
Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ В КОНСТРУКЦИЯХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ (обзор)

С.И. Мишкин¹

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

Аннотация. Проведен обзор по применению углепластиков в различных конструкциях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Представлены основные требования к конструкциям, такие как жесткость, прочность, ударостойкость, стоимость и т. д. Приведен анализ научных публикаций о преимуществах использования конструкционных углепластиков в хвостовом оперении, крыльях, корпусе и лопастях винтов БПЛА. Даны рекомендации по применению разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ углепластиков в конструктивных частях БПЛА.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, конструкция, углепластик, беспилотный летательный аппарат, хвостовое оперение, крылья, лопасть винта, жесткость, препрег, расплавная технология, вакуумная инфузия

Для цитирования: Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.

Scientific article

APPLICATION OF CARBON FIBER PLASTICS IN CONSTRUCTIONS OF PILOTLESS DEVICES (review)

S.I. Mishkin¹

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

Abstract. The overview on application of carbon fiber plastics in different constructions of pilotless devices is carried out. The main requirements to constructions, such as rigidity, durability, shock resistance, cost, etc. are provided. The analysis of scientific publications on advantages of application of carbon fiber plastics is provided in tail plumage, wings, the body and blades of pilotless devices screws. Are given the recommendation about application developed in Research Center Kurchatovsky institut – VIAM of carbon fiber plastics in constructive parts of pilotless devices.

Keywords: polymeric composite material, construction, carbon fiber plastic, pilotless device, tail plumage, wings, propeller blade, rigidity, prepreg, molten technology, vacuum infusion

For citation: Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.

Введение

Отрасль по производству полимерных композиционных материалов (ПКМ) во многих странах мира глубоко вошла в различные ветви промышленности: аэрокосмическую, морскую, автомобилестроительную, жилищного строительства и инфраструктуры, и использование ПКМ растет с каждым годом [1–5].

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят применение в самых разных областях [6]. Их используют в качестве мобильных штативов при фото- и видеосъемке, для доставки почтовых отправок, а также в качестве транспорта спецоборудования для спасательных служб. Большое внимание также уделяется разработке и созданию БПЛА, в которых в качестве топлива используется только солнечная энергия. В настоящее время российские компании проявляют повышенный интерес к созданию БПЛА в форме крыла, источником энергии для которого является солнечный свет [3, 7]. Летные характеристики таких аппаратов позволяют им выступать в качестве «псевдоспутников», поскольку они способны осуществлять продолжительные полеты на довольно больших высотах, практически не загрязняя окружающую среду. По сравнению с орбитальными спутниками БПЛА имеют лучшую маневренность, летают по более низкой траектории и имеют достаточно низкие себестоимость производства и затраты на запуск. Такие аппараты могут осуществлять мониторинг окружающей среды, а также выполнять функции радиоретрансляторов для различных систем связи [3, 7].

Для корпусов всех типов летательных аппаратов предъявляются требования по минимальной массе при достаточно высоких характеристиках прочности и жесткости. Данные требования, как правило, являются взаимоисключающими, поэтому при проектировании корпусов БПЛА возникают задачи оптимизации. Максимальное снижение массы корпуса при обеспечении необходимых жесткости и прочности изделия является целью оптимизации при решении таких задач [8, 9].

Повышенные показатели прочности и модуля упругости при растяжении при меньшей массе и возможность регулирования свойств ПКМ в различных направлениях за счет схемы укладки волокнистого наполнителя в разных частях летательного аппарата являются главными преимуществами таких материалов перед металлами. Лучше всего слоистые ПКМ показывают себя в тонкостенных оболочках, где межслойные напряжения меньше напряжений в слоях волокна [10].

При проектировании БПЛА основной задачей является снижение его массы и повышение жесткости конструкции. Однако из-за высоких аэродинамических нагрузок в полете и необходимости при этом обеспечивать низкую стоимость изготовления летательного аппарата выполнение данной задачи представляется очень сложным [10].

Применение углепластиков при производстве БПЛА позволяет уменьшить массу конструкции на 30–40 % по сравнению с массой планера, изготовленного из классических металлических материалов. Это доказано множеством проведенных экспериментов при выполнении летных испытаний. Композиционные материалы при их комплексном применении позволяют использовать появившееся преимущество в массе для повышения грузоподъемности, уменьшения расхода топлива, увеличения продолжительности или дальности полета [7].

В целом применение композитов в производстве авиационной техники, и в том числе беспилотных аппаратов, позволяет уменьшить материалоемкость конструкций, что увеличивает коэффициент использования материала до 90 % и снижает количество задействованной при производстве оснастки. Кроме того, резко уменьшается трудоемкость изготовления конструкций за счет непосредственного снижения количества входящих в них деталей и элементов [7, 11].

Углепластики обладают уникальными свойствами по сравнению с другими волокнистыми композиционными материалами – низкой плотностью, высокими модулями упругости при растяжении и сжатии, низкой тепло- и электропроводностью, невысоким температурным коэффициентом линейного расширения, стабильностью коэффициентов трения и высокой износостойкостью при трении [12].

Особенностью углепластиков является их высокая долговечность, в том числе по сравнению со стекло- и боропластиковыми, которая по своему уровню соотносится с титаном и легированными конструкционными сталями [7].

Углепластики также более эффективны по вибропрочности, чем металлы и сплавы, поскольку обладают высокой демпфирующей способностью. Ориентирование волокон под углом друг к другу при различных видах укладки позволяет варьировать демпфирующую способность в больших пределах. Кроме того, это дает возможность настраивать отстройку деталей от резонансного режима без преобразования их геометрических форм [7].

Высокий модуль упругости и повышенная прочность при растяжении позволяют ПКМ, и особенно углепластикам, иметь определенное преимущество при эксплуатации БПЛА в условиях высоких нагрузок. К сожалению, эти преимущества проявляются только при условии их оптимального сочетания с элементами металлической конструкции. При этом образуется интегральная конструкция, под которой понимается конструкция, собранная из набора элементов (неотвержденных, частично или полностью отвержденных), произведенная различными технологическими способами. Затем она формируется в единое целое за один технологический цикл [7].

Принцип изготовления такого рода конструкций позволяет получить сложную высоконагруженную композитную конструкцию с максимально возможным количеством входящих в нее элементов без механической обработки деталей, сверления отверстий и установки технологического крепежа. При этом важная роль отводится качественной подготовке технологической оснастки. Соблюдение всего комплекса технологических мероприятий дает возможность в полной мере использовать преимущества не поврежденного механической обработкой конструкционного ПКМ [7] и обеспечивает важное снижение массы интегральных конструкций с одновременным повышением их жесткости, прочности и технологичности. При использовании ПКМ для подкрепления основных силовых элементов масса фюзеляжа может уменьшиться на 20 %, оперения – на 10–15 %, крыла – на 15–20 % [10].

При изготовлении беспилотных авиационных комплексов к ним предъявляется ряд требований, таких как небольшая серийность и низкая себестоимость. В таких условиях наиболее рациональным решением является применение сравнительно недорогих технологий – например, использование систем холодного отверждения для ручного (контактного), вакуумного и компрессионного формования. Метод выбирают в зависимости от количества изготавливаемых деталей, что определяет их качество и в целом стоимость производства. Выбор конкретного метода зависит от уровня капитальных вложений и влияния пути деформации на распределение волокна в конечной детали [11].

Одним из эффективных решений по оптимизации соотношения «жесткость–масса» является изготовление многослойной конструкции. Ее используют в препреговой технологии и вакуумной инфузии с применением автоматизированного оборудования раскроя тканей и автоматической проверки конечного изделия [11].

Основное условие применения ПКМ в БПЛА – отсутствие необходимости в использовании дорогостоящих материалов и сложного специализированного оборудования.

В работе [9] к материалам БПЛА предъявлялись следующие требования:

- высокие удельные механические характеристики;
- потребительская доступность;
- отсутствие необходимости применения дорогостоящих технологий изготовления конечного изделия.

С учетом перечисленных требований для корпуса БПЛА разработан ПКМ, состоящий из следующих компонентов:

- углеродная ткань саржевого плетения (поверхностная плотность 240 г/м^2), применяемая в качестве несущего элемента во внешних слоях панелей корпуса;
- перфорированный полиэфирный нетканый материал, используемый в качестве дистанцирующего заполнителя между несущими слоями (для придания толщины панели);
- базальтовая ткань полотняного плетения (поверхностная плотность 220 г/м^2), применяемая в качестве одного из несущих компонентов во внешних слоях панели;
- инфузионная смола с отвердителем.

Разработанный материал изготовлен по технологии вакуумной инфузии. В данном случае использование базальтовой ткани способствовало уменьшению стоимости примененного ПКМ в конструкции.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Применение углепластиков в различных частях беспилотного летательного аппарата

В настоящее время создание БПЛА для проведения разведки, мониторинга или транспортировки грузов становится одной из приоритетных задач авиа- и вертолетостроения. Ускоренное развитие таких летательных аппаратов в большей мере связано с широким применением ПКМ, из которых изготавливают (практически полностью) силовой набор и внешние контуры планера БПЛА. Это позволяет существенно уменьшить массу летательного аппарата, а также использовать сложные аэродинамические профили с целью повышения его аэродинамического качества для увеличения дальности полета либо массы доставляемой или используемой полезной нагрузки [13].

Известно множество различных типовых схем БПЛА самолетного типа. В работе [13] представлена схема с двухбалочным хвостовым оперением: оперение крепится на двух балках непосредственно к крылу аппарата (рис. 1). Двухбалочная схема компоновки позволяет оптимизировать загрузку фюзеляжа и использовать силовую установку с толкающим винтом, однако приводит и к негативным последствиям, связанным с большой податливостью хвостового оперения. Для снижения негативных последствий, возникающих при такой конструктивно-компоновочной схеме, важно использовать материал с повышенным модулем упругости, которым отличаются углепластики.

Обшивка несущих конструкций, к которым относится крыло БПЛА, представляет собой трехслойную оболочку из углепластика с полимерным наполнителем. Широко применяют так называемые сэндвич-панели. Наиболее распространенный вариант данной структуры – трехслойная панель, внешние слои которой выполнены из относительно жесткого материала, а средний слой представляет собой легкую, как правило, пористую или ячеистую, среду. Основная функция среды состоит в дистанцировании жестких несущих слоев друг от друга для придания изгибной жесткости панели как единого целого. Внешние слои выполняют из легких металлов либо чаще из ПКМ на основе стеклянных или углеродных волокон. Выбор материала наполнителя определяется в том числе дополнительными конструкторскими задачами, например требованиями по теплоизоляции, размеростабильности, вибропоглощению и др. [9].

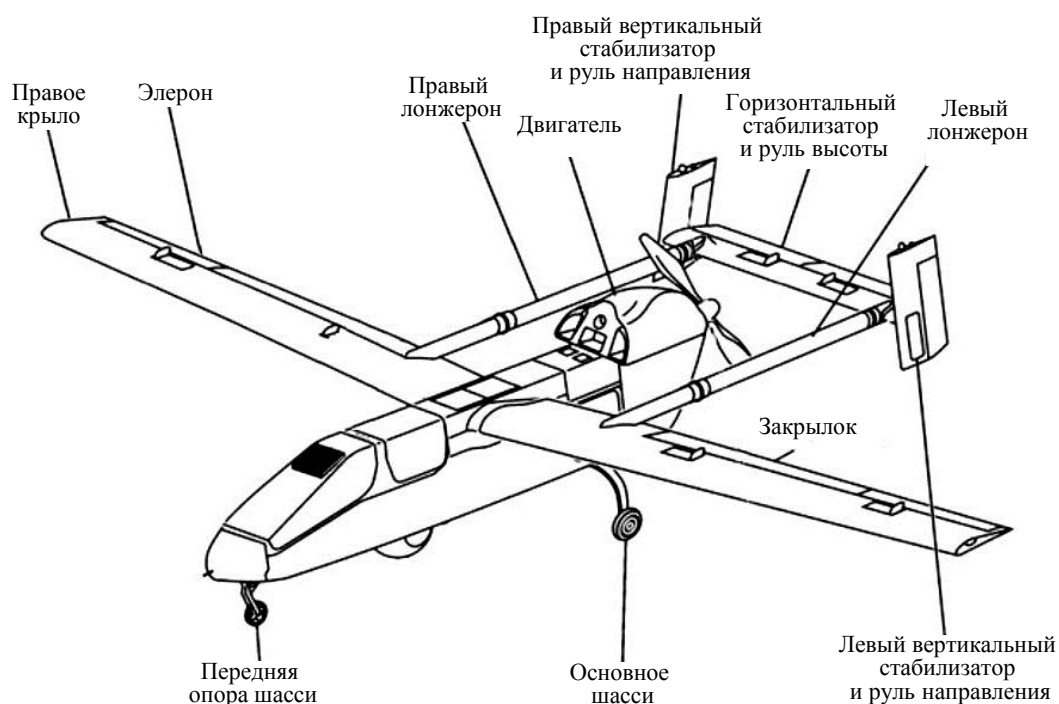


Рис. 1. Общий вид конструкции беспилотного летательного аппарата [13]

Увеличение модуля упругости ПКМ на основе углеродных армирующих наполнителей приводит к повышению жесткости конструкций крыла и центроплана, что позволяет уменьшить риск возникновения флаттера, дивергенции крыла и реверса элеронов [13].

В работе [10] представлен вид хвостового V-образного оперения БПЛА (рис. 2). Показано, что при увеличении удлинения его эффективность повышается. Однако при этом возрастает влияние упругих деформаций конструкции. Их величина зависит от аэродинамических нагрузок, которые сложно математически смоделировать. У современных БПЛА самолетного типа, перемещающихся с высокими скоростями, это влияние может быть достаточно значительным. Особенно это проявляется в конструкциях с тонкими стреловидными несущими поверхностями. Применение углепластиков позволяет уменьшить величину деформации оперения в процессе полета, сохранив при этом массу БПЛА на прежнем уровне для обеспечения заданных летно-технических характеристик. Следует отметить, что рациональное проектирование силовых элементов конструкции летательного аппарата для обеспечения достаточной жесткости в условиях сохранения высоких аэродинамических характеристик за счет применения ПКМ позволяет достичь наилучших показателей его весовой эффективности.

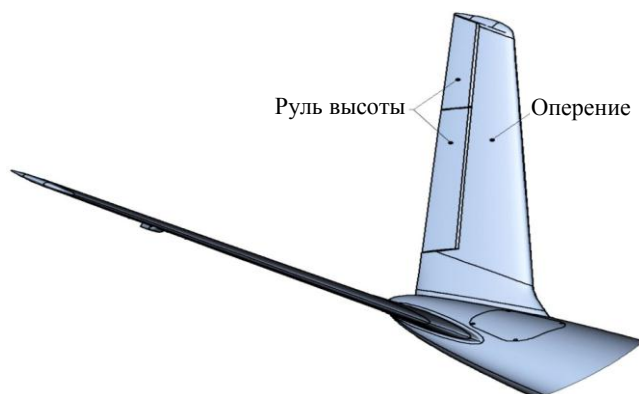


Рис. 2. Общий вид хвостового V-образного оперения беспилотного летательного аппарата [7]

Одной из конструкций БПЛА, чаще всего изготавливаемой из углепластиков, является нервюра крыла. Основная функция нервюры – сохранение геометрической формы крыла при воздействии передаваемого через обшивку распределенного давления, поэтому прогиб элементов обода не должен превышать установленные ограничения, а подкрепляющие стойки терять устойчивость при сжимающих нагрузках. В этих условиях нагружения определяющим фактором несущей способности элементов является модуль упругости материала, поэтому для изделия выбран углепластик как наиболее эффективный материал с точки зрения характеристик прочности и жесткости [8].

В работе [8] показано, как для реализации максимальной жесткости элементов нервюры (рис. 3) использовали высокопрочный углеродный жгут с последующей пропиткой двухкомпонентным инфузионным связующим.

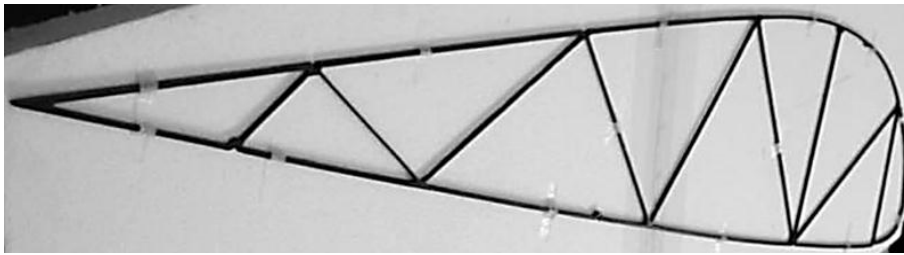


Рис. 3. Нервюра крыла из углепластика [8]

Производители двигателей для БПЛА рекомендуют использовать углепластики на основе углеродных волокон с низкими значениями модуля упругости и высокими показателями предела прочности. Применение винтов из углепластиков в винтовентиляторных двигателях показало [11], что тонкие аэроупругие саблевидные лопасти (рис. 4) хорошо работают на дозвуковых скоростях полета, а также обеспечивают повышение КПД до 15 % и снижение шумности.



Рис. 4. Лопасть толкающего винта в беспилотном летательном аппарате [11]

Высокая степень демпфирования углепластиков при крутильных и изгибных колебаниях обеспечивает значительное увеличение стойкости к флаттеру по сравнению с металлическими лопатками [11].

Углепластики для беспилотного летательного аппарата, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

С использованием современных связующих и расплавной технологии изготовления препрегов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны высокотехнологичные материалы, обеспечивающие стабильность свойств в конечных изделиях и продолжительную жизнеспособность, позволяющую проводить выкладку технологического пакета для формования в необходимые сроки [14–17].

Для изготовления высоконагруженных конструкций, формуемых автоклавным методом, разработана серия углепластиков марок ВКУ-25/SYT49S, ВКУ-28/SYT55, ВКУ-29/ВТКУ-3, ВКУ-39/ВТКУ-2.200 и ВКУ-39/ВТКУ-2.280 на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 с температурой формования до 180 °С, которые

хорошо зарекомендовали себя в деталях мотогондолы двигателя ПД-14. Для снижения затрат на процесс изготовления деталей конструкций препрег углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 также рекомендован для безавтоклавного вакуумного метода формования [17].

Для повышения технико-экономических показателей при изготовлении серийных изделий разработаны препреги углепластиков серии ВКУ-45 на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-34 с пониженной температурой переработки до 140 °С. Углепластики, изготовленные на основе такого связующего, предназначены в первую очередь для элементов механизации [12].

Большую популярность при изготовлении деталей из углепластиков также приобрел метод вакуумной инфузии, позволяющий получать конструкции без использования дорогостоящего оборудования (автоклавов). НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ является разработчиком эпоксидных связующих для вакуумной инфузии следующих марок: ВСЭ-30 (двухкомпонентное), ВСЭ-33 (однокомпонентное), ВСЭ-38 (двухкомпонентное, отверждение при комнатной температуре) и ВСЭ-62 (двухкомпонентное). В зависимости от сложности геометрической формы и габаритов деталей конструкции возможно регулировать вязкость и жизнеспособность связующих при помощи нагревания от 70 до 130 °С [14, 15, 18].

Заключения

Анализ научных публикаций свидетельствует, что диапазон применения композиционных материалов в области изготовления планеров и воздушных винтов для БПЛА достаточно широк. В настоящее время ведущие мировые производители беспилотной авиатехники постоянно наращивают объемы использования композитов при конструировании планеров перспективных дронов. Кроме того, отмечается тенденция к замене крупных металлических компонентов фюзеляжей и планеров перспективных БПЛА компонентами из ПКМ. Предварительный экономический анализ показывает, что ожидается достижение конкурентоспособности композиционных материалов (в сравнении с металлическими) и по стоимости. Однако, несмотря на то, что существует еще ряд препятствий и проблем на пути широкого внедрения ПКМ, которые необходимо решить, можно сделать вывод: будущее при создании перспективных дронов – в разумном применении в их конструкции деталей и агрегатов из ПКМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
4. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // *Директор по маркетингу и сбыту*. 2017. № 5–6. С. 40–44.
5. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *Тезисы докладов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
6. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.

7. Сенюшкин Н.С., Ямалиев Р.Р., Ялчибаева Л.Р. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА // Молодой ученый. 2011. Т. 1. № 4 (27). С. 59–61. URL: <https://moluch.ru/archive/27/2963/> (дата обращения: 07.02.2022).
8. Куприкова Е.Ю., Асеева Т.П., Разина Г.М., Степанов Н.В. Технологические аспекты изготовления ферменной нервюры из композиционных материалов для крыла беспилотного летательного аппарата с использованием цулаги и резинового элемента // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 1. С. 30–33.
9. Павлов М.С., Каравацкий А.К., Костюшин К.В. и др. Оптимальное проектирование корпуса беспилотного летательного аппарата // Вестник Томского государственного университета. 2021. № 73. С. 71–80.
10. Лазорин А.Е., Дегтярев А.А., Поликарпов А.А. Численное исследование прочностных характеристик V-образного оперения беспилотного летательного аппарата на основе композиционных материалов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 3. С. 54–61. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-3-54-61.
11. Каханчик-Пилинога Е., Свистунова А., Лузан М., Бакаев А. Применение перспективных композиционных материалов в беспилотных авиационных комплексах // Наука и инновации. 2017. № 6 (172). С. 34–38.
12. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
13. Нагорнов А.Ю. Флаттер беспилотного летательного аппарата из композиционных материалов с двухбалочным оперением // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <http://www.trudymai.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.34759/trd-2020-113-19.
14. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 38–42.
15. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезистивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.02.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
16. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
17. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
18. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморезистивные 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.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
4. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft building and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.

5. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Abstracts of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
6. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
7. Senyushkin N.S., Yamaliev R.R., Yalchibaeva L.R. The use of composite materials in the construction of UAVs. *Molodoy uchenyy*, 2011, vol. 1, no. 4 (27), pp. 59–61. Available at: <https://moluch.ru/archive/27/2963/> (accessed: February 07, 2022).
8. Kuprikova E.Yu., Aseeva T.P., Razina G.M., Stepanov N.V. Technological aspects of manufacturing a truss rib from composite materials for the wing of an unmanned aerial vehicle using a truss and a rubber element. *Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov*, 2016, no. 1, pp. 30–33.
9. Pavlov M.S., Karavatsky A.K., Kostyushin K.V. et al. Optimal design of the body of an unmanned aerial vehicle. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 73, pp. 71–80.
10. Lazorin A.E., Degtyarev A.A., Polikarpov A.A. Numerical study of the strength characteristics of the V-shaped tail of an unmanned aerial vehicle based on composite materials. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey»*, 2020, no. 3, pp. 54–61. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-3-54-61.
11. Kakhanchik-Pilinoga E., Svistunova A., Luzan M., Bakaev A. Application of promising composite materials in unmanned aerial systems. *Nauka i innovatsii*, 2017, no. 6 (172), pp. 34–38.
12. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
13. Nagornov A.Yu. Flutter of an unmanned aerial vehicle made of composite materials with two-beam plumage. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. Available at: <http://www.trudymai.ru> (accessed: December 16, 2021). DOI: 10.34759/trd-2020-113-19.
14. Muhametov R.R., Ahmadieva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. New polymeric binding for perspective methods of manufacturing of constructional fibrous PCM. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2011, no. 2, pp. 38–42.
15. Tkachuk A.I., Donetskyy K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: February 19, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
16. Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Influence of fillers on properties of adhesive pre-pregs and PCM on their basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
17. 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.
18. 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.

Информация об авторах

Мишкин Сергей Игоревич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey I. Mishkin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.02.2022.

The article was submitted 21.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 25.02.2022.