

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.09

УДК 629.7

**А.Н. Саженов¹, В.В. Ваганов¹, В.М. Осокин²,
Н.А. Саженов², В.Ю. Ульяницкий³**

¹ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

³Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского
отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

МОЛНИЕЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ МОТОГОНДОЛ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 2. ПЕРСПЕКТИВНАЯ ДЕТОНАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Представлены результаты апробации детонационной технологии нанесения молниезащитного покрытия и результаты проверки молниестойкости образцов конструктивно-подобных элементов мотогондолы из полимерных композиционных материалов с нанесенным по этой технологии покрытием.

Молниезащитное покрытие напыляли на образцы конструктивно-подобных элементов мотогондолы из препрега углепластика ВКУ-25. Нанесение покрытия выполняли с помощью детонационного компьютеризированного комплекса ССДС2000 разработки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук. В качестве материала молниезащитного покрытия применяли медь, бронзу и алюминий. Толщину нанесенного металлизированного слоя изменяли от 10 до 20 мкм, что обеспечило предельно низкий удельный вес молниезащиты на уровне 0,087–0,178 кг/м² для меди и бронзы; 0,027–0,054 кг/м² для алюминия.

Образцы с нанесенным молниезащитным покрытием и без покрытия испытывались моделируемым разрядом молнии согласно требованиям авиационных норм АП-25, включающим компоненты применительно к молниеподобной зоне 1А, 2А, 1В. Комбинации компонентов в соответствии с квалификационными требованиями КТ-160G.

По результатам испытаний на молниестойкость образцов из препрега углепластика ВКУ-25 продемонстрирована функциональная работоспособность детонационной технологии для любой молниеподобной зоны мотогондолы согласно АП-25. У образцов с детонационным напылением сквозных разрушений углепластика не обнаружено. Образцы без молниезащитного покрытия оказались нестойкими к воздействию тока молнии.

Апробированная детонационная технология имеет технический потенциал снизить до трех раз удельный вес токопроводящего слоя молниезащитного покрытия, применяемого в мотогондолах из полимерных композиционных материалов серийно эксплуатируемых авиационных двигателей.

Ключевые слова: молния, авиационный двигатель, мотогондола, полимерные композиционные материалы, углепластик, препрег, молниезащитное покрытие, детонационная технология напыления, токопроводящий слой, образец, удельный вес.

**A.N. Sazhenkov¹, V.V. Vaganov¹, V.M. Osokin²,
N.A. Sazhenkov², V.Y. Ulyanitsky³**

¹UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Lavrentyev Institute of Hydrodynamics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

LIGHTNING-PROTECTIVE COATINGS FOR AIRCRAFT ENGINE NACELLES MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS. PART 2. ADVANCED DETONATION TECHNOLOGY FOR APPLYING A LIGHTNING-PROTECTIVE COATING

The present paper contains results of trying the detonation technology of applying a lightning-protective coating and the results of testing the lightning resistance of samples of structurally similar elements of a nacelle made of polymer composite materials and coated using this technology.

A lightning-protective coating was sprayed on samples of structurally similar elements of a nacelle made of carbon fiber prepreg VKU-25. The coating was applied using the CCDS2000 detonation computerized complex developed by the Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Copper, bronze and aluminum were used as materials for the lightning-protective coating. The thickness of the applied metallized layer was varied from 10 to 20 microns, this providing an extremely low specific gravity of lightning protection at the level of 0.087–0.178 kg/m² for copper and bronze; 0.027–0.054 kg/m² for aluminum.

Samples with and without lightning-protective coating were tested with a simulated lightning discharge according to the requirements of aviation standards AP-25, including components related to lightning-hazardous zones 1A, 2A, 1B. The combinations of components complied with the qualification requirements of KT-160G.

According to the results of tests on the lightning resistance of samples made of the VKU-25 carbon fiber prepreg, the functional operability of the detonation technology for any lightning-hazardous zone of the nacelle according to AP-25 has been demonstrated. No through destruction of carbon fiber was found in samples with detonation spraying. Samples without lightning-protective coating turned out to be non-resistant to the lightning current exposure.

The tried detonation technology has the technical potential to reduce (up to 3 times) the specific gravity of the conductive layer of the lightning-protective coating used in the engine polymer nacelles of commercially operated aircraft engines

Keywords: lightning, aviation engine, nacelle, polymer composite materials, carbon fiber, prepreg, lightning-protective coating, detonation spraying technology, current-conducting layer, sample, specific gravity.

Молниестойкость самолетов и авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является одной из важных проблем обеспечения требуемого уровня безопасности полетов и безаварийной эксплуатации современной авиационной техники [1–4].

Как было показано в первой части настоящей статьи, наиболее распространёнными технологиями молниезащиты ПКМ в мировой и отечественной авиационной промышленности являются наклейка металлической фольги и сеток, которые обеспечивают надежную работу углепластиков в любой молниепопасной зоне самолета согласно АП-25 [5].

Однако удельный вес молниезащит из металлической фольги и сеток (с учетом адгезионного и антиэрозионного слоев) может давать существенный привес до 0,7–0,9 кг на каждый квадратный метр поверхности из ПКМ. Применительно к мотогондole двигателя большой тяги суммарный привес может составить свыше 40 кг, что сопоставимо с весом крупной сборочной единицы и даже целой системы двигателя, например маслосистемы. Другим принципиальным недостатком металлических сеток является высокий процент открытой области (80–85 %), что приводит к ухудшению электромагнитной помехозащитности двигательной установки и её электронных цифровых агрегатов при воздействии электромагнитного импульса от удара молнии и/или высокоинтенсивного внешнего электромагнитного поля L/HIRF. Кроме того, по утверждению специалистов ВИАМ, НИЦ «Кур-

чатовский институт» – в случае поражения молнией восстановить сплошность и, как следствие, электропроводность молниезащитного покрытия из бронзовой сетки практически невозможно. Таким образом, серийные технологии молниезащиты ПКМ, разработанные фактически более 30 лет назад, т.е. ровно столько, сколько применяются композиты в авиации, морально устарели и содержат принципиальные технические недостатки.

По материалам перспективных научных исследований выявлено, что стратегическим направлением по улучшению молниезащитных свойств ПКМ является увеличение 3D-проводимости электрического и теплового потоков в углепластике, в том числе между его слоями (трансверсальность). Данному направлению посвящено огромное количество поисковых работ, что нашло отражение в изучении и создании электропроводящих полимерных связующих, модифицированных главным образом различными углеродными наночастицами (фуллерены, нанотрубки, астралены, графены, технический углерод, нанопластины графита и др.). Однако существующие российские нанотехнологии применимы только для зон перемещающихся зарядов (компоненты моделируемого разряда молнии $A + C \cdot (20 \text{ Кл})$) и не в полном объеме отвечают требованиям АП-25, обладают высокой стоимостью, повышенной сложностью ремонта в эксплуатации и т.д.

Возможным вариантом снижения веса МЗП мотогондол из ПКМ без каких-либо ограничений по молниепопасным зонам может

явиться детонационный способ нанесения покрытия. Данный способ имеет технический потенциал существенно снизить удельный вес металлизированного токопроводящего слоя относительно традиционной фольги и сеток. Кроме того, сплошной характер напыленного покрытия обеспечивает лучшую помехозащищенность авиационного двигателя к Lightning / High-intensity Radiated Field – молния / электромагнитное поле высокой интенсивности.

Цель статьи – представление результатов апробации детонационной технологии нанесения металлизированного токопроводящего слоя на образцы из препрега углепластика ВКУ-25, а также рассмотрение результатов опытной проверки молниестойкости образцов конструктивно-подобных элементов мотогондолы из препрега углепластика ВКУ-25 с нанесенным покрытием по детонационной технологии.

Результаты исследований

Принцип работы детонационной технологии напыления

В основе детонационного напыления лежит принцип нагрева напыляемого материала (порошка) и его высокоскоростного переноса на напыляемую деталь с помощью энергии, выделяющейся при детонационном (импульсном) сжигании газовой смеси горючего и окислителя в стволе аппарата, называемого детонационной пушкой. Схема, иллюстрирующая процесс детонационного напыления, представлена на рис. 1.

Рабочий цикл пушки складывается из следующих операций:

1. Открытый с одного конца ствол заполняется взрывчатой газовой смесью.
2. Дозатором в ствол вводится порция порошка, после чего ствол закрывается.
3. Электрическим разрядом у закрытого конца взрывчатая смесь поджигается, в результате возбуждается детонация.
4. Вылетая из ствола, продукты взрыва разгоняют частицы порошка до скорости около 500 м/с и разогревают их до плавления.
5. При столкновении с деталью частицы порошка прочно соединяются с ее поверхностью и образуют покрытие толщиной до 10 мкм.
6. Нарастивается покрытие серией выстрелов, во время которой деталь перемещается, например, с помощью манипулятора.

При металлизации пластмассовых композитов соединение первичного слоя частиц происходит за счет внедрения высокоскоростных частиц в пластиковый компаунд без существенной эрозии благодаря импульсному характеру технологии детонационного напыления.

При тепловой релаксации таких частиц прогрев подложки на 80–200 °С происходит на глубину не более нескольких десятков микрон, формируя лишь благоприятный для механического зацепления рельеф без деструкции обрабатываемого изделия. Нарастивание слоя покрытия происходит путем сканирования поверхности за несколько проходов (перемещений детали), во время которых соединение происходит за счет микросварки подплавленных или расплавленных частиц.

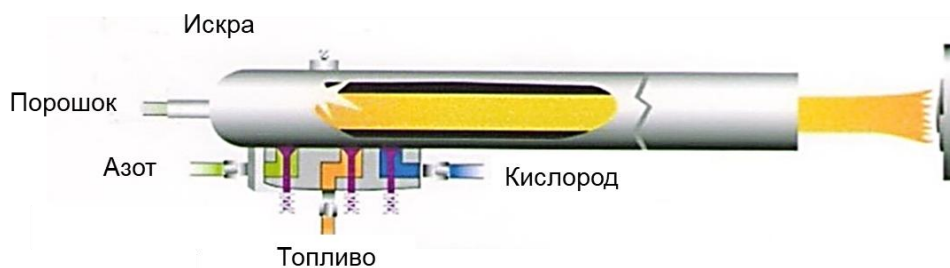


Рис. 1. Схема детонационного аппарата

При этом формируется практически монолитная металлическая «пленка» нужной толщины. Прочность соединения металлизационного слоя с поверхностью пластика при детонационном напылении достигает 3–5 МПа, что не уступает клеевому соединению при наклеивании сетки или фольги. Плотность детонационного покрытия близка к плотности монолитного материала (около 99 %), что может обеспечить «растекание» разряда молнии без существенного разрушения композитной основы при толщине металлической «пленки» около 20 микрон. Это позволяет существенно снизить массу и размеры токопроводящего молниезащитного слоя.

Технология детонационного напыления молниезащитного покрытия с компьютерным управлением

Детонационное напыление используется в отечественном авиационном двигателестроении уже более 30 лет во многом благодаря успеху фундаментально ориентированных и прикладных научных исследований Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Технологическое оборудование этого института успешно эксплуатируется в «ОДК-Пермские моторы», ПАО «УМПО» (ТРДДФ АЛ-31Ф для Су-27), ПАО «Кузнецов» (ТРДДФ НК-32 для Ту-160) и других предприятиях АО «ОДК-Пермские моторы».

Так, в частности, в АО «ОДК» с помощью установки «Обь» (второе поколение оборудования для детонационного напыления) успешно наносятся покрытия ВКНА, порошки ВК-20, ПХ20Н80, ПНЭ-1 для повышения жаростойкости и износостойкости деталей, а также для восстановления посадочных диаметров и рабочих поверхностей деталей при ремонте. Объектами применения являются детали и сборочные единицы (ТРДД) ПС-90А, используемого на средне- и дальнемагистральных самолетах Ту-204/Ту-214 и Ил-96-300; ТРДД ПС-90А-76 – для семейства транспортных самолетов Ил-76; ТРДД Д-30 – для ближне- и среднемагистральных самолетов Ту-134, наземные газотурбинные установки мощностью 2,5–25 МВт на базе авиационных

двигателей Д-30 и ПС-90А. Таким образом, созданная в СО РАН методология детонационного напыления надежно обеспечила миллионы часов наработки газотурбинной техники в авиации и наземной энергетике России.

Для нанесения исследуемой молниезащиты было применено новое инновационное оборудование СО РАН, важными достоинствами которого являются многоканальная система газопитания, цифровая система автоматического управления с быстродействующими электромагнитами, роботизация и современный дизайн. Технология реализована на компьютеризированном детонационном комплексе CCDS2000 (CCDS – Computer-controlled detonation spraying), основой которого является компактная детонационная пушка весом около 18 кг (рис. 2).



Рис. 2. Детонационная пушка CCDS2000 с двумя порошковыми дозаторами

В промышленном варианте пушка интегрирована в систему трехкоординатного сканирования с приводами на шаговых двигателях (рис. 3, а) или встраивается в роботизированную линию (рис. 3, б).

Весь комплекс управляется контроллером типа Advantech IC610H на базе промышленного компьютера по заданной программе (циклограмме на рис. 4). В циклограмме задаются параметры для подачи и смешивания газов, время открытия быстродействующих клапанов, время инъекции порций порошка в ствол и т.д. При этом ключевыми управляющими параметрами процесса напыления являются температура и скорость выметаемого газового потока в момент соприкосновения с подложкой.

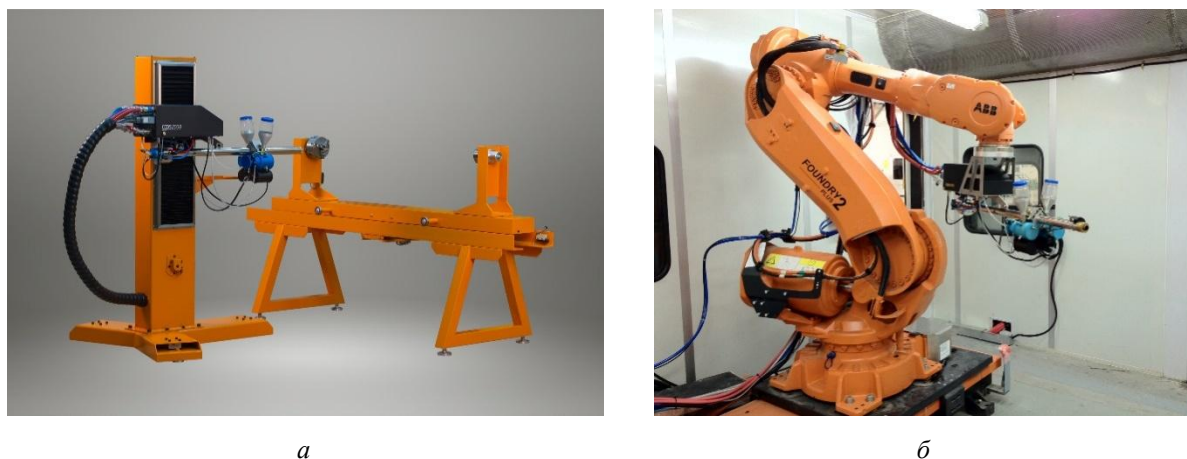


Рис. 3. CCDS2000 в комплексе: а – с трехкоординатным манипулятором; б – промышленным роботом

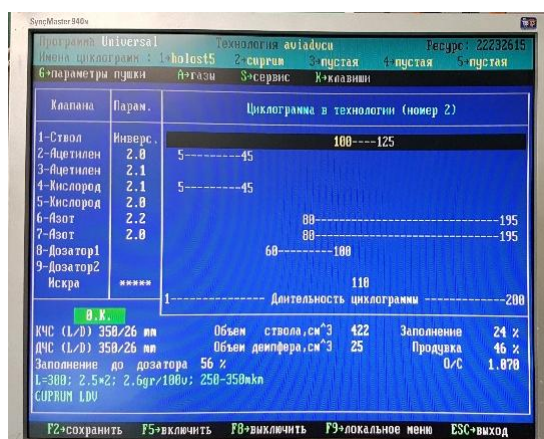


Рис. 4. CCDS2000: циклограмма для нанесения покрытия из меди

Вышеуказанные технологические решения подробно изложены в [6–12].

Перед нанесением молниезащитного покрытия (МЗП) на образцы конструктивно-подобных элементов композитной мотогондолы была выполнена предварительная отладка технологического процесса детонационного напыления на малоразмерных образцах. Затем в условиях АО «ОДК-Авиадвигатель» было произведено металлографическое исследование покрытий.

МЗП напыляли на шесть образцов из углепластика и один образец из стеклопластика. На одну сторону каждого образца нанесено металлическое покрытие из порошка алюминия АСД-1. На двух из шести образцах из углепластика поверхность покрытия после детонационного напыления подвергнута уплотняющей стеклоструйной обработке.

Результаты металлографических исследований показали, что на всех образцах покрытие сплошное, места с непокрытой поверхностью образцов отсутствуют. Толщина и пористость покрытий варьируется в зависимости от режима напыления и/или последующей уплотняющей обработки.

Микротвердость покрытия измерена с помощью твердомера Виккерса DuraScan-20 при нагрузке 0,025 кг ($HV_{0,025}$). Значения микротвердости покрытия без уплотняющей обработки и покрытия с уплотняющей обработкой не отличаются, составляют 49–65 $HV_{0,025}$.

На рис. 5 и 6 представлены соответственно внешний вид наружной поверхности покрытия марки АСД-1, нанесенного методом детонационного напыления без уплотняющей обработки и с последующей стеклоструйной обработкой.

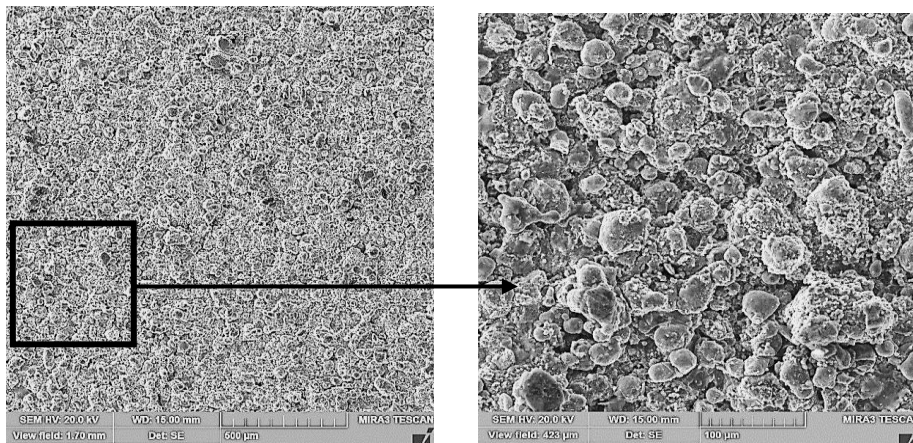


Рис. 5. Внешний вид наружной поверхности покрытия марки АСД-1, нанесенного методом детонационного напыления без уплотняющей обработки

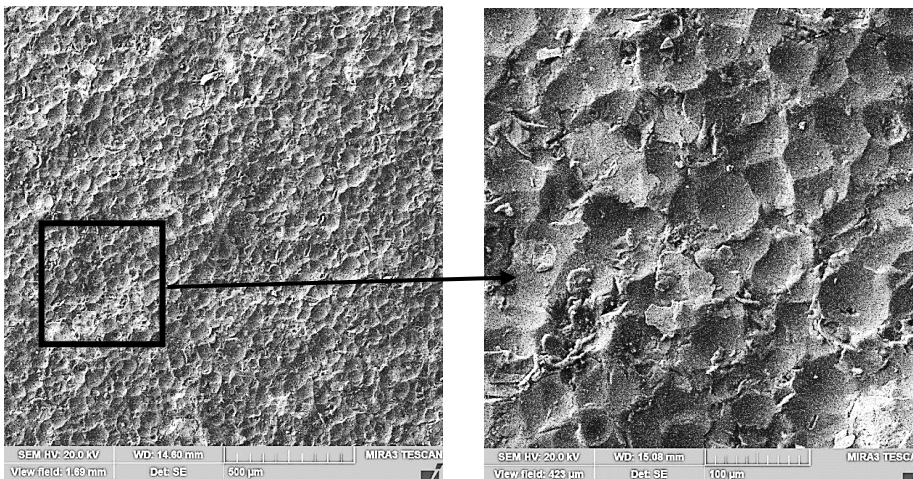


Рис. 6. Внешний вид наружной поверхности покрытия марки АСД-1, нанесенного методом детонационного напыления, и последующей стеклоструйной обработки

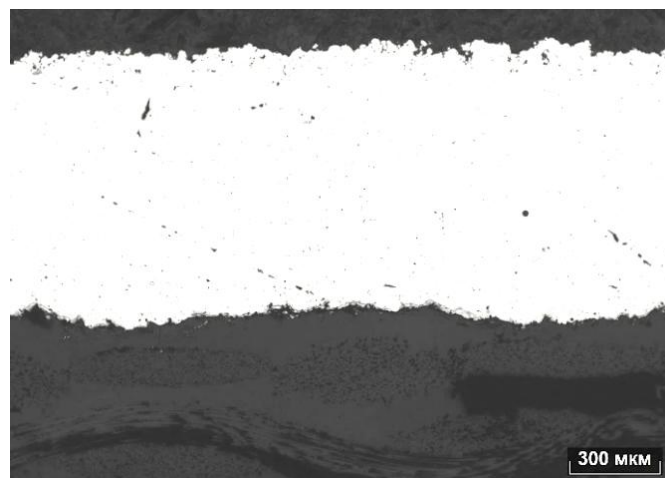


Рис. 7. Вид покрытия марки АСД-1 на поперечном микрошлифе с оптического микроскопа AXIO Observer.D1m фирмы Carl Zeiss. Толщина покрытия от 604 до 923 мкм



Рис. 8. Химический состав покрытия марки АСД-1

Содержание химических элементов в покрытии АСД-1

Показатель	Содержание химических элементов, %		
	О	Al	Сумма
Название спектра			
Покрытие АСД-1	1,98	98,02	100,00

На рис. 8 представлен химический состав покрытия марки АСД-1, который определяли микрорентгеноспектральным анализом с помощью энергодисперсионного спектрометра OXFORD X-Max50 на электронном микроскопе MIRA3 LMN компании Tescan. Из представленных в таблице данных видно, что порошок без примесей.

Во всех случаях деструкции материала образцов под покрытием не обнаружено. Покрытие имеет в целом удовлетворительное качество сцепления с основой.

Объект исследования

Объектом настоящего исследования являлись образцы конструктивно-подобных элементов узлов современной мотогондолы из ПКМ. Образцы с размерами 800 × 800 мм вы-

полнены из препрега углепластика ВКУ-25 ТУ 1-595-25-1133-2011 методом автоматизированной выкладки. На поверхность образцов последовательно наносили многослойное покрытие, состоящее из молниезащитного покрытия, антиэрозионного покрытия типа ВШ-23 и лакокрасочного покрытия (ЛКП) Aerodur Finish. Внешний вид образцов представлен на рис. 9.

В качестве материала токопроводящего слоя МЗП применяли порошок меди ПМС-1, порошок бронзы Бр.АЖНМц8,5-4-5-1,5 и порошок алюминия марки АСД-1. Толщина металлизированного слоя для каждого материала – 10 и 20 мкм. Всего для испытаний было подготовлено девять образцов, из них три без нанесения МЗП.

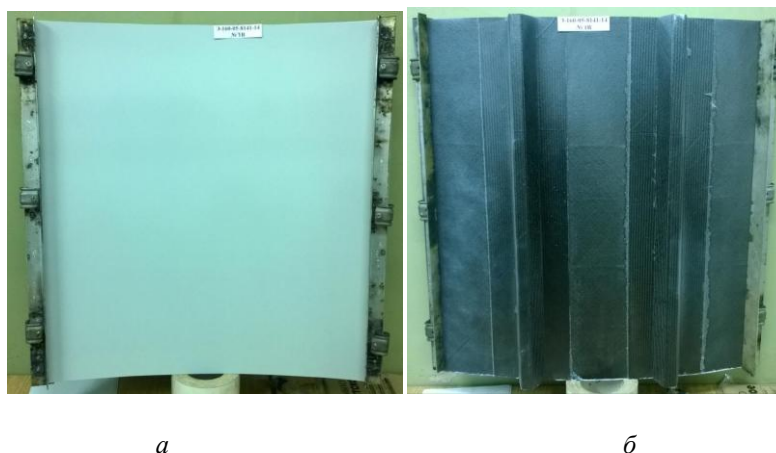


Рис. 9. Внешний вид представленных на испытания образцов:
а – внешняя сторона; *б* – внутренняя сторона

Молниезащитное покрытие напыляли с помощью детонационного комплекса CCDS2000 в условиях СО РАН. В зависимости от толщины нанесенного покрытия удельный вес токопроводящего слоя из бронзы и меди составлял от 0,087 до 0,178 кг/м², а удельный вес покрытия из алюминия 0,027–0,054 кг/м². Отметим, что полученные удельные веса до трех раз меньше удельного веса токопроводящего слоя традиционного МЗП, применяемого в мотогондолах из ПКМ серийных авиационных двигателей.

Методика испытаний на молниестойкость

Испытания на стойкость к прямому воздействию тока молнии проводились для оценки последствий (горение, эрозия, разрушение и деформации конструкции), вызванных каналом молнии – тепловым воздействием, ударной волной и магнитными силами. На данном этапе исследований в качестве критерия стойкости было принято считать отсутствие сквозных разрушений в образце после воздействия.

Образцы испытывались импульсом тока молнии, включающим компоненты применительно к молниепопасной зоне 1А, 2А, 1В. Компоненты испытательного тока соответствуют требованиям авиационных норм АП-25

(п.п. 25.581–П25.581, 25.954), комбинация компонентов в зависимости от зоны в соответствии с КТ-160G (рис. 10).

Компонент А – ток первого обратного разряда молнии на высоте не более 1500 м. Амплитуда импульса тока 200 кА ± 10 %, длительность не более 500 мкс, интеграл действия $2 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с} \pm 20 \%$, компонент А по форме может быть униполярным или колебательным, время нарастания от 10 до 90 % пикового значения тока не должно превышать 50 мкс.

Компонент А_н – первый обратный разряд молнии на высоте более 1500 м. Амплитуда импульса тока 150 кА ± 10, длительность не более 500 мкс, интеграл действия $0,8 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с} \pm 20 \%$.

Компонент В – промежуточная составляющая разряда молнии. Среднее значение тока 2 кА ± 20 %, длительность 5 мс ± 10 %, переносимый заряд $Q = 10 \text{ Кл} \pm 10 \%$, форма импульса должна быть униполярной, импульс может быть прямоугольным либо спадать по экспоненциальному или линейному закону.

Компонент С – постоянная составляющая разряда молнии. Величина тока от 200 до 800 А, длительность от 0,25 до 1,0 с, переносимый заряд 200 Кл ± 20 %.

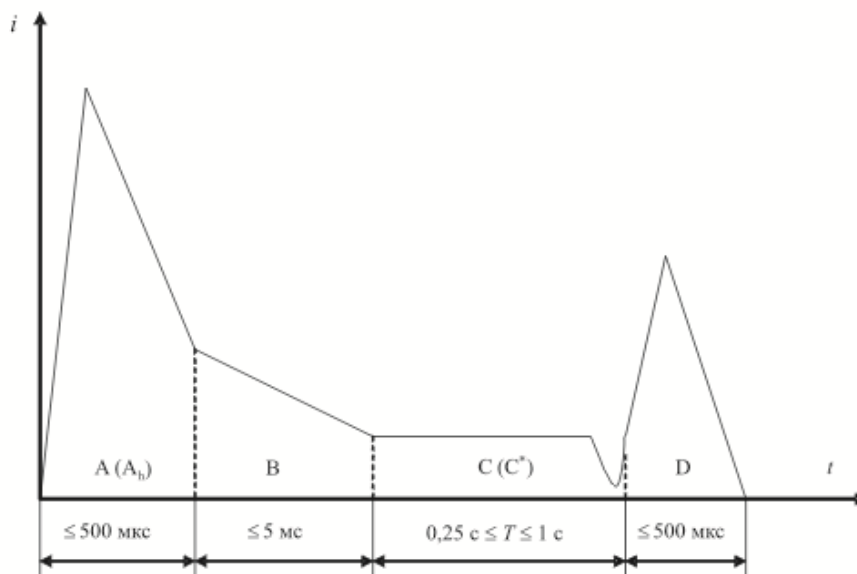


Рис. 10. Форма нормированного импульса тока молнии

Компонент C^* (часть компонента C) – переносимый заряд $18 \text{ Кл} \pm 20\%$ за время $45 \text{ мс} \pm 20\%$ (время удержания канала молнии на поверхности самолета в одной точке) при среднем значении амплитуды тока от не менее 400 А , данный компонент должен быть униполярным, по форме может быть либо прямоугольным, либо спадать по экспоненциальному или линейному закону.

Компонент D – повторный обратный разряд молнии. Амплитуда импульса тока $100 \text{ кА} \pm 10\%$, длительность не более 500 мкс , интеграл действия $0,25 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \pm 20\%$.

Испытания проводили в условиях испытательной лаборатории высоковольтного оборудования Московского энергетического института (ИЛВО «МЭИ») с использованием четырехкомпонентного генератора тока молнии ГТМ-4, обеспечивающего задание нормирующего импульса тока молнии согласно АП-25. В данной работе активное участие также принимали сотрудники АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов», АО «ОДК-Авиадвигатель».

Результаты испытаний на молниестойкость

Результатами испытаний продемонстрировано, что при воздействии моделируемого разряда молнии, соответствующего молниопасной зоне 1В (компоненты А, В, С и D), на образцы с напыленным молниезащитным покрытием в основном образуются области повреждения, характеризующиеся наличием следов токового воздействия. При этом видимых значительных следов разрушения несущих слоев углепластика, горения, распушений, отслоений, сквозных разрушений нет.

Наиболее стойкими к воздействию тока молнии зоны 1В оказались образцы с напылением меди 20 мкм , напылением бронзы 10 мкм , напылением алюминия 10 мкм , выдержавшие испытания без выгорания внешнего слоя и с отсутствием видимых повреждений в несущих слоях углепластика. Выявлено, что увеличение толщины напыленного покрытия меди с 10 до 20 мкм на образце привело к «растеканию» заряда молнии по внешней

поверхности образца и отсутствию видимых повреждений несущих слоев углепластика.

Образцы без покрытия оказались нестойкими к воздействию тока молнии зон 1А, 1В, 2А.

Основные результаты проверок МЗП проиллюстрированы на рис. 11.

Таким образом, первичные результаты исследований работоспособности МЗП в целом носят удовлетворительный характер. Отсутствие сквозных разрушений зафиксировано у всех образцов с детонационным напылением. Минимальное токовое воздействие зафиксировано на образцах с медным и алюминиевым МЗП.

На втором (завершающем) этапе было проведено исследование внутренней структуры испытанных образцов методами неразрушающего контроля. Исследования проводились в Научно-образовательном центре авиационных композитных технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Исследования проводились тепловым методом с использованием программно-аппаратного комплекса теплового неразрушающего контроля (разработка НОЦ АКТ ПНИПУ), рентгенографическим методом с использованием портативной установки микрофокусной рентгенографии (совместная разработка НОЦ АКТ ПНИПУ с СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), высокочастотным ультразвуковым эхоимпульсным и теневым методами с использованием высокочастотного ультразвукового дефектоскопа УСД-60.

Каких-либо несплошностей в виде расслоений и разрушений в структуре ПКМ образцов с напылением меди 20 мкм , напылением бронзы 10 мкм , напылением алюминия 10 мкм не было обнаружено. Таким образом, по результатам исследований установили, что эти образцы могут быть использованы в любой молниопасной зоне.

С учетом весовых характеристик предпочтительной и наиболее эффективной является молниезащита из алюминия.

Однако исследования функциональных и прочностных свойств различных типов напыленного МЗП, а также параметров и режимов самой детонационной технологии следует продолжить.

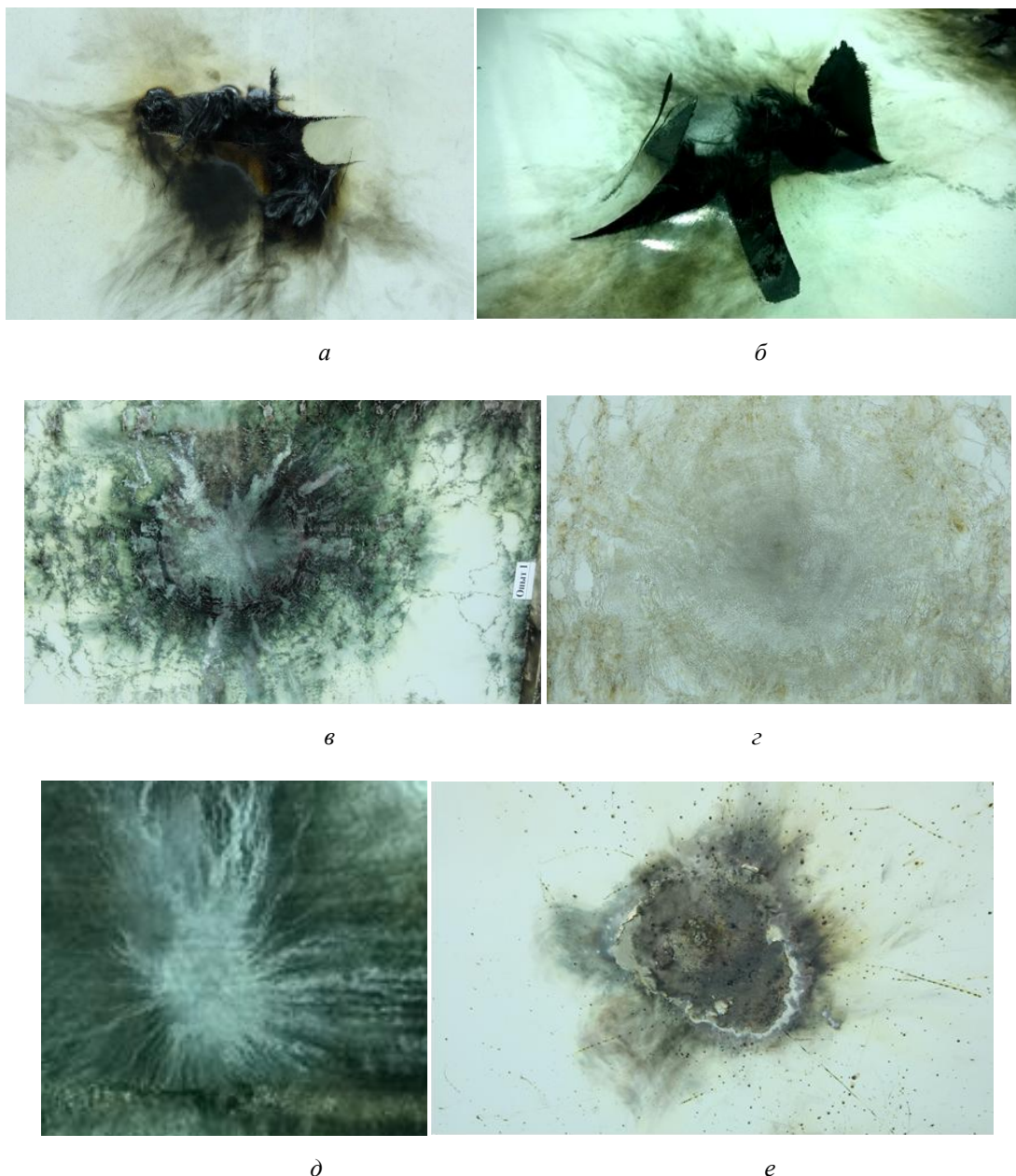


Рис. 11. Результаты испытаний образцов на воздействие токов молнии:
а – без МЗП, б – МЗП с медным слоем 10 мкм, в – МЗП с медным слоем 20 мкм,
г – МЗП с слоем алюминия 10 мкм, д – МЗП с слоем бронзы 10 мкм,
е – МЗП с слоем бронзы 20 мкм

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно:

1. Выполнение оценки остаточной прочности испытанных образцов по всем типам повреждений.
2. Принимая во внимание, что эксплуатационным риском применения напыленного МЗП может явиться растрескивание металлической поверхности из-за разницы в коэффициентах теплового расширения между метал-

лом и углепластиком, а также из-за изгиба композитной обшивки под действием полетных нагрузок, необходимо провести исследование характеристик прочности и долговечности металлизированного слоя к воздействию внешних факторов, относящихся к условиям эксплуатации авиационной техники. На необходимость такого междисциплинарного исследования указывают специалисты компании Boeing [13].

3. Выполнение оценки стабильности производственного процесса при работе детонационного оборудования CCDS2000, в том числе изучение влияния режимов процесса напыления на структуру и разброс параметров металлизированного токопроводящего слоя МЗП.

4. Определение малозатратных технологий восстановительного ремонта МЗП ПКМ в условиях эксплуатации.

Выводы

Апробирована детонационная технология нанесения молниезащитного покрытия на образцы конструктивно-подобных элементов узлов мотогондолы из препрега углепластика ВКУ-25 с использованием детонационного компьютеризированного комплекса CCDS2000 разработки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

В качестве материала покрытия применяли медь, бронзу и алюминий. Достигнутый удельный вес металлизированного токопроводящего слоя из алюминия не превышал $0,027\text{--}0,054\text{ кг/м}^2$, что в 3–1,5 раза соответственно меньше удельного веса металлизированного токопроводящего слоя традиционного МЗП, применяемого в мотогондолах из ПКМ серийных авиационных двигателей.

По результатам испытаний на молниестойкость образцов из препрега углепластика ВКУ-25 продемонстрирована функциональная работоспособность детонационной технологии для любой молниепопасной зоны мотогондолы согласно АП-25. У образцов с напылением сквозных разрушений углепластика не обна-

ружено. Минимальное токовое воздействие зафиксировано на образцах с медным и алюминиевым покрытием. Образцы углепластика без МЗП оказались нестойкими к воздействию тока молнии.

Сформированы направления дальнейших исследований.

По результатам исследований продемонстрирована функциональная работоспособность молниезащитной детонационной технологии в составе образцов из препрега углепластика ВКУ-25 для любой молниепопасной зоны мотогондолы согласно АП-25.

Апробированная технология имеет технический потенциал снизить (до трех раз) удельный вес металлизированного токопроводящего слоя в мотогондолах из ПКМ серийных авиационных двигателей при сохранении эффективной молниезащиты.

Принятые обозначения и сокращения

АП – авиационные правила;

КТ – квалификационные требования;

ТРДД – турбореактивный двухконтурный двигатель;

ПКМ – полимерные композиционные материалы;

МЗП – молниезащитное покрытие;

ЛКП – лакокрасочное покрытие;

L/HIRF – Lightning / High-intensity Radiated Field – молния / электромагнитное поле высокой интенсивности;

CCDS – Computer-controlled detonation spraying – детонационное распыление с компьютерным управлением.

Библиографический список

1. Гуняев Г.М., Кавун Т.Н., Начинкина Г.В. Молниезащитные покрытия углепластиковых конструкций, выходящих на внешний контур планера летательных аппаратов // Авиационные материалы и технологии. – 2004. – № 2. – С. 3–9.
2. Karch C., Metzner C. Lightning protection of carbon fibre reinforced plastics. – An overview // Materials Science. 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). – 2016. 1st September.
3. Gagné M., Therriault D. Lightning strike protection of composites // Progress in Aerospace Sciences. – 2014. – Vol. 64. – P. 1–16 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042113000651?via%3Dihub>. (дата обращения: 02.04.2022).
4. Молниестойкость современных полимерных композитов / Г.М. Гуняев, Л.В. Чурсова, А.Е. Раскутин, А.Г. Гуняева // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2. – С. 36–43.
5. Саженок Н.А., Саженок А.Н. Молниезащитные покрытия мотогондол авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов. Часть 1. Анализ существующих типов молниезащит //

Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 67. – С. 43–55.

6. Nikolaev Yu.A., Vasil'ev A.A., Ul'yaniitskii V.Yu. Gas Detonation and its Application in Engineering and Technologies (Review) // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2003. – Vol. 39, no. 4. – P. 382–410.

7. Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Злобин С.Б. Применение детонационного напыления для формирования градиентных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 11. – С. 30–35.

8. Ульяницкий В.Ю. CCDS2000 – оборудование нового поколения для детонационного напыления // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 10. – С. 36–41.

9. Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications / V. Ulianitsky, A. Shtertser, S. Zlobin, I. Smurov // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20, iss. 4. – P. 791–801.

10. Possibilities of the Computer-Controlled Detonation Spraying method: a chemistry viewpoint / D.V. Dudina, I.S. Batraev, V.Yu. Ulianitsky, M.A. Korchagin // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40, № 2. – P. 3253–3260.

11. Development of Catalytic Converters Using Detonation Spraying / V. Ulianitsky, A. Shtertser, V. Sadykov, I. Smurov // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 31, iss. 11. – P. 1433–1438.

12. Enhancing the properties of WC/Co detonation coatings using two-component fuels / V. Ulianitsky, I. Batraev, D. Dudina, I. Smurov // *Surface & Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 318. – P. 244–249.

13. Boeing Simulates Thermal Expansion in Composites with Expanded Metal Foil for Lightning Protection of Aircraft Structures [Электронный ресурс]. – URL: <https://expdoc.com/doc/4361738/boeing-simulates-thermal-expansion-in-composites-with> (дата обращения: 02.04.2022).

References

1. Gunyaev G.M., Kavun T.N., Nachinkina G.V. Lightning-protective coatings of carbon fiber structures outcoming the outer envelope of the airframe. *Aviation materials and technologies*, 2004, no. 2, pp. 3-9.

2. C. Karch, C. Metzner. Lightning protection of carbon fibre reinforced plastics – An overview. Published 1 September 2016. *Materials Science*. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP).

3. Gagné M., Therriault D. Lightning strike protection of composites. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, vol. 64, January, pp. 1-16, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042113000651?via%3DIihub> (accessed: 02.04.2022).

4. Gunyaev G.M., Chursova L.V., Raskutin A.E., Gunyaeva A.G. Lightning resistance of modern polymer composites. *Aviation materials and technologies*, 2012, no. 2, pp. 36-43.

5. Sazhenkov N.A., Sazhenkov A.N. Lightning-protective coatings for aircraft engine nacelles made of polymer composite materials. Part 1. Analysis of existing types of lightning protection. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace technology*, no. 67, 2021, pp. 43-55.

6. Nikolaev Yu.A., Vasil'ev A.A., Ul'yaniitskii Yu V. Gas Detonation and its Application in Engineering and Technologies (Review). *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2003, Vol. 39, no. 4, pp. 382-410.

7. Shtertser A.A., Ulianitsky V.Y., Zlobin S.B. Use of detonation spraying for gradient coatings formation. *Hardening technologies and coatings*, 2010, no. 11, pp. 30-35.

8. Ulianitsky V.Y. CCDS2000 – new generation equipment for detonation spraying. *Hardening technologies and coatings*, 2013, no. 10, pp. 36-41.

9. Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S., Smurov I. Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, iss. 4, pp. 791-801.

10. Dudina D.V., Batraev I.S., Ulianitsky V.Yu., Korchagin M.A. Possibilities of the Computer-Controlled Detonation Spraying method: a chemistry viewpoint. *Ceramics International*, 2014, vol. 40, no. 2, pp. 3253-3260.

11. Ulianitsky V., Shtertser A., Sadykov V., Smurov I. Development of Catalytic Converters Using Detonation Spraying. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31, iss. 11, pp. 1433-1438.

12. Ulianitsky V., Batraev I., Dudina D., Smurov I. Enhancing the properties of WC/Co detonation coatings using two-component fuels. *Surface & Coatings Technology*. 2017. Vol. 318, pp. 244-249.

13. Boeing Simulates Thermal Expansion in Composites with Expanded Metal Foil for Lightning Protection of Aircraft Structures, available at: <https://expdoc.com/doc/4361738/boeing-simulates-thermal-expansion-in-composites-with> (accessed: 02.04.2022).

Об авторах

Саженов Алексей Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, помощник управляющего директора – генерального конструктора ОДК-Авиадвигатель (г. Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93), e-mail: office@avid.ru.

Ваганов Владислав Витальевич (Пермь, Россия) – начальник бригады экспериментальных работ по выходным устройствам и мотогондолом авиационных и наземных ГТД отделения 205 ОДК-Авиадвигатель (г. Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93), e-mail: vaganov@avid.ru.

Осокин Владимир Михайлович (Пермь, Россия) – заместитель директора по качеству Научно-образовательного центра «Авиационные композитные технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 15), e-mail: osokin-kt@pstu.ru.

Саженов Николай Алексеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 13, корпус Г), e-mail: sazhenkov_na@mail.ru.

Ульяницкий Владимир Юрьевич (Новосибирск, Россия) – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории синтеза композиционных материалов, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН (630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15), e-mail: ulianv@mail.ru.

About the authors

Aleksei N. Sazhenkov (Perm, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Assistant to Managing Director-General Designer of UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolskiy Av., 614990, Perm), e-mail: office@avid.ru.

Vladislav V. Vaganov (Perm, Russian Federation) – Head of Crew for Experimental Operations on Exhausts and Nacelles of Aviation and Industrial Engines, Division 205 at UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolskiy Av., 614990, Perm), e-mail: office@avid.ru.

Vladimir M. Osokin (Perm, Russian Federation) – Deputy Director for Quality, Scientific and Educational Center for Aviation Composite Technologies, Perm National Research Polytechnic University (15, Koroleva str., 614013, Perm), e-mail: osokin-kt@pstu.ru.

Nikolai A. Sazhenkov (Perm, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University (Bld G, 13, Professor Pozdeev str., 614013, Perm), e-mail: sazhenkov_na@mail.ru.

Vladimir Yu. Ulyanitskiy (Novosibirsk, Russian Federation) – Professor, Chief researcher of Laboratory of Synthesis of Composite Materials, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS (15, Koroleva str., 614013, Perm), e-mail: ulianv@mail.ru.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта FEUG-2020-0013.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 15.06.2022

Одобрена: 17.06.2022

Принята к публикации: 04.08.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Молниезащитные покрытия мотогондол авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов. Часть 2. Перспективная детонационная технология нанесения молниезащитного покрытия / А.Н. Саженов, В.В. Ваганов, В.М. Осокин, Н.А. Саженов, В.Ю. Ульяницкий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 79–91. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.09

Please cite this article in English as: Sazhenkov A.N., Vaganov V.V., Osokin V.M., Sazhenkov N.A., Ulyanitskiy V.Y. Lightning-Protective Coatings for Aircraft Engine Nacelles Made of Polymer Composite Materials. Part 2. Advanced Detonation Technology for Applying a Lightning-Protective Coating. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 69, pp. 79-91. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.09