

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

С.И. Мишкин¹, О.Н. Клименко¹, А.Г. Гуняева¹

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

Аннотация. В связи с увеличением применения ПКМ в конструкциях авиационной техники возникла необходимость в использовании молниезащиты. В статье представлены требования к молниезащите, применяемой в самолетах. Рассмотрены различные способы увеличения электропроводимости ПКМ, в том числе за счет внедрения металлической сетки или фольги, их преимущества и недостатки. Указаны основные разработчики и производители материалов для молниезащиты. Приведен обзор работ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, направленных на разработку молниезащиты для авиации.

Ключевые слова: молниезащита, полимерные композиционные материалы (ПКМ), углепластик, медная сетка, углеродный наполнитель, углеродные наночастицы, металлическая фольга

Для цитирования: Мишкин С.И., Клименко О.Н., Гуняева А.Г. Материалы для молниезащиты авиационной техники // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.

Scientific article

MATERIALS FOR THE LIGHTNINGS PROTECTION OF AVIATION ENGINEERING

S.I. Mishkin¹, O.N. Klimenko¹, A.G. Gunyaeva¹

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

Abstract. Due to the increase in application of PCM in designs of aviation engineering there is use question protection against lightnings. In article requirements to protection against lightnings, applied in airplanes are provided. Different ways of increase in conductivity of PCM, including at the expense of implementation of metal grid or foil, their advantage and shortcomings are considered. The main developers and producers of materials for protection against lightnings are specified. The overview of works of Research Center «Kurchatovsky institute» – VIAM directed on development protection against lightnings for aircraft is provided.

Keywords: protection against lightnings, polymeric composite materials (PKM), CFRP, copper grid, carbon filler, carbon nanoparticles, metal foil

For citation: Mishkin S.I., Klimenko O.N., Gunyaeva A.G. Materials for the lightnings protection of aviation engineering . Trudy VIAM, 2023, no. 7 (125), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.

Введение

С каждым годом в мире увеличивается производство полимерных композиционных материалов (ПКМ) благодаря все большему их использованию в различных деталях самолетов, авиационных двигателей, спортивного инвентаря, автомобилях и других изделиях [1–3]. Широкое применение получили углепластики в специальных отраслях промышленности, что связано с их уникальными характеристиками. В первую очередь это небольшая плотность и высокие прочностные характеристики, что позволяет им конкурировать с традиционными металлами. Высокий модуль упругости делает углепластик незаменимым материалом во многих конструкциях. Преимущество углепластиков также является их стойкость к климатическим воздействиям, агрессивным средам, вибрационным нагрузкам и истиранию в температурных условиях как Арктики, так и тропического климата [3–5].

Современные самолеты все больше оснащают электронными системами навигации и жизнеобеспечения, которые являются неотъемлемой частью безопасности полетов. В свою очередь планер самолета и другие его конструкционные детали все чаще изготавливают из ПКМ. Это приводит к повышению требований по безопасности полетов в сложных метеоусловиях, а именно – по защите конструкций самолета и электроники, находящейся под панелями обшивки, от воздействия разрядов молний [6].

В середине прошлого века металлы (в основном алюминиевые сплавы) являлись самыми распространенными материалами для изготовления внешнего контура планера самолета. Поскольку данные сплавы – хорошие проводники электрического разряда, то вопрос защиты самолета от попадания молний так остро не стоял. На металлических деталях планера самолета в местах попадания молнии образуются локальные зоны плавления или сублимации из-за мгновенного подъема температуры до нескольких сотен градусов за счет энергии разряда тока и саморазогрева материала. В результате образуются незначительные повреждения в виде отверстий или углублений на поверхности металла. Конструкторы тогда закладывали в расчеты коэффициент запаса прочности и увеличивали толщину обшивки деталей, которые чаще всего подвергались воздействию молний [3, 4].

Современные авиаконструкторы должны учитывать, что конструкции из ПКМ необходимо защищать от поверхностного статического электричества и возможного попадания разряда молнии в летательный аппарат. Низкая электропроводимость ПКМ не позволяет надежно проводить токи молнии и защищать элементы, находящиеся внутри летательного аппарата под обшивкой. Во время полета возникновение отверстий, расщепление и расслоение армирующего наполнителя, выгорание связующего могут привести к серьезным последствиям под действием набегающего потока воздуха [3, 5].

Разрушение конструкций из ПКМ обусловлено термическим процессом, который сопровождается взрывом материала под действием продуктов разложения полимерного связующего. Если конструкция изготовлена из стеклопластика или органопластика, то она с большой долей вероятности будет полностью разрушена электротермическим и электродинамическим воздействием молнии [6].

Молнии попадают в самолеты довольно часто (рис. 1) – в среднем один раз за 3000 ч полета. Самолеты могут подвергаться воздействию молниевых разрядов не только в полете, но и на земле. Наиболее опасным для летательного аппарата является попадание молнии при взлете или посадке, так как в данном случае самолет станет проводником электричества между тучей и землей. По статистике молнии чаще попадают в самолеты с двигателями, расположенными сзади, но и самолетам с двигателями на пилонах крыла не избежать попадания молнии [7].



Рис. 1. Результаты ударов молнией в конструкции самолета [7]

Статистика показывает, что чаще всего удары молнии приходятся на носовой обтекатель самолета. Он защищает радиолокационные станции, которые находятся под ним, от воздействия факторов окружающей среды в процессе полета, а также придает самолету аэродинамические свойства. Материалы для носового обтекателя должны обладать не только высокой механической прочностью, но и низкой относительной диэлектрической проницаемостью, чтобы не изменять характеристики электромагнитных волн, проходящих через них. Однако увеличение прочности чаще всего приводит к повышению относительной диэлектрической проницаемости [7].

Стеклопластик – полимерный композиционный материал (ПКМ), который в большей степени подходит для применения в обтекателях самолетов, однако он является диэлектриком. При попадании молнии носовой обтекатель может разрушиться, что приведет к потере аэродинамических свойств самолета и катастрофическим последствиям. Но даже если обтекатель выдержал удар молнии и не разрушился, то в большинстве случаев будут выведены из строя системы навигации и радиолокации, которые находятся под ним, что дезориентирует самолет в пространстве. Очень важно исследовать влияние молниевых разрядов на конструкции самолета и предупреждать возможные последствия таких воздействий [8].

Углепластики за счет использования в их составе электропроводящих углеродных наполнителей и полимерного связующего, не проводящего ток, находятся в промежуточном положении между диэлектриками, такими как стеклопластики и органические пластики, и алюминиевыми сплавами. У углепластиков электропроводимость в тысячи раз меньше, чем у металлов, поэтому для защиты углепластиковых конструкций самолета от молниевых разрядов также требуются специальные материалы и покрытия [8].

Материалы для молниезащиты конструкций из ПКМ в авиационной технике и требования к ним

Поскольку ПКМ плохо проводят электрический ток либо являются диэлектриками, то защита конструкций самолета, изготовленных из ПКМ, является важнейшей задачей для обеспечения безопасности полетов.

Принцип обеспечения защиты ПКМ от молниевых разрядов заключается в придании им электро- и теплопроводящих свойств, близких к характеристикам металлов. Существует множество способов достижения данной цели, которые основаны на нанесении на поверхность металлических молниезащитных покрытий (МЗП). В зависимости от конструкции самолета и вероятности попадания молнии авиаконструктор принимает решение о применении того или иного МЗП.

При разработке МЗП необходимо обеспечить надежность защиты с учетом экономических и эксплуатационных требований, а именно:

- сохранение целостности конструкции самолета с покрытием после попадания молнии;
- отсутствие увеличения массы конструкции при нанесении покрытия;
- низкая стоимость, технологичность и доступность компонентов покрытия;
- сохранение маневренности и скоростных режимов самолета при нанесении покрытия;
- исключение дополнительных затрат горючего на преодоление увеличения массы конструкции за счет нанесенного покрытия;
- отсутствие коррозионных процессов на границе «конструктивная часть изделия–МЗП»;
- ремонтпригодность конструкций с покрытием [7–9].

Один из способов придания молниезащитных свойств композиту – добавление (вплетение) в структуру металлических проволок. Диаметр проволоки обычно находится в диапазоне от 25 до 250 мкм. В качестве материала проволоки чаще всего используют медь, которая не образует с углеродным волокном контактную пару. Иногда используют луженую оловом медь для лучшей защиты металла от коррозии и контакта в местах пересечения проволоки для равномерного рассеивания электрического разряда. Алюминий по сравнению с медью имеет меньшую плотность и стоимость, но проблема применения алюминиевых проволочек заключается в контакте с углеволокном, в результате которого с течением времени алюминиевые проволочки разрушаются. Поскольку проволока переплетена внутри углепластика, то возможно повреждение ниже наружной поверхности конструкции из ПКМ [10].

Такая технология защиты от молний позволяет избежать значительного увеличения массы самолета, а следовательно, исключить дополнительные затраты горючего и сохранить его маневренность, так как препрег углепластика с металлической проволокой входит в конструктивно-силовую схему изделия и формируется в едином технологическом цикле [10, 11].

Существует технология нанесения покрытия из алюминия, меди и никеля на поверхность стеклянных и углеродных волокон. В молниезащитном покрытии отдельные волокна могут воспринимать значительное количество электрического тока благодаря термической связи между металлом и волокном. Например, стеклянное волокно за счет хорошего теплоотвода позволяет металлическому покрытию выдерживать значения силы тока в 2 раза больше, чем обычно может восприниматься таким же объемом чистого алюминия. В области попадания молнии некоторое количество алюминия будет испаряться по типу взрыва, а поврежденная площадь будет зависеть от интенсивности тока и количества алюминия на препреге. Конструкции самолета, в том числе из ПКМ, покрывают грунтовками и эмалями, которые будут сдерживать выделяющиеся при попадании молнии газы от взрыва, что приводит к дополнительному воздействию на композит, причем дополнительное количество повреждений будет связано с массой покрывающего материала. Такой метод молниезащиты работоспособен только для массивных защитных конструкций [11].

Для молниезащиты авиационных конструкций, в том числе мотогондол современных двигателей, может применяться приведенная на рис. 2 система материалов. Для уменьшения массы конструкции целесообразно применять выравнивающее покрытие типа SynSkin, состоящее из связующего с интегрированной в него металлической сеткой (рис. 3) или фольгой. При традиционной технологии изготовления МЗП требуется на стеклопластиковую подложку (для защиты металла от коррозии с углепластиком) нанести слой клея с дальнейшим выкладыванием металлической сетки или фольги. Далее требуется

выравнивание поверхности изделия с помощью клея, грунтовки и эмали. Покрытие типа SynSkin может заменить сразу пять слоев в данной системе, что облегчит конструкцию и уменьшит трудоемкость нанесения МЗП [11, 12].

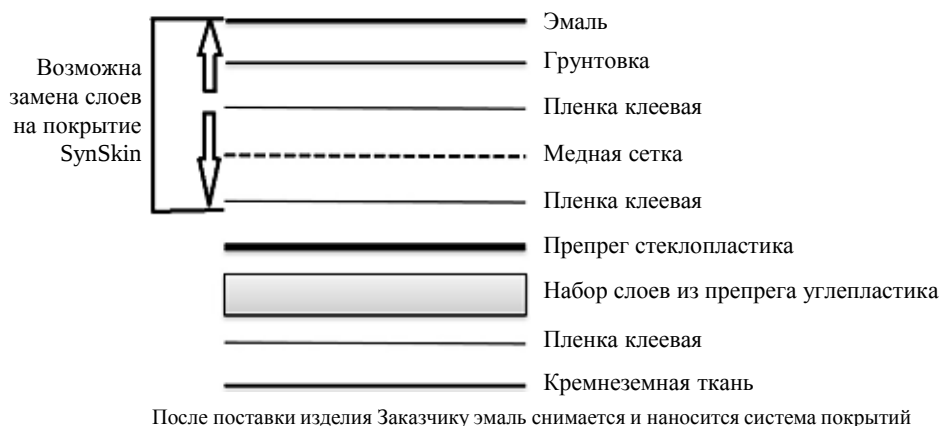


Рис. 2. Система материалов для изготовления авиационных конструкций

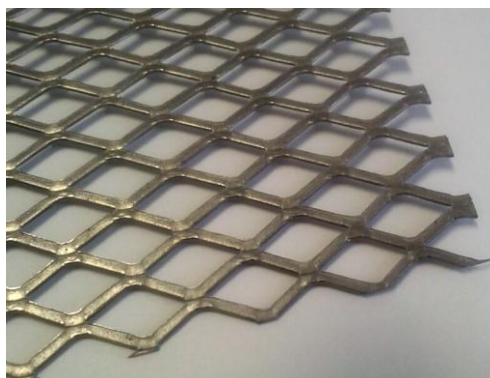


Рис. 3. Металлическая молниезащитная сетка [12]

Эксперименты показывают, что применение металлических МЗП существенно снижает размер поражения конструкций из углепластиков. Разрушение заключается в сублимации металлического покрытия на площади нескольких сантиметров и эрозии связующего в двух-трех верхних слоях углепластиковой конструкции.

Существуют также разработки МЗП без применения металлов в качестве проводников электрического тока для уменьшения массы конструкций из ПКМ. Для придания электропроводящих и теплопроводных свойств ПКМ используют углеродные проводящие частицы (сажа, графит, технический углерод) и различные наномодификаторы, которые добавляют в полимерные связующие. Но практика показывает, что такие МЗП хуже выдерживают попадание разряда молнии и практически не применяются в авиации [11].

Разработчики и производители материалов для молниезащиты

Работы по исследованию и разработке молниезащитных систем за рубежом были начаты в 1980-х годах практически всеми ведущими странами мира. В США работы в данной области проводят такие фирмы, как Boeing, LCI Logic, General Electric, Lord Corporation, Goodrich Corporation; в Германии – EADS; в Великобритании – Chelton Electrostatics; в Японии – Mitsubishi Electric, Poliplastics; в Испании – Const Aeronauticas, Airbus; во Франции – Aerospatiale societe Nationale Industriel; в Сингапуре – Agency science tech&res [11].

Основным разработчиком в области составов МЗП является фирма Boeing, где в основном применяют молниезащитные системы на основе приклеенной фольги или напыленных металлов (алюминий, медь, никель), медных или алюминиевых шин и секток. Наиболее перспективные разработки фирмы Boeing в области создания молниезащитных систем – это алюминиевая или медная проволока и покрытые алюминием или никелем углеродные волокна [11, 12].

Наиболее распространенный способ защиты углепластиковых конструкций за рубежом – это медные фольги фирмы Dexmet. Ее аналоги – медные прокатанные просечно-вытяжные фольги – начали производить и в России.

В отечественной промышленности работы по созданию авиационных молниезащитных систем были начаты в конце 1980-х – начале 1990-х годов. Основные разработки ведут ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля», ФГОУ ВПО НИУ «МЭИ», КБ «Салют» – филиал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Отечественные разработки в основном ведутся в том же направлении, что и за рубежом – применение металлических элементов в молниезащитных системах. Недостатками таких разработок являются увеличение массы конструкции, проблемы коррозии металлов, а также трудоемкость процесса изготовления [11, 12].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ долгие годы занимаются разработкой молниезащитных материалов. Результаты исследований по модификации связующего фуллереном C_{60} и астраленом, обладающих высокой проводящей способностью, показали возможность получить в полимерной матрице цепочечную проводимость. Этот фактор позволяет увеличить трансверсальную проводимость, обеспечить многовекторность рассеяния электрического тока в двух и более слоях углеродного наполнителя МЗП, что значительно повышает надежность защиты внешнего контура углепластиковой конструкции от воздействия смещающихся разрядов молнии [13].

В мировой практике применение наномодификаторов в составе МЗП для повышения электропроводимости ПКМ предложено в ряде компаний (LCI Logic, Bocherens Eric, Chelton Electrostatics, Poliplastics, Agency science tech&res), но не реализовано из-за высокой стоимости и низкой технологичности ремонта [11].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ также разработана металлоуглеродная ткань марки ВТкУ-2.280М с поверхностной плотностью 280 г/м^2 (рис. 4), в которой переплетены углеродные волокна типа Т-300 3К и медная луженая проволока диаметром 0,10–0,15 мм, что позволяет избегать коррозии при контакте с углеродным волокном. Препрег на ее основе может применяться как МЗП, которое входит в состав конструкции и воспринимает силовые нагрузки. Ткань ВТкУ-2.280М можно также использовать для вакуумной инфузии обшивок деталей и агрегатов из ПКМ, выходящих на внешний контур планера самолета [14].

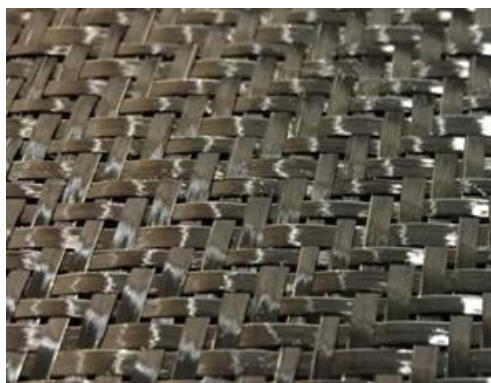


Рис. 4. Ткань марки ВТкУ-2.280М, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [11]

Выравнивающие композитные пленки типа SynSkin (в частности, марки LOCTITE EA 9837.1 AERO производства фирмы Loctite Aerospace), которые содержат легкие молниезащитные сетки или фольгу, можно использовать в составе композиционных материалов в качестве выравнивающего поверхностного слоя. Эти продукты обеспечивают намного более простую обработку и укладку, улучшенное качество поверхности отвержденной композитной детали [15].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Заключения

В связи с широким применением ПКМ в самолетостроении возникла проблема, связанная с защитой таких конструкций от попадания молнии. Обзор представленных в настоящее время технологий изготовления МЗП показал, что для молниезащиты ПКМ наибольшее применение получило использование на поверхности планера самолета металлических фольг и сеток. Это приводит к увеличению массы конструкции на 300–400 г на каждый 1 м² поверхности ПКМ, что несколько ухудшает эффект снижения массы самолета от применения ПКМ. Остается также проблема возможности образования коррозии в контактной паре «углепластик–металл» [11].

В настоящее время активно проводятся научные исследования в области молниезащиты авиационной техники в различных университетах, институтах и компаниях, главным образом в США, Европе, России и Японии, которые направлены на создание МЗП из термостойких ПКМ на основе модифицированных наночастицами электропроводящих связующих [11, 12].

Список источников

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. 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.
6. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2013. Ч. 1. 118 с.
7. 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: 16.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
8. Гуляев И.Н., Гуняева А.Г., Раскутин А.Е., Федотов М.Ю., Сорокин К.В. Молниезащита и встроенный контроль для конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2013. № 4. Ст. 10. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 12.03.2023).

9. 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.
10. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Кривонос В.В. и др. Повышение трансверсальной проводимости конструкционных углепластиков, модифицированных фуллероидными наночастицами // *Нанокompозиты: исследование, производство, применение*. М.: ТорусПресс, 2004. С. 20–23.
11. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Начинкина Г.В., Гуняева А.Г., Куприенко В.М. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содержащие наночастицы // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. № 3. С. 24–35.
12. Гуняева А.Г., Чурсова Л.В., Федотов М.Ю., Черфас Л.В. Исследование влияния молниевых разрядов на углепластик с наномодифицированным молниезащитным покрытием и системой встроенного контроля на основе волоконных брэгговских решеток // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 1 (85). С. 80–91.
13. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
14. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
15. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 20.03.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.

References

1. 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.
2. 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.
3. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE "VIAM" in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
4. 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.
5. 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.
6. Bondaletova L.I., Bondaletov V.G. *Polymer composite materials: textbook*. Tomsk: Publ. House of Tomsk Polytech. Univ., 2013, part 1, 118 p.
7. 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: February 16, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
8. Gulyaev I.N., Gunyaeva A.G., Raskutin A.E., Fedotov M.Yu., Sorokin K.V. Lightning protection and the built-in control for designs from PCM. *Trudy VIAM*, 2013, no. 4, paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 13, 2023).
9. 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.

10. Kablov E.N., Gunyaev G.M., Krivonos V.V. et al. Increasing the transversal conductivity of structural carbon fiber reinforced plastics modified with fulleroid nanopa. *Nanokompozity: issledovaniye, proizvodstvo, primeneniye*. Moscow: TorusPress, 2004, pp. 20–23.
11. Gunyaev G.M., Chursova L.V., Raskutin A.E., Nachinkina G.V., Gunyaeva A.G., Kuprienko V.M. Lightning protective coatings for structural carbon plastics containing nanoparticles. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2012, no. 3, pp. 24–35.
12. Gunyaeva A.G., Chursova L.V., Fedotov M.Yu., Cherfas L.V. Investigation of the effect of a lightning discharge on carbon plastic with a nanomodified lightning protection coating and a built-in control system based on fiber Bragg gratings. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 1 (85), pp. 80–91.
13. Belinis P.G., Donetskii K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
14. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
15. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.

Информация об авторах

Мишкин Сергей Игоревич, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Клименко Оксана Николаевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гуняева Анна Георгиевна, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey I. Mishkin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oksana N. Klimenko, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna G. Gunyaeva, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.05.2023.

The article was submitted 04.05.2023; approved and accepted for publication after reviewing 17.05.2023.