DOI: 10.15593/2224-9982/2021.67.05

УДК 629.7

Н.А. Саженов¹, А.Н. Саженов²

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия

МОЛНИЕЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ МОТОГОНДОЛ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧАСТЬ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТИПОВ МОЛНИЕЗАЩИТ

Представлен обзор существующих и перспективных типов молниезащит мотогондол авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов. Показано, что наиболее распространенной технологией молниезащиты ПКМ в мировой и отечественной авиационной промышленности в настоящее время является наклейка металлических фольг и сеток. Однако имеющийся удельный вес молниезащиты из металлических фольг и сеток (с учетом адгезионного и эрозионного слоев) может давать существенный привес до 0,7–0,9 кг на каждый 1 м² поверхности мотогондолы из ПКМ. Дополнительно, принципиальным недостатком металлических сеток является высокий процент открытой области (80–90 %), что приводит к понижению электромагнитной помехозащищенности двигателя при воздействии электромагнитного импульса от удара молнии или высокоинтенсивного внешнего электромагнитного поля L/HIRF.

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. Возможным решением проблемы молниезащиты, которому посвящено большое количество научных работ, является применение покрытий из термостойких ПКМ и полимерных связующих, модифицированных углеродными наночастицами для создания лучшей проводимости материалов. Однако данная технология обладает недостатками: высокой стоимостью, низкой технологичностью ремонта и т.д. Проводятся исследования различных способов напыления.

Выявлено, что для молниезащит перспективных типов мотогондол высококонкурентным является конструкторское решение, обеспечивающее кардинально малый удельный вес и высокую надежность, технологичность, высокую электромагнитную помехозащищенность L/HIRF, низкую стоимость затрат в жизненном цикле двигателя, включая простоту ремонта в эксплуатации.

Ключевые слова: авиационный двигатель, газотурбинный двигатель, мотогондола, полимерные композиционные материалы, молниезащита, просечно-вытяжная сетка, фольга, удельный вес, электропроводность, теплопроводность, рассеяние тока молнии, L/HIRF.

N.A. Sazhenkov¹, A.N. Sazhenkov²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²JSC "UEC-Aviadvigatel", Perm, Russian Federation

LIGHTNING PROTECTION COATINGS OF AIRCRAFT ENGINES POLYMER COMPOSITE NACELLES. PART 1. ANALYSIS OF THE EXISTING TYPES OF LIGHTNING PROTECTION

The overview of the existing and upcoming types of aircraft engines polymeric composite nacelles lightning protection is presented. It is demonstrated that at present the most widely-used technologies of polymer composites lightning protection in the world and domestic aviation industry consist in using metal foils and meshes. However, the relative weight of the lightning protection comprised of metal foils and meshes (including adhesive and erosion layers) may result in a significant weight gain up to 0.7–0.9 kg per each square meter of the polymer composite nacelle surface. Additionally, the principal disadvantage of metal meshes is high percentage of the open area (80–90 %) leading to decreased engine EMI protection in the event of exposure to electromagnetic impulse from the lightning strike or L/HIRF.

Currently, intensive scientific studies are performed in the field of aviation equipment lightning protection in different universities, institutes and companies, mainly in the USA, Europe, Russia and Japan. The potential lightning protection problem solution addressed by the large number of scientific papers is use of coatings made of heatproof polymer composites and polymer binders modified by carbon nanoparticles to develop a better material conductivity. However, this technology is characterized by high costs, low reparability, etc. Various spraying methods are studied.

It has been found out that for the lightning protection of the advanced types of nacelles the highly competitive engineering solution is the one that ensures a cardinaly low relative weight and high reliability, manufacturability, high EMI protection L/HIRF, low engine life cycle costs including easy in-service repair.

Keywords: aircraft engine, gas turbine engine, nacelle, polymer composites, lightning protection, expanded mesh, foil, total relative weight, electric conductivity, thermal conductivity, lightning current dissipation, L/HIRF.

Введение

Общемировая статистика свидетельствует, что пассажирский самолет может поражаться молнией в среднем каждые 1000–3000 летных часов, что эквивалентно ~ 1 удару в год. Попадание молнии в корпус воздушного судна может вызвать отказ бортовой авионики, отклонения в работе двигателей и даже сквозной пробой корпуса судна, поэтому, согласно авиационным правилам (АП), все транспортные самолеты должны быть защищены от аварийных и катастрофических воздействий молнии.

У первых поколений авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) типа Д-30, НК-8, JT3 основным материалом для изготовления корпуса мотогондолы служили алюминиевые сплавы, которые являются прекрасными проводниками электрического тока и тепла. Молниезащита таких двигателей обеспечивалась главным образом толщиной обшивки мотогондолы. При попадании молнии в цельнометаллическую мотогондолу ее повреждения носят, как правило, некритичный характер и имеют вид кратеров, образующихся в результате термического воздействия. Очевидно, что подобная конструкция молниезащиты функ-

ционально эффективна, но имеет высокие весовые характеристики.

Для современных типов самолетов характерно широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые позволяют существенно снизить вес авиатехники, повысить дальность полета и полезную нагрузку. Так, в самолетах и двигателях пятого поколения доля ПКМ составляет более 30–50 % всей массы изделия и 80–95 % всей площади внешней обшивки самолета. Примерами таких самолетов являются Airbus A350, A380; Boeing-737 MAX и Boeing-787 (рис. 1).

Однако существенно низкая электро- и теплопроводность деталей из ПКМ приводит к их низкой сопротивляемости повреждению молнией. Например, углепластики – это проводники с высоким сопротивлением, поэтому конструкции из них обладают определенной молниестойкостью, но при поражении электрическим зарядом они получают повреждения в виде расслоения материала или сквозного пробоа. Стекло- и органопластики являются диэлектриками, поэтому конструкции из них требуют не только организации молниезащиты, но и защиты от накопления статического электричества.

Рис. 1. Применение композитов на самолете Boeing-787

Мировой опыт проектирования авиационной техники показывает, что наиболее широкое применение для молниезащиты конструкций из ПКМ получили медные сетки / фольги для углепластиков или алюминиевые сетки / фольги для стекло- и органопластиков. Однако общая удельная масса отечественного молниезащитного покрытия из медной сетки может достигать от 0,375 до 0,675 кг/м², что при площади композитной мотогондолы $S \approx 25 \text{ м}^2$ дает значительное увеличение веса двигателя – до 17 кг. При площади поверхности воздушного судна из композитов $S \approx 1000 \text{ м}^2$ (в размерности самолета типа МС-21-310) общий вес молниезащитного покрытия самолета может достигать значений порядка 675 кг и более. Отсюда следует, что создание молниезащитного покрытия с существенно меньшими параметрами по массе является актуальной задачей для новых типов авиационной техники.

Целью настоящей статьи является обзор и критический анализ существующих и перспективных типов молниезащит мотогондол авиационных ГТД из ПКМ, как актуальность создания новой технологии молниезащиты.

Анализ технологий молниезащиты авиационной техники

В настоящее время в иностранной и отечественной практике реализованы следующие методы и средства молниезащиты авиационных изделий из ПКМ:

1. Нанесение алюминиевой фольги в качестве внешнего защитного слоя.

Защитные фольги обычно имеют толщину в диапазоне 50–200 мкм и делятся на два вида: развальцованные и массивные. Металлическую массивную фольгу можно приклеить к защищаемым поверхностям, чтобы обеспечить проводящий слой, однако при попадании молниевых зарядов на такую поверхность значительное количество фольги будет расплавлено. Вальцованная фольга изготавливается методом вальцевания, в процессе которого массивная фольга перфорируется и растягивается. Внешне поверхность развальцованной фольги выглядит как тканая проволоочная сетка, но она изготовлена из одного листа металла и, следовательно, имеет

лучшую электропроводность. Удельный вес фольговой защиты – от 0,445 до 0,904 кг/м² (с учетом адгезионного слоя).

К преимуществам применения металлической фольги относятся:

- эффективная защита для всех зон, подвергаемых ударам молнии.
 - отличная проводимость, особенно в области перекрытия фольги при совместном отверждении;
 - простота применения (включая адгезию и совместное отверждение) и хорошее прилегание;
 - возможность покрытия сложных профилей (для вальцованных фольг).
- К недостаткам можно отнести:
- высокую поверхностную плотность;
 - низкую технологичность при укладке на поверхности второго порядка, а также на любые поверхности сложного профиля;
 - невозможность удаления «летучих» при горячей приклейке фольги;
 - невозможность применения алюминиевых фольг в прямом контакте с углепластиком;
 - высокую стоимость и сложность ремонта.

Поставщиками этой технологии молниезащиты являются Integument Technologies, США; Lightning Diversion Systems, Калифорния, США; Dexmet Corporation, Коннектикут, США; Alcore, Мериленд, США.

Развальцованная фольга применяется в последних проектах компании Boeing, а алюминиевая фольга используется для молниезащиты панелей мотогондолы турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) Leap-1B Boeing 737 MAX.

2. Приклеивание алюминиевой или медной вязаной сетки в качестве внешнего или внутреннего защитного слоя.

Металлические тканые материалы, сплетенные из алюминиевой или медной проволоки, могут обеспечить эффективную защиту для непроводящих поверхностей. Наиболее часто применяемые металлические ткани сплетены из алюминиевой проволоки с количеством проволок на сантиметр от 25 до 80. Диаметр проволок колеблется от

50–254 мкм. Медные тканые сетки разделяются на вязаные и вязанопаяные, последние имеют меньшее переходное сопротивление.

При воздействии молнии ее дуга делится на множество проводящих филаментов низкой интенсивности, что приводит к рассеиванию энергии и уменьшению повреждения детали из ПКМ. На рис. 2 представлен внешний вид медной сетки трикотажной структуры типа ластик из микропроволоки [1].

Рис. 2. Медная сетка трикотажной структуры

К преимуществам проволочной ткани относят:

- возможность совместного отверждения с многослойным композитом;
- более высокую прочность соединения с поверхностью композита, чем при приклейке фольг, за счет затекания связующего или клея в ячейки сетки;
- хорошую драпируемость (способность принимать любые формы), в особенности у вязаных сеток;
- эффективную защиту для всех зон, подвергаемых ударам молнии.

К недостаткам проволочной ткани можно отнести:

- риск возникновения коррозионных процессов на границе раздела углепластик–металл, в особенности это касается алюминия;

- сложность ремонта молниезащитного покрытия после попадания молнии;

- высокую удельную поверхностную плотность и толщину сеток, обеспечивающих эффективную защиту от молнии.

Известны и альтернативные технологии изготовления молниезащитных микросеток из высокопроводящих металлов (меди, алюминия, бронзы и т.д.) [2]. Так, по утверждению компании Dexmet (США), микросетки прорезно-вытяжного типа превосходят по своим качествам тканые, так как изготовлены из цельного листа и не имеют переходного сопротивления. Это позволяет надежно защитить углепластиковые элементы конструкции самолета от ударов молнии с силой тока 200 кА.

На рис. 3 представлен внешний вид медной прорезно-вытяжной сетки (ПВС) отечественного производства. Разработчик сетки – компания «Микросетчатые технологии», Россия.

Рис. 3. Внешний вид прорезно-вытяжной сетки

Ниже в таблице дано сравнение характеристик наиболее популярной марки зарубежной сетки Dexmet 2CU4-100FA и ее ближайших отечественных аналогов.

Подобная молниезащитная сетка из бронзы применяется в конструкции мотогондолы двигателя Sam-146 (SuperJet-100).

Характеристики прорезно-вытяжных сеток

Характеристика	DEXMET, США Dexmet 2CU4-100FA	АО «Промтех-Дубна», Россия СФМ-051-84	ООО «Ультра», Россия Strech Air R2 Cu FA-51-73
Вес, г/м ²	73,3 (±10 %)	73,3 ± 7,33	73 (±10 %)
Короткая сторона ячейки (H), мм	1,23(±5 %)	1,23 ± 0,13	1,23(±6 %)
Длинная сторона ячейки (L), мм	2,54 (±5 %)	2,54 ± 0,13	2,54 (±5 %)
Толщина, мм	0,051 (±0,025)	0,051 ± 0,008	0,051(±10 %)
Процент открытой области, %	84 (±5 %)	84	84 (±8 %)

Следует отметить, что для укладки перечисленных металлических молниезащитных покрытий в виде фольг, сеток тканых и просечно-вытяжных на элементы ПКМ в России обычно применяется клеевая пленка, например пленка марки ВК-36 разработки ФГУП «ВИАМ». В зарубежном авиастроении зачастую применяют покрытия, состоящие из молниезащитной сетки, уже внедренной в клеевую пленку. В зависимости от назначения в данных покрытиях клеевая пленка может быть как с одной стороны, так и с двух сторон – для формирования качественного антиэрозионного слоя на поверхности самолета. Данный слой образует ровную поверхность и позволяет сократить количество наносимого лакокрасочного покрытия (ЛКП). В России в качестве антиэрозионного слоя применяется пленочный клей ВК-36А. Поверхностная относительная плотность ВК-36 и ВК-36А составляет примерно $0,300 \text{ кг/м}^2$. Таким образом, удельная масса молниезащиты мотогондолы двигателя с использованием только клеевой пленки марки ВК-36 может достигать $0,375 \text{ кг/м}^2$, а дополнительно с применением антиэрозионного слоя из ВК-36А – до $0,675 \text{ кг/м}^2$.

Удельный вес сеток ПВС зарубежного производства – от $0,122$ до $0,200 \text{ кг/м}^2$ (с учетом одного адгезионного слоя).

Примерами поставщиков ПВС являются Dexmet Corporation, Коннектикут, США; Niles International, Огайо, США, «Микросетчатые технологии», Россия, АО «Промтех-Дубна», Россия, ООО «Ультра», Россия.

Принципиальным недостатком сеток является высокий процент открытой области, что приводит к понижению электромагнитной помехозащищенности силовой установки при воздействии электромагнитного импульса от удара молнии или высокоинтенсивного внешнего электромагнитного поля (L/HIRF – Lightning/High-intensity Radiated Field).

На рис. 4 представлен кожух капота мотогондолы с молниезащитной сеткой в составе авиационного двигателя самолета Airbus. Здесь же даны параметры применяемой сетки – медь, удельный вес – $0,073 \text{ кг/м}^2$, толщина материала – 51 мкм , открытая площадь – 85% .

3. Плазменное или электродуговое напыление проводящих металлических покрытий.

Твердые металлические покрытия, нанесенные распылением расплавленного металла на защищаемую поверхность или на форму для изготовления детали, могут обеспечить эффективную защиту от удара молнии. Материалом обшивки, на который наносится защита, могут быть стекловолоконные или кевларо-эпоксидные композиты. Наиболее распространенным напыляемым металлом является алюминий или медь. Толщина распыленного металла колеблется от 120 до 250 мкм . Металл затвердевает на наружной поверхности композита, что приводит к образованию слоя, способного проводить токи в зонах импульса молниевых разряда 1 или 2 А , согласно авиационным правилам АП-25, с очень небольшими повреждениями. Покрытия, напыленные на изготовленные детали, могут иметь излишне шероховатую поверхность, поэтому может потребоваться шлифование. Этого можно избежать за счет напыления металла в форму, после чего необходимо выполнить укладку слоев композита и отверждение. В этом случае внешняя металлическая поверхность будет гладкой. Некоторые пользователи также сообщали о растрескивании металлической напыленной поверхности, вероятно, возникшей из-за разницы в коэффициентах теплового расширения между металлом и композитом, и изгибе композитной обшивки под действием циклических полетных нагрузок.

К преимуществам технологии плазменного и электродугового нанесения покрытий относятся:

- отличная защита для всех молниеопасных зон, подвергаемых ударам;
- возможность покрытия сложных форм, которые проблематично покрыть проволочными сетками или развальцованной фольгой.

Недостатками являются:

- повышенный вес, сложность отделения от формы;
- низкая технологичность, так как для нанесения требуется специальное оборудование и помещение, по аналогичным причинам – плохая ремонтпригодность;
- удельный вес – от $0,420$ до $0,500 \text{ кг/м}^2$.

Рис. 4. Кожух капота мотогондолы с молниезащитной сеткой в составе авиационного двигателя самолета Airbus

Следует отметить, что в российском авиастроении данная технология в большей степени носит опытный характер, ввиду чего неизвестна стойкость данного вида покрытий к внешним воздействующим факторам, включая циклическое воздействие.

Примером поставщиков этой технологии молниезащиты является Purtech, Inc., Пенсильвания, США.

4. Включение в полимерную композитную структуру токопроводящих нитей (алюминизированное стекловолокно, никелированное углеволокно).

Достоинством такого материала является то, что внешний слой слоистого стеклопластика может быть заменен слоем, выполненным из волокон с покрытием. Отдельные волокна могут воспринимать значительное количество электрического тока за счет превосходной термической связи между алюминием и стеклом. Стекло обеспечивает теплоотвод, за счет чего алюми-

ниевое покрытие выдерживает в 2 раза большие уровни тока относительно уровня, который обычно может восприниматься таким же объемом алюминия. В точке прикрепления молнии некоторое количество алюминия будет испаряться по типу взрыва; затронутая площадь зависит от интенсивности тока и количества алюминия на пределе. Если стеклопластиковый материал с покрытием дополнительно окрашивается или покрывается наполнителем, расширяющиеся газы будут механически сдерживаться и большая часть силы взрыва будет направлена в композитный материал, причем дополнительное количество повреждений будет связано с массой покрывающего материала.

Металлизированное углеволокно с недавнего времени стало доступным в исполнении с никелевым покрытием и с медным. Такой метод молниезащиты работоспособен только для массивных защитных конструкций, имеющих порядка 10 слоев (толщиной 2 мм).

Этот материал хорошо подходит для целей защиты от электромагнитного излучения, а не для защиты от молнии, особенно на внутренних композитных панелях в кабине экипажа и в приборных отсеках.

Преимуществом технологии проводящих нитей является возможность совместного отверждения с многослойным композитом.

К недостаткам относятся:

- повышенная повреждаемость ПКМ, вызванная локализацией образующихся электрических дуг;
- при контакте данного покрытия с углепластиком возможно разрушение алюминиевого покрытия волокон и, как следствие, отслоение молниезащитного покрытия в процессе эксплуатации;
- необходимость применения многослойных защитных конструкций (от 10 слоев по 2 мм каждый);
- дополнительные требования к толщинам грунтовочных и красочных покрытий (толщина не более 1,5 мм).

Примерами поставщиков этих систем защиты являются Hollingsworth and Vose Co, Массачусетс, США; Conductive Composites, Юта, США.

5. Добавление (вплетение) металлических проволок в структуру композита.

Этот метод обеспечивает защиту углепластиковых многослойных композитов за счет добавления тонких металлических проволок, вплетенных во внешний слой композита. Обычно они вплетены двунаправленно во внешний слой углеволокна. Диаметр проволоки обычно колеблется в диапазоне от 25 до 250 мкм. Чаще всего проволока расположена внутри слоя таким образом, что на каждый сантиметр приходится от 4 до 6 проволок. Наиболее эффективным материалом для изготовления такой проволочной защиты является медь, несмотря на то, что алюминий обладает наименьшей плотностью и такой же хорошей проводимостью. Проблема применения алюминиевых проволочек заключается в контакте с углеволокном, в результате которого с течением времени алюминиевые проволочки разрушаются. Основная проблема, наблюдаемая для этого типа системы защиты, заключается

в том, что, поскольку проволока переплетена с углеволокном, по сравнению с сеткой, расположенной на поверхности, основные повреждения возникают ниже наружной поверхности композита, что приводит к значительным повреждениям узла.

К преимуществам вплетенной проволоки относят малое увеличение веса и сокращение номенклатуры применяемых материалов.

К недостаткам:

- коррозию проволоки при воздействии влаги. Наиболее восприимчива к этому алюминиевая проволока;
- испытания показали, что, по сравнению с лучшими поверхностными сетками, использование вплетенных алюминиевых проволок приводит к более глубоким повреждениям структуры ПКМ вследствие испарения / взрыва проволок (эффект взрывающихся проволок) и образования дополнительных электрических дуг.

Основные научные исследования в области молниезащиты авиационной техники

К настоящему времени проведено множество экспериментальных [3–7, 8] и расчетных исследований [7, 9], посвященных изучению эффективности различных технологий молниезащиты. К основным трудностям при использовании технологий нанесения молниезащитных покрытий в авиации, будь то применение проводящих фольг, сеток или плазменного нанесения металлических частиц, стоит отнести необходимость выполнения противоречивых требований, а именно обеспечение хорошей проводимости и износостойкости защиты, прямо пропорционально зависящих от толщины покрытия, и одновременное снижение массы. Наличие необходимости решения такой задачи обусловило всеобщий интерес научно-технического сообщества к изучению электрических и механических свойств молниезащит. В целом ряде работ [3, 4, 6, 9–11] было показано, что чем большей проводимостью обладает защитное покрытие, тем меньшие повреждения получает деталь из ПКМ после прохождения через нее молниевых зарядов. В работе [10]

представлены результаты сравнительного анализа параметров плотности ρ , кг/м³, и удельного сопротивления Ω , Ом·гр/см², наиболее распространенных металлических материалов, которые можно использовать для нанесения в качестве молниезащитных покрытий. К таким материалам относят алюминий, бериллий, кальций, хром, литий, магний, серебро, цинк и др.

В работах [8, 10–14] представлены аналогичные обобщенные данные для углеродных материалов (графен, графит, материалы на основе углеродных нанотрубок), которые в некоторых случаях могут приблизиться к металлическим материалам по значению удельного сопротивления и даже обладают меньшей плотностью, но стоимость их изготовления и нанесения в 3–4 раза превосходит стоимость применения традиционных металлических материалов [3, 4].

Если после удара молнией механические свойства ПКМ деградируют вследствие разрушения структуры углеродного волокна или матрицы, то можно сделать вывод, что подобранная технология молниезащиты малоэффективна. В работах [6, 7, 11, 15] представлены результаты механических испытаний образцов из ПКМ, выполненных до и после инъекции тока большой силы, моделирующего удар молнией. Предполагается, что инъекция тока большой силы всегда приводит к снижению механических свойств ПКМ, но один из примеров, приведенных ниже, показывает, что это не всегда так. Деграция механических свойств ПКМ может происходить с разной интенсивностью для различных типов нагружения: растяжение, сжатие, изгиб, кручение, что обусловлено анизотропностью свойств самого материала. К тому же характер повреждения структуры ПКМ при инъекции тока одной величины может изменяться в зависимости от того, каким образом был нагружен образец или деталь из ПКМ во время эксперимента по оценке сопротивляемости молниевому удару. Так, в работе [7] представлены результаты механического исследования ПКМ с молниезащитными покрытиями из наноструктурированного никеля, направленных и ненаправленных нанотрубок. По результатам экспериментов после

удара образцов возрастающим зарядом в диапазоне от 10 000 до 100 000 А выявлено ожидаемое линейное снижение предела прочности на сжатие и растяжение. Для различных покрытий снижение величин механических характеристик составило от 30 до 75 %. Тем не менее компанией Boeing [8] получены результаты, в которых увеличение моделируемого молниевых заряда приводило к незначительному линейному росту прочности на растяжение ПКМ.

В работах [3, 4] представлены исследования электромеханических характеристик покрытий, наносимых на защищаемые поверхности из ПКМ различными способами. Представлены данные по измеренным значениям удельного сопротивления ПКМ при применении молниезащитных покрытий из медной фольги, серебряного порошка с основой из резины, серебряных углеродных волокон, холодно напыленного металла, графена, химически осажденного серебра, напыления расплавленного алюминия. По результатам работы покрытием, обеспечивающим наименьшее удельное сопротивление $3,3 \cdot 10^{-5}$ Ом·гр/см², стала развальцованная медная фольга, по сравнению с удельным сопротивлением 11 Ом·гр/см² для образца из углепластика без молниезащиты. Второе место занял способ горячего нанесения алюминия со значением этого параметра $6 \cdot 10^{-5}$ Ом·гр/см². Однако, как указано в работах [3, 4], только значение самого по себе удельного сопротивления не обуславливает, каким образом молниевый заряд повредит молниезащитное покрытие и композитную структуру под ним. На это может повлиять как структура покрытия, так и ее плотность, теплопроводность и т.д. Исходя из этого, для полной оценки эффективности выбираемого покрытия обязательно проводить тесты по ударному воздействию молниевыми зарядами. К сожалению, в описываемой работе этого сделано не было.

В этой же работе представлены результаты по минимально достижимым значениям толщины наносимых покрытий. Наименьшая толщина наносимого покрытия 5 мкм получена для технологии химического осаждения серебра на поверхность ПКМ, относительное сопротивление для этого способа составило

$34 \cdot 10^{-5}$ Ом·гр/см². Проведены трибологические исследования представленных покрытий, показавшие, что максимальный коэффициент трения получен для технологий наклейки медной фольги – 0,5, нанесения серебряного порошка на резиновой основе – 0,5, холодного нанесения металлов – 0,6. Такие высокие значения коэффициентов трения приведут к серьезному снижению аэродинамического качества и разогреву покрываемых поверхностей в полете, особенно на околозвуковых и гиперзвуковых скоростях. С учетом этих особенностей технологии горячего нанесения расплавленного алюминия и химического осаждения серебра выглядят более выигрышно. Коэффициент трения, полученный для этих видов покрытий, не превысил 0,2.

Среди отечественных исследований следует выделить работу ФГУП «ВИАМ» [11]. В этой публикации проведен анализ состояния вопроса применения молниезащитных систем, представлена технология создания молниезащитных покрытий на основе углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных астраленами (многослойными углеродными наночастицами) для создания лучшей электрической проводимости материалов. Представлены результаты сравнительного анализа сопротивляемости молниевому удару силой тока 200 000 А и зарядом 20 и 200 Кл образцов из алюминиевого сплава (дюраль), стекло- органотекстолитов и углепластиков с обычным и модифицированным связующими, покрытых молниезащитой и без нее. Так, например, дюралевая обшивка толщиной 1–2 мм получает повреждения в виде сквозного пробоя материала диаметром 3–6 мм или частичного уноса вещества по толщине на глубину 0,4 мм в зависимости от величины заряда. Разрушение образца из углепластика без молниезащиты и с обычным наполнителем сопровождается расщеплением и уносом верхних слоев конструкции размером 85×80 мм, что при последующем воздействии набегающих турбулентных потоков воздуха может привести к разрушению. Однако по сравнению с результатами испытаний стекло- и органотекстолитов, разрушенных на несколько фрагментов, очевидно преимущество в молниестойкости углепластиков. При-

менение молниезащиты из бронзовой стенки значительно снизило размеры повреждения углепластиковых образцов. Разрушение заключалось в сублимации металлического покрытия на площади 30×35 мм, эрозии связующего в 2–3 верхних слоях, что по сравнению с разрушением незащищенного образца является положительным показателем. Но использование такой сетки на 1 м² материала повышает общий вес конструкции на 300–340 г, а изменение аэродинамических характеристик, вследствие увеличения коэффициента трения поверхности не исследовалось. На основе этих результатов в ФГУП «ВИАМ» предложена концепция создания молниезащитного покрытия ПКМ на основе углепластиков. Наиболее интересные положения этой концепции заключаются в следующем:

- создание многовекторности рассеяния тока молнии в покрытии путем включения в работу нескольких поверхностных слоев равнопрочной армирующей ткани, ориентированных под некоторым углом друг к другу;
- минимизация влияния наполнителя как диэлектрика за счет введения в его состав астраленов;
- придание материалу большей электро- и теплопроводности в межслоевом направлении;
- повышение термостойкости матрицы и материала.

В работе представлены результаты испытаний на молниевый удар опытного варианта молниезащиты для углепластика с модифицированным астраленами термостойким наполнителем ВС-2526к и защитными покрытиями из углеродной ткани саржевого плетения или бронзовой сетки. В результате применения такого материала и защиты удалось исключить сквозной пробой материала для всех вариантов величины заряда молниевых ударов для обоих вариантов покрытий. Наблюдалось появление эрозии связующего на поверхностном слое площадью 25 мм и отслоение молниезащитного покрытия на площади диаметром 15 мм для углеродной ткани, а также расплавление и разрывы бронзовой сетки длиной до 40 мм и расслоение основного материала на площади 40–60 мм. Несмотря на то, что отслоение углеродного защитного

покрытия наблюдалось на меньшей площади, низкая технологичность его ремонта и типично высокие значения коэффициентов трения ПКМ заставляют задуматься о целесообразности его применения без дополнительных модификаций.

На основе представленных данных можно заключить, что возможным (перспективным) подходом к молниезащите ПКМ можно считать построение трехуровневых гибридных систем, состоящих из проводящего гладкого (металлического) износостойкого покрытия, электропроводящего во множестве направлений плетеного материала, термостойкой проводящей полимерной матрицы с астраленами для организации межслойного распространения заряда. Однако данная технология обладает недостатком в плане низкой технологичности ремонта поврежденных участков молниезащиты из углеродного волокна вследствие эрозии связующего и отслоения молниезащитного слоя от основного материала; весовые и удельные характеристики остаются высокими (оценка стоимости не производилась).

В более поздней работе ВИАМ [16] описан процесс проведения испытаний фрагментов прототипа панели крыла из углепластика с новым молниезащитным покрытием марки ВКУ-52МЗ на основе гибридного металлоуглеродного наполнителя и полимерного связующего, модифицированного углеродными наночастицами. Дана оценка стойкости нового материала ВКУ-52, который может быть рекомендован к защите летательного аппарата от воздействия молнии с параметрами: сила тока 200 кА и переносимый заряд порядка только 20 Кл. Очевидно, что данная технология имеет ограничения.

В работе [17] японские ученые вводят в состав углепластика новый легкий в применении и полностью полимерный молниезащитный материал. Добавленный полимер полианилин (PANI), диспергированный в реактопластном поперечно-связанном полимере дивинилбензол, был использован для приготовления адгезивного слоя толщиной 0,25–0,4 мм. Структура углепластика с покрытием на основе PANI затем испытана импульсом тока в 100 кА, при этом, согласно авиационным правилам, максимальная сила тока может достигать 200 кА. Съем-

ки высокоскоростной камерой подтвердили, что PANI-слой ведет себя как эффективная клетка Фарадея, делая возможным эффективное рассеяние тока молнии. Видеозапись и термографические изображения подтвердили отсутствие эффекта пиролиза в случае PANI-защищенного углепластика. Свойство PANI формировать 3D-проводящую сеть и его отличная термостабильность, низкая стоимость, легкое применение и коррозионная стойкость делают этот материал весьма перспективным для молниезащитных материалов, но пока для зон самолета, подверженных ударам молнии меньшей силы. Исследование молниестойкости PANI углепластика проводится и в других странах.

В работе [18] в качестве возможного способа нанесения молниезащитного покрытия на элементы фюзеляжа самолета была рассмотрена технология холодного газодинамического напыления с использованием промежуточного слоя. Необходимость промежуточного слоя обусловлена тем, что было трудно нанести алюминиевое молниезащитное покрытие методом холодного напыления непосредственно на поверхность из углепластика. Несмотря на то, что частицы алюминия меньшего размера можно нанести методом осаждения на углепластик, покрытие отслаивалось при толщине около 30 мкм. В предлагаемой авторами схеме используется тонкий промежуточный слой алюминия, наносимый методом плазменного напыления на поверхность из углепластика перед холодным напылением.

Использовать методы термического напыления для металлизации фибропластовых изделий предложено в патенте [19]. Однако основные непрерывные методы термического напыления, такие как плазменное или высокоскоростное напыление, обладают принципиальным недостатком — высоким термическим воздействием на подложку, чреватым деструкцией обрабатываемых композитов, поэтому практической промышленной реализации это предложение не имеет.

В этом отношении уникальным в ряду методов термического нанесения покрытий является детонационное напыление. В 2005 г. была реализована технология металлизации фто-

ропласта методом детонационного напыления, разработанная в Институте гидродинамики СО РАН [20]. Благодаря импульсному принципу детонационного напыления термическое воздействие минимизируется настолько, что удается металлизировать даже пластики с низкой термостойкостью, такие как капролон, полиамид и т.п. Удельный вес молниезащиты, нанесенной детонационным способом, может достигать существенно низких величин. Кроме того, такое покрытие, как мотогондол, обеспечивает лучшую электромагнитную помехозащищенность электронных цифровых агрегатов и электропроводки ГТД в сравнении с металлической сеткой, имеющей 80–90 % открытой области. Данная разработка будет подробно рассмотрена во второй части настоящего исследования.

Выводы

1. Наиболее распространенной технологией молниезащиты ПКМ в мировой и отечественной авиационной промышленности в настоящее время является наклейка металлических фольг и сеток.

Однако имеющийся удельный вес молниезащиты из металлических фольг и сеток (с учетом адгезионных слоев) может давать существенный привес до 0,7–0,9 кг на каждый 1 м² поверхности мотогондолы из ПКМ.

Дополнительно: принципиальным недостатком металлических сеток является высокий процент открытой области (80–90 %), что приводит к понижению электромагнитной помехозащищенности силовой установки при воздействии электромагнитного импульса от удара молнии или высокоинтенсивного внешнего электромагнитного поля (L/HIRF).

2. Стратегическим направлением работ по улучшению молниезащитных свойств авиационных конструкций из ПКМ является

увеличение 3D-проводимости электрического и теплового потоков в материале, обеспечение малого веса и технологичности, включая простоту ремонта в эксплуатации и низкие затраты.

Для молниезащит перспективных типов мотогондол из ПКМ высококонкурентным является конструкторское решение, обеспечивающее кардинально малый удельный вес, высокую электромагнитную помехозащищенность, низкую стоимость затрат в жизненном цикле двигателя.

Потенциальным вариантом решения проблемы организации молниезащиты мотогондолы является применение покрытий из термостойких ПКМ и полимерных связующих, модифицированных наночастицами, в т.ч. астраленами, нанотрубками и т.д. Однако данная технология обладает сложностью и высокой стоимостью ремонта поврежденных участков молниезащиты. Возможно, предпочтительнее применять напыление молниезащиты на ПКМ, например, с помощью детонационной технологии, как имеющее минимальный удельный вес и размеры и не требующее применения наклейки.

Заключение

Для повышения совершенства конструкции перспективных типов авиационных ГТД целесообразно существенное снижение удельного веса молниезащиты мотогондол из ПКМ с одновременным улучшением конструкторско-технологических, производственных и эксплуатационных свойств.

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. Вишняков Л.Р., Чернявский И.И., Зубков О.В. Исследование возможности молниезащиты полимерных композиционных материалов, армированных медной вязаной сеткой // Вісник інженерної академії України. – № 2. – 2012. – С. 143–148.
2. Острик А.В., Филипенко А.А. Молниезащита углепластиковых элементов конструкции самолета при тепловом и механическом действиях прямого удара молнии // Конструкции из композиционных материалов. – 2010. – № 1. – С. 34–44.
3. Gagne M., Theriault D., Lightning strike protection of composites // Progress in Aerospace Sciences. – 2014. – Vol. 64. – P. 1–16.

4. Gagne M, Properties of lightning strike protection coatings: PhD Thesis / University of Montreal. – Montreal, 2016.
5. Mall S., Ouper B.L., Fielding J.C. Compression strength degradation of nanocomposites after lightning strike // *Journal of Composite Materials*. – 2009. – Vol. 43, no. 24. – P. 2987–3001.
6. Carbon nanofiber paper for lightning strike protection of composite materials / J. Gou, Y. Tang, F. Liang, Z. Zhao, D. Firsich, and J. Fielding // *Composites Part B: Engineering*. – 2009. – Vol. 41. – P. 192–198.
7. Feraboli P., Miller M. Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupons subjected to simulated lightning strike // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40. – P. 954–967.
9. Damage analysis for carbon fiber/epoxy composite exposed to simulated lightning current / L. Shulin, Y. Junjie, Y. Xuelin, C. Fei, S. Xiaopeng // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2016. – Vol. 35 (15). – P. 1201–1213.
8. Single wall carbon nanotubes for conductive wiring," in *Sustainable Systems and Technology* / C.M. Schauerma, J. Alvarenga, M.J. Ganter, T.P. Seager, B.J. Landi, R.P. Raffaele // 2009. ISSST '09. IEEE International Symposium on. – 2009. – P. 1–5.
10. ASM Handbook Online: Metals Handbook: Structure and Properties of Metals: Properties of Metals: Physical Properties of Metals [Online]. – URL: <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp> (accessed: 14.11.2021).
11. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содержащие наночастицы / Г.М. Гуняев, Л.В. Чурсова, А.Е. Раскутин, Г.В. Начинкина, А.Г. Гуняева, В.М. Куприенко // *Все материалы: энцикл. справ.* – 2012. – № 3. – С. 24–35.
12. Silverman J.B. a. E. Challenges and opportunities in multifunctional nanocomposite structures for aerospace applications // *Materials Research Society Bulletin*. – 2007. – Vol. 32 (4). – P. 328–334.
13. N/A. graphenesupermarket (May 1st 2011). – URL: <https://graphene-supermarket.com/home.php> (accessed: 14.11.2021).
14. Tune L. Physicists Show Electrons Can Travel More Than 100 Times Faster in Graphene. – 2008, May 2nd, 2011. – URL: <https://newsdesk.umd.edu/scitech/release.cfm?ArticleID=1621> (accessed: 14.11.2021).
15. Mall S., Ouper B.L., Fielding J.C. Compression strength degradation of nanocomposites after lightning strike // *Journal of Composite Materials*. – 2009. – Vol. 43. – P. 2987–3001.
16. Проведение испытаний на молниестойкость экспериментальных и конструктивно-подобных образцов, выполненных из углепластика, с молниезащитным покрытием / А.Г. Гуняева, Л.В. Черфас, О.А. Комарова, В.М. Куприенко // *Труды ВИАМ: электрон. науч. журнал*. – 2017. – № 7. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1132 (accessed: 14.11.2021).
17. Polyaniline-based all-polymeric adhesive layer: An effective lightning strike protection technology for high residual mechanical strength of CFRPs / V. Kumara, T. Yokozekia, T. Okabad, Y. Hiranob, T. Gotoc, T. Takahashic, A.A. Hassend, A. Ogasawarae // *Composites Science and Technology*. – 2019. – Vol. 172. – P. 49–57.
18. Fabrication of aluminum coating onto CFRP sub-strate by cold spray / J. Affi, H. Okazaki, M. Yamada, M. Fukumoto // *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52. – P. 1759–1763.
19. Method for Coating a Fiber Composite Component for an Aircraft or Spacecraft and Fiber Composite Component Produced by Said Method: CA2722108 (A1). – 2009–11–05 (accessed: 14.11.2021).
20. Способ металлизации детонационным напылением детали из полимерного материала: пат. Рос. Федерации № 2425912 / Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Злобин С.Б., Острер С.Г.; патентообл. Ин-т гидроинжен. им. М.А. Лаврентьева СО РАН; заявл. 04.08.2009; опубл. 10.08.2011.

References

1. Vishnyakov L.R., Chernyavskiy I.I., Zubkov O.V. «Study of lightning protection capabilities of the polymer composites reinforced by the knitted copper mesh». *Ukraine Engineering Academy Reporter*, 2012, no. 2, pp. 143–148.
2. «Lightning protection of the aircraft carbon plastic structural elements in the conditions of thermal and mechanical effect of the direct lightning strike». A.V. Ostriuk, A.A. Filipenko, *Composite Structures*, 2010, № 1, Pages 34–44.
3. Gagne M., Theriault D., Lightning strike protection of composites, *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, vol. 64, pp. 1–16.
4. Gagne. M, Properties of lightning strike protection coatings, PhD Thesis, University of Montreal, 2016.
5. Mall S., Ouper B.L., Fielding J.C. Compression Strength Degradation of Nanocomposites after Lightning Strike, *Journal of Composite Materials*, 2009, vol. 43, no. 24, pp. 2987–3001.
6. Gou J., Tang Y., Liang F., Zhao Z., Firsich D., Fielding J. Carbon nanofiber paper for lightning strike protection of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 2009, vol. 41, pp. 192–198.

7. Feraboli P., Miller M. "Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupons subjected to simulated lightning strike. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, vol. 40, pp. 954-967.
8. C.M. Schauerma, J. Alvarenga, M.J. Ganter, T.P. Seager, B.J. Landi, R.P. Raffaele, Single wall carbon nanotubes for conductive wiring. *Sustainable Systems and Technology*, 2009. ISSST '09. IEEE International Symposium on, 2009, pp. 1-5.
9. Shulin L., Junjie Y., Xuelin Y., Fei C., Xiaopeng S. Damage analysis for carbon fiber/epoxy composite exposed to simulated lightning current. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, vol. 35 (15), pp 1201-1213.
10. ASM Handbook Online: Metals Handbook: Structure and Properties of Metals: Properties of Metals: Physical Properties of Metals [Online], available: <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp> (accessed: 14.11.2021).
11. Gunyaev G.M., Chursova L.V., Raskutin A.E., Nachinkina G.V., Gunyaeva A.G., Kuprienko V.M. Lightning protection coatings for structural carbon fiber composites containing nano-particles // *All Materials. Encyclopedic reference*. 2012, no. 3, pp. 24-35.
12. Silverman J.B. a. E. Challenges and Opportunities in Multifunctional Nanocomposite Structures for Aerospace Applications. *Materials Research Society Bulletin*, 2007, vol. 32.
13. N/A. graphenesupermarket (May 1st 2011), available: <https://graphene-supermarket.com/home.php> (accessed: 14.11.2021).
14. Tune L. (2008, May 2nd, 2011). Physicists Show Electrons Can Travel More Than 100 Times Faster in Graphene, available: <https://newsdesk.umd.edu/scitech/release.cfm?ArticleID=1621> (accessed: 14.11.2021).
15. Mall S., Ouper B.L., Fielding J.C. Compression Strength Degradation of Nanocomposites after Lightning Strike. *Journal of Composite Materials*, 2009, vol. 43, pp. 2987-3001.
16. Gunyaeva A.G., Chefras L.V., Komarova O.A., Kuprienko V.M. Lightning Resistance Testing of Experimental and Structurally Similar Samples Made of Carbon Fiber Reinforced Polymer with Lightning Protection Coating. *Electronic Scientific Magazine "VIAM Papers"*. 2017, no. 7. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1132 (accessed: 14.11.2021).
17. Kumara V., Yokozekia T., Okabad T., Hiranob Y., Gotoc T., Takahashic T., Hassend A.A., Ogasawarae A. Polyaniline-based all-polymeric adhesive layer: An effective lightning strike protection technology for high residual mechanical strength of CFRPs. *Composites Science and Technology*, 2019, 172, pp. 49-57.
18. Affi J., Okazaki H., Yamada M., Fukumoto M. Fabrication of aluminum coating onto CFRP substrate by cold spray. *Materials Transactions*. 2011, vol. 52, pp. 1759-1763.
19. Method for Coating a Fiber Composite Component for an Aircraft or Spacecraft and Fiber Composite Component Produced by Said Method. CA2722108 (A1). 2009-11-05 (accessed: 14.11.2021).
20. Schtertser A.A., Ulyanitskiy V.Y., Zlobin S.B., S.G. Ostrer. Plastic Metal Bonding Method. RF Patent no. 2 425 912 dd 04.08.2009.

Об авторах

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

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

About the authors

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

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

Получено 16.11.2021

Принято 08.12.2021

Опубликовано 28.01.2022