виду материал, представляющий собой совокупность двух или более компонентов с различной природой и взаимодополняющими свойствами, который обладает более высокими характеристиками по сравнению с исходными компонентами.

Полимерная матрица (связующее) связывает материалы в единую структурную единицу, защищая их от внешних повреждений, при этом происходит распределение приложенных нагрузок между волокнами, что во многих случаях приводит к улучшению таких свойств, как пластичность и прочность. В полимерных композиционных материалах (ПКМ) требуется прочная межфазная связь между волокном и матрицей, поскольку матрица должна образовывать механические и химические связи с волокнами. Волокно и матрица также должны быть химически совместимыми, особенно при высоких температурах окружающей среды. Матрица также определяет уровень влагопоглощения и диапазон температурных ограничений использования ПКМ. Если требуется высокая прочность и химическая стойкость для конструкции, то, как правило, используется эпоксидное связующее. Связующее увеличивает коррозионную стойкость, защищает волокно от внешних повреждений, а также повышает прочность и устойчивость к поверхностным ударам, порезам, истиранию и другим механическим воздействиям [1].

Наполнители различной природы используются в качестве армирующего компонента и являются основным несущим элементом композиционного материала. Они обеспечивают в готовом ПКМ прочность и жесткость конструкции в направлении волокон, что обуславливается модулем упругости волокон и схемой армирования. Детали, изготавливаемые из армированных ПКМ, можно спроектировать так, чтобы ориентация волокон обеспечивала оптимальные механические свойства и удовлетворяла комплексу эксплуатационных и технологических требований [2].

Наполнители на основе углеродных волокон, обладающие множеством уникальных свойств, наиболее часто используются в современных ПКМ с полимерной матрицей. Такие материалы применяются во многих инженерных конструкциях [1]. В настоящее время ПКМ, армированные углеродным волокном, широко используются для спортивного инвентаря, сосудов высокого давления, корпусов ракетных двигателей, в конструкциях самолетов и вертолетов (например, в крыльях, лопастях, элементах фюзеляжа), которые изготавливают различными методами [3–9].

Углеродное волокно – один из самых современных и перспективных композиционных материалов. Это относительно новый материал, который имеет очень высокую стоимость, что существенно ограничивает его применение. Тем не менее углеродное волокно обладает многими перспективными свойствами, такими как высокие модуль упругости и предел прочности при растяжении, высокое сопротивление ползучести, низкий температурный коэффициент линейного расширения, относительно высокая теплопроводность и низкая восприимчивость к тепловым ударам. Основными недостатками являются склонность к высокотемпературному окислению и высокая электропроводность.

В отличие от однонаправленных наполнителей, которые реализуют свойства только в направлении волокон, тканые наполнители реализуют их в двух направлениях – по основе и утку. Композит на основе тканых наполнителей обеспечивает большую гибкость при выкладке сложных форм.

Для авиационных конструкций предпочтительнее использовать плотно плетеные ткани, чтобы снизить массу, минимизировать размер пустот в смоле и сохранить заданную ориентацию волокон во время формования.

Тканые конструкционные наполнители обычно изготавливают из армирующих жгутов, пряжей или нитей, которые сцепляются друг с другом при размещении сверху или снизу во время процесса ткачества. Свойства тканей зависят от их внутреннего строения, плотности плетения нитей, вида пряжи и условий производства.

Существуют различные виды тканей в зависимости от переплетения по основе (волокно расположено по направлению длины ткани) и утку (волокно переплетает ткань поперек ее длины). В зависимости от вида ткани, ее армирования и типа применяемого волокна можно получать ПКМ с различными характеристиками. Наиболее распространенными видами тканей являются полотняные, сатиновые и саржевые.

Полотняные ткани получают в результате чередования нити утка под и над пересекающейся с ней нитью основы. Такая ткань имеет равномерную плотность и среднюю прочность, одинаковую вдоль и поперек основы, но при этом небольшую драпируемую способность, в результате чего механические характеристики будущего ПКМ будут низкими и возникнут препятствия при изготовлении деталей сложной формы [10].

Сатиновые ткани получают, когда одна нить основы переплетена несколькими нитями утка сверху (не менее четырех) и одной нитью снизу. Ткань имеет высокую плотность по основе и утку. Следует учитывать, что у этих тканей выраженная асимметричность. Ткань имеет большую прочность и жесткость вдоль основы, чем по утку [11].

Саржевые (диагональные) ткани получают при переплетении одной или более нитей основы двумя или более нитями утка поочередно. У таких тканей прямой или изломанный диагональный рисунок. Саржевые ткани имеют лучшую гибкость и драпируемость по сравнению с другими типами тканей. Композиты на их основе имеют высокие показатели механических свойств и характеризуются высокой удельной жесткостью, прочностью, стабильностью и выносливостью [11, 12]. Углепластики на основе саржевой ткани можно использовать при изготовлении обшивок лопастей вертолетной техники, конструкций фюзеляжа, каркасов автомобилей и других конструкций гражданского назначения [12].

При выборе наполнителя необходимо учитывать требования по толщине монослоя и значения модуля упругости при растяжении для разрабатываемого ПКМ.

В данной работе в качестве наполнителя выбрана равнопрочная углеродная ткань ВТкУ-2.200, имеющая тип переплетения саржа 2/2, так как такая ткань позволяет получить высокую драпируемость и гибкость, а также симметричную структуру, что обеспечивает равную прочность по направлениям основы и утка и наиболее соответствует направлению действующих напряжений в готовом материале.

Поверхностная плотность ткани ВТкУ-2.200 составляет 200 г/м^2 , что позволяет получать ПКМ с заданной толщиной одного слоя (0,20–0,24 мм) при оптимальном соотношении компонентов.

Материалы и методы

Препрег на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСП-3М и конструкционной углеродной ткани марки ВТкУ-2.200 с номинальной плотностью 200 г/м^2 получали методом расплава на установке для пропитки наполнителей.

Перед пропиткой определяли поверхностную плотность ткани по ГОСТ 29104.1–91 для получения значений плотности пленки связующего, чтобы не выйти за пределы расчетных параметров препрега.

Для контроля правильности выбранных параметров процесса пропитки наполнителя расплавленным связующим отбирали пробы материала размером $100 \times 100 \text{ мм}$. Контролировали параметр массы 1 м^2 препрега по методике ГОСТ Р 56796–2015.

Выполняли раскрой полученного рулона препрега на образцы для последующих испытаний (размер 100×100 мм) и для формования плит углепластика (размер 300×300 мм).

Образцы размером 100×100 мм исследовали по ГОСТ Р 56796–2015, определяя массу 1 м² наполнителя и препрега, а также массовую долю связующего. Время гелеобразования связующего в препреге определяли по ММ 1.595-11-138–2002.

Углепластик в виде плит размером 300×300 мм выкладывали послойно по схеме армирования [0°] и формовали в автоклаве.

Готовые плиты углепластика разрезали на образцы по направлению приложения нагрузки 0 градусов. Проводили испытания на растяжение с определением предела прочности, модуля упругости и относительного удлинения по ГОСТ Р 56785–2015, на сжатие с определением предела прочности и модуля упругости по ГОСТ Р 56812–2015, на изгиб с определением предела прочности по ГОСТ Р 56805–2015. Плотность образцов определяли по ГОСТ 15139–69, температуру стеклования с определением теплового эффекта при отверждении связующего в препреге – по ГОСТ Р 56753–2015 (метод В).

Образцы исследовали на испытательных машинах. Для измерения массы образцов их взвешивали на весах с точностью до четвертого десятичного знака с наибольшим пределом взвешивания 210 г, дискретностью отсчета 0,0001 г, классом точности I по ГОСТ Р 53228–2008. Для определения линейных значений использовали металлическую линейку с ценой деления 1 мм по ГОСТ 427–75.

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

Основные требования, предъявляемые к исследуемому углепластику, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные требования, предъявляемые к углепластику при 20 °С

Показатель	Требуемое значение показателя
Модуль упругости при растяжении, ГПа (среднее значение)	≥50
Толщина монослоя, мм (номинальное значение)	0,20–0,24

Для обеспечения стабильных свойств препрега и углепластика предъявлено дополнительное требование – отклонение по содержанию связующего в препреге не более 3 % от номинала.

Результаты и обсуждение

Для выбора состава композита (отношение количества связующего к наполнителю) можно применить правило смесей, которое позволяет реализовать аддитивную схему расчета свойств. Следовательно, между свойствами композита (прочностью, жесткостью и пр.) и качеством каждого из компонентов существует прямая зависимость.

С учетом этого выбрали объемную долю наполнителя в ПКМ – от 51 до 57 % (типовое содержание для углепластиков конструкционного типа на основе равнопрочных тканых наполнителей) [13, 14]. Этот объем, занимаемый тканью в композите, достаточен для получения высокого уровня упруго-прочностных характеристик, при этом риск образования пористости от недостаточного количества связующего минимален (композит имеет сплошную бездефектную структуру). Поры снижают объемную долю наполнителя в композите и являются концентраторами напряжений, резко снижающих

общий уровень прочностных характеристик, при этом ограничивая стабильность свойств ПКМ, позволяя проникать влаге и воздействовать агрессивным средам на материал.

Для выбранного интервала объемной доли наполнителя (51–57 %) в композите спрогнозировали толщину монослоя углепластика с использованием зависимости, описанной формулой (1). При этом принят во внимание разброс значений поверхностной плотности наполнителя $200 \pm 10 \text{ г/м}^2$:

$$\delta_{\text{моно}} = \frac{m_{\text{н}}}{10 \cdot \gamma_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{моно}}$ – толщина монослоя углепластика, мм; $m_{\text{н}}$ – масса 1 м^2 наполнителя, г; $\gamma_{\text{н}}$ – плотность наполнителя г/м^3 ; $V_{\text{н}}$ – объемная доля наполнителя, %

Полученные результаты приведены в табл. 2.

Установлено, что расчетная толщина монослоя углепластика при заданных значениях показателей $V_{\text{н}}$ и $m_{\text{н}}$ может изменяться в пределах от 0,19 до 0,23 мм (при среднем значении 0,21 мм, что соответствует поставленным требованиям). Для реализации этих свойств углепластика в изделии препрег должен обладать определенным набором весовых характеристик – содержание связующего ($P_{\text{св}}$), массы пленки связующего ($m_{\text{св}}$) и препрега ($m_{\text{пр}}$) в расчете на единицу площади при известных показателях плотности связующего ($\gamma_{\text{св}}$) и наполнителя ($\gamma_{\text{н}}$). Указанные характеристики рассчитаны с использованием следующих зависимостей:

$$V_{\text{н}} = \frac{m_{\text{н}} / \gamma_{\text{н}}}{(m_{\text{н}} / \gamma_{\text{н}}) + (m_{\text{св}} / \gamma_{\text{св}})} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

$$m_{\text{пр}} = m_{\text{н}} + m_{\text{св}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{св}} = \frac{m_{\text{св}}}{m_{\text{пр}}} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Эти показатели определены для каждого из множества значений $V_{\text{н}}$ и $m_{\text{н}}$. Полученные расчетные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

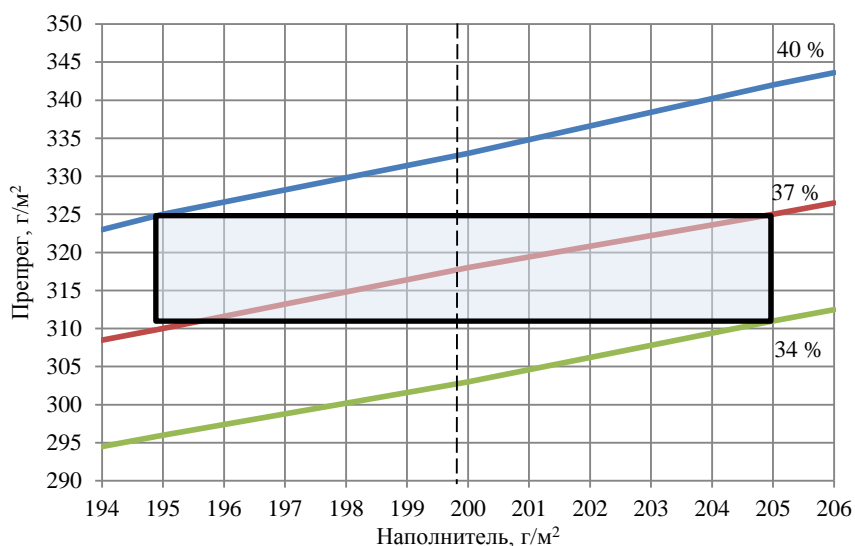
Расчетные значения свойств препрега и углепластика на его основе

Объемная доля наполнителя, %	Масса 1 м^2 наполнителя, г	Плотность наполнителя, г/см^3	Плотность связующего, г/см^3	Толщина монослоя, мм	Масса 1 м^2 пленки связующего, г	Масса 1 м^2 препрега, г	Весовое содержание связующего, %
57	190	1,79	1,23	0,186	98	288	34
54				0,197	111	301	37
51				0,208	125	315	40
57	195			0,191	101	296	34
54				0,202	114	309	37
51				0,214	129	324	40
57	200			0,196	104	304	34
54				0,207	117	317	37
51				0,219	132	322	40
57	205			0,201	106	311	34
54				0,212	120	325	37
51				0,225	135	340	40
57	210	0,206	109	319	34		
54		0,217	123	333	37		
51		0,230	139	349	40		

Анализ расчетных данных по весовым характеристикам препрега показал, что препрег с содержанием связующего $37 \pm 3 \%$ в диапазоне допустимых изменений значений массы наполнителя $200 \pm 10 \text{ г/м}^2$ может обеспечить в углепластике толщину слоя от 0,19 до 0,23 мм (среднее значение 0,21 мм – при условии сохранения связующего в пакете при формовании) при объемном содержании углеродного наполнителя от 51 до 57 %, которое обеспечивает (как показали дальнейшие исследования свойств углепластика) достаточно высокий уровень физико-механических характеристик.

Следует отметить, что показатель массы препрега $m_{\text{пр}}$ (в расчете на единицу площади из этого диапазона) будет напрямую влиять на массу изделия из слоистого ПКМ, а разброс его значений – на стабильность этого показателя.

На рисунке представлена графическая интерпретация зависимостей показателя массы 1 м^2 препрега $m_{\text{пр}}$ от показателя массы 1 м^2 наполнителя $m_{\text{н}}$, приведенных для уровней весовых долей связующего 34, 37 и 40 %. Зависимости построены для значений показателя $m_{\text{н}}$ в диапазоне $200 \pm 5 \text{ г/м}^2$, что отражает реальную картину фактических значений, указанных в сертификатах качества на углеродную ткань. На графике выделена область, полученная путем наложения определенных ограничений на значения для препрега $311 \leq m_{\text{пр}} \leq 325 \text{ г/м}^2$. Любые сочетания значений показателей $m_{\text{пр}}$ и $m_{\text{н}}$ в границах этой области позволяют получать препрег с содержанием $37 \pm 3 \%$. Эти результаты использованы при разработке технологии изготовления препрега с воспроизводимыми параметрами, зафиксированными в технических условиях на препрег.



Зависимости показателей массы 1 м^2 наполнителя и препрега

С помощью удельных характеристик препрега $m_{\text{св}}$ и $m_{\text{пр}}$ выполнены необходимые исследования процесса пропитки армирующего наполнителя углеродной ткани ВТкУ-2.200 расплавом связующего ВСП-3М с целью отработки технологии изготовления экспериментальных образцов препрега ВСП-3М/ВТкУ-2.200, предназначенных для получения образцов разрабатываемого углепластика, свойства которого должны соответствовать поставленным требованиям. Для изготовления экспериментальных образцов препрега использовали пропиточную установку. Характеристика $m_{\text{св}}$ позволяет настроить устройство нанесения связующего на пропиточной установке для получения пленки заданной массы. Показатель массы препрега $m_{\text{пр}}$ на выходе из пропиточной установки служит для оценки правильности выбираемого технологического режима пропитки – по уровню этого показателя происходит корректировка режимов пропитки.

Технология изготовления препрегов на основе расплавных связующих состоит из следующих операций:

- получение пленки связующего на антиадгезионной бумаге при помощи устройств для нанесения связующего – коутеров;
- совмещение пленки и углеродной ткани при прохождении нагревательных столов и каландрирующих валов;
- охлаждение препрега, снятие антиадгезионной бумаги и замена ее на полиэтиленовую пленку с последующей намоткой на картонную шпулю.

Влияние параметров пропитки на качество препрега подробно описано в работе [15].

При определенном выбранном сочетании технологических параметров процесса пропитки на вышеуказанной пропиточной установке расплавным методом изготовлены экспериментальные образцы препрега ВСП-3М/ВТкУ-2.200 и исследованы его свойства.

В табл. 3 приведены весовые характеристики препрега, показатели реакционной способности и времени гелеобразования связующего в препреге.

Таблица 3

Свойства препрега на основе связующего ВСП-3М и углеродной ткани марки ВТкУ-2.200

Свойства	Значения свойств
Весовое содержание связующего, %	36–38
Поверхностная плотность препрега, г/м ²	311–322
Поверхностная плотность наполнителя, г/м ²	197–202
Тепловой эффект при отверждении связующего в препреге, Дж/г	382–387
Температура начала активной реакции отверждения, °С	156–159
Температура пика ДСК, °С	175–176
Время гелеобразования связующего в препреге при температуре 130 ± 2 °С, мин	24–25

Установлено, что поверхностная плотность изготовленного препрега ВСП-3М/ВТкУ-2.200 укладывается в интервалы расчетных значений этого параметра, что свидетельствует о правильности выбранных значений параметров технологического процесса изготовления препрега. Весовое содержание связующего в препреге ВСП-3М/ВТкУ-2.200 не выходит за пределы 37±3 %.

Из полученного препрега методом вакуум-автоклавного формования изготовили опытные партии плит углепластика со схемой армирования слоев наполнителя [0°], из которых вырезали образцы для определения характеристик ПКМ. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства углепластика на основе препрега ВСП-3М/ВТкУ-2.200

Свойства	Значения свойств для углепластика марки ВКУ-46/ВТкУ-2.200
Плотность, г/см ³	1,52
Толщина монослоя, мм	0,208
Объемная доля наполнителя, %	53,65
Модуль упругости при растяжении, ГПа	65,5
Предел прочности, МПа:	
при растяжении	600
при изгибе	870
при сжатии	690
Модуль упругости при сжатии, ГПа	54,3
Примечание. Приведены средние значения характеристик, полученные при температуре испытаний 20 °С; схема укладки армирующего наполнителя [0°] _л .	

Установлено, что углепластик на основе исследуемого препрега ВСП-3М/ВТкУ-2.200 соответствует заданным требованиям по показателям толщины монослоя и модуля упругости при растяжении, приведенным в табл. 1.

По результатам комплекса проведенных исследований свойств указанный углепластик может использоваться в конструкциях агрегатов несущей системы вертолетов как материал внешнего контура, воспринимающий нагрузки при скручивании, в том числе для изготовления обшивок хвостовых отсеков трехслойной конструкции.

Заключения

Выбран диапазон объемного содержания углеродного наполнителя, обеспечивающий достаточно высокий уровень упруго-прочностных характеристик и монолитную структуру композита. Выполнен расчет для прогнозирования толщины одного слоя (монослоя) углепластика с учетом выбранного диапазона содержания углеродного наполнителя. С целью выбора весовых параметров препрега, обеспечивающих необходимые свойства углепластика, выполнены расчеты основных характеристик препрега: содержания связующего, массы пленки связующего и массы препрега в расчете на единицу площади. Установлены также пределы содержания связующего в препреге: $37 \pm 3 \%$, что обеспечит в углепластике объемное содержание наполнителя в интервале от 51 до 57 %.

Предварительно рассчитанные значения весовых характеристик препрега использовали при настройке устройства нанесения пленки и калибрующих узлов пропиточной установки в процессе отработки технологии изготовления препрега с установленной массой связующего на единицу площади.

В соответствии с выбранными технологическими параметрами процесса пропитки расплавленным методом на установке пропитки тканей изготовлен препрег на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСП-3М и конструкционной углеродной ткани марки ВТкУ-2.200 с номинальной плотностью 200 г/м^2 и исследованы его весовые характеристики. Установлено, что масса препрега на единицу площади укладывается в расчетные значения. Это свидетельствует о том, что параметры технологического процесса для изготовления материала выбраны правильно.

Методом послойной выкладки заготовок препрегов с последующим формованием в высокотемпературном автоклаве изготовлен углепластик для проведения испытаний и исследованы его свойства.

По результатам комплекса проведенных исследований свойств углепластик может использоваться в конструкциях агрегатов несущей системы вертолетов и применяться в комплексе с гибридными и однонаправленными материалами на основе связующего ВСП-3М.

Список источников

1. Haidar F. AL-Qrimli, Fadhil A. Mahdi, Firas B. Ismail. Carbon/Epoxy Woven Composite Experimental and Numerical Simulation to Predict Tensile Performance // *Advances in Materials Science and Applications*. 2015. Vol. 4. Is. 2. P. 33–41.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. 560 с.
3. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.

4. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
5. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 3. Сравнение технологий ATL и AFP. Гибридная технология ATL/AFP // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-43-50.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
7. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // *Вестник РФФИ*, 2017. № 3. С. 97–105.
8. Каблов Е.Н. ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
9. 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.
10. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
11. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. / под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1. 448 с.
12. Qiang Liu, Yongzhou Lin, Zhijian Zong, Guangyong Sun, Qing Li. Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle // *Composite Structures*. 2013. Vol. 97. P. 231–238.
13. HexPly Prepreg Technology [Электронный ресурс]. URL: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf (дата обращения: 20.09.2023).
14. Composite Materials Handbook-17 (СМН-17). SAE International, 2012. Vol. 1: Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. P. 96.
15. 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: 27.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-27-34.

References

1. Haidar F. AL-Qrimli, Fadhil A. Mahdi, Firas B. Ismail. Carbon/Epoxy Woven Composite Experimental and Numerical Simulation to Predict Tensile Performance. *Advances in Materials Science and Applications*, 2015, vol. 4, is. 2, pp. 33–41.
2. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*: textbook. manual. Ed. A.A. Berlin. St. Petersburg: Profession, 2011, 560 p.
3. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrul'kov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
4. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrul'kov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 2. Automated Fiber Placement (AFP). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
5. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrul'kov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 3. Comparison of ATL and AFP technologies. Hybrid technology of ATL/AFP. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-43-50.

6. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
7. Kablov E.N. The formation of domestic space material science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
8. Kablov E.N. VIAM: New generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
9. 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.
10. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
11. *Handbook of compositional materials*: in 2 book. Ed. J. Lubina; trans. from Engl. A.B. Geller, M.M. Helmont. Moscow: Mashinostroenie, 1988, book 1, 448 p.
12. Qiang Liu, Yongzhou Lin, Zhijian Zong, Guangyong Sun, Qing Li. Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle. *Composite Structures*, 2013, vol. 97, pp. 231–238.
13. HexPly Prepreg Technology. Available at: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf (accessed: September 20, 2023).
14. *Composite Materials Handbook-17 (CMH-17)*. SAE International, 2012, vol. 1: Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials, p. 96.
15. 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: August 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

Ланцов Игорь Александрович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

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

Igor A. Lantsov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 24.10.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.10.2023.

The article was submitted 24.10.2023; approved and accepted for publication after reviewing 27.10.2023.