

УДК 620.1:678.747.2

*А.Г. Гуняева¹, Л.В. Черфас¹, О.А. Комарова¹, В.М. Куприенко²***ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНЫХ
ОБРАЗЦОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА,
С МОЛНИЕЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-10-10

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят свое применение в различных областях промышленности и техники. В авиационной промышленности использование новых и усовершенствованных материалов, таких как ПКМ, приводит к повышению эффективности летательных аппаратов, а именно – к снижению массы конструкции. Однако с увеличением применения ПКМ в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) возник вопрос их защиты от накопления статического электричества и от воздействия молниевых разрядов в условиях грозового фронта при полете. В статье описаны процесс проведения испытаний экспериментальных и конструктивно-подобных образцов – фрагментов прототипа панели крыла из углепластика с разработанным во ФГУП «ВИАМ» молниезащитным покрытием (МЗП) марки ВКУ-53МЗ, порядок и методы проведения испытаний, дана оценка стойкости разработанного материала ВКУ-52МЗ к воздействию электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы (ПКМ), молниезащитное покрытие, углепластик, испытания на молниестойкость.

Polymeric composite materials (PKM) find the application in different areas of the industry and equipment. In the aviation industry use of new and advanced materials, such as PKM, leads to increase of efficiency of flight vehicles, namely decrease in weight of design. However, with increase in application of PKM in designs of flight vehicles (LA) there was question of their protection against accumulation of static electricity in and lightning strike protection in the conditions of the storm front when flying. In article process of carrying out tests of experimental samples and constructive and similar samples is described – fragments of prototype of the panel covered from CFRP with the lightning strike protection coating (MZP) of the VKU-53MZ developed in FGUP «VIAM», order and methods of carrying out tests, the assessment of firmness of the developed material VKU-52MZ to influence of the electric discharge simulating impulse of lightning current is given.

Keywords: polymeric composite materials (PCM), lightning strike protection coating, CFRP, tests for resistance to lightning strike.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²23 Государственный морской проектный институт – филиал открытого акционерного общества «31 Государственный проектный институт социального строительства» [23 State Sea Design Institute – Branch Of Joint-Stock Company «31 State Design Institute Of Social Construction»]; e-mail: mail@gmpi.spb.ru

Введение

На протяжении многих лет основу авиационных материалов составляли алюминиевые и титановые сплавы [1]. В начале XX столетия появился новый класс уникальных материалов – полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих

высокими удельными деформационно-прочностными, эксплуатационными характеристиками и гораздо более низкой массой по сравнению с традиционными применяемыми в авиации дюралюминиевыми материалами [2]. Таким образом, в настоящее время применение ПКМ, а именно углепластиков, в конструкциях летательных аппаратов (элероны, лонжероны, внешние и центральные ступенчатые двери, откидные обтекатели, покрытия пола, вертолетные лопасти и др.) является перспективным и экономически выгодным направлением развития авиационной промышленности [3, 4].

В связи с широким внедрением ПКМ в конструкции планера летательных аппаратов (ЛА) возникла проблема обеспечения защиты таких конструкций от воздействия электрических разрядов молнии и, как следствие, обеспечения безопасности полетов [5]. Известно, что незащищенные углепластиковые конструкции ЛА при воздействии молниевых разрядов получают значительные повреждения в отличие от аналогичных конструкций, выполненных из металлических материалов [6]. Такие повреждения приводят к немалым затратам, связанным с простоем и ремонтом непосредственно ЛА, а также влекут за собой возможные аварийные ситуации. Очевидным отличием углепластиковых элементов от металлических, которое обуславливает их большую уязвимость при прямом воздействии электрического разряда молнии, является существенно более низкая электропроводность [7]. Именно поэтому разрабатываемые в настоящее время способы защиты направлены в основном на увеличение данной характеристики.

В настоящее время подавляющее большинство разработанных вариантов защиты от электрических разрядов молнии для конструкций из ПКМ сводится к одному способу – использованию в качестве верхнего слоя медной сетки/фольги (для углепластиков) или алюминиевой сетки/фольги (для стекло- и органопластиков) [8]. Выбор молниезащиты осуществляется с учетом возможного характера воздействия канала и тока молнии на поверхность ЛА, т. е. в зависимости от зоны расположения агрегата на планере. Вместе с неоспоримыми преимуществами использования металлических систем защиты – хорошей проводимостью и обеспечением быстрого стекания с поверхности ЛА электрического тока, существуют и недостатки – значительный привес массы, опасность возникновения коррозионных процессов на границе раздела «ПКМ–металл» и, как следствие – ограниченный срок службы, ухудшение качества аэродинамической поверхности, а также сложности в технологии использования сетки и фольги при изготовлении изделий [9, 10].

Сотрудниками ФГУП «ВИАМ» на протяжении долгого времени ведутся работы в области создания молниезащитных покрытий (МЗП) для ПКМ, основанные на применении углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных углеродным наночастицами [11], для создания лучшей проводимости материалов, применяемых в конструкциях, выходящих на внешнюю поверхность фюзеляжа ЛА в зоне действия смещающихся разрядов молнии [12]. Испытания на молниестойкость проводятся как на экспериментальных образцах, так и на конструктивно-подобных элементах. Одной из последних разработок ФГУП «ВИАМ» в данной области является МЗП марки ВКУ-52МЗ на основе гибридного металлоуглеродного наполнителя и полимерного связующего, модифицированного углеродными наночастицами [13].

В данной статье приведены описание и результаты проведенных испытаний на молниестойкость экспериментальных образцов углепластика и конструктивно-подобных образцов – фрагментов прототипа панели крыла из углепластика с МЗП марки ВКУ-52МЗ.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

Материалы и методы

Для исследования на молниестойкость во ФГУП «ВИАМ» изготовлены экспериментальные образцы из углепластика марки ВКУ-47И размером 100×100 мм и конструктивно-подобные образцы – фрагменты прототипа конструкции панели крыла в виде трехстрингерной панели размером 410×300 мм:

- без МЗП;
- с МЗП марки ВКУ-52МЗ без лакокрасочного покрытия (ЛКП);
- с МЗП марки ВКУ-52МЗ с нанесенным ЛКП – эмалью марки С21/100 UVR.

Молниезащитное покрытие марки ВКУ-52МЗ имеет две модификации:

- ВКУ-52МЗ/230 – выполнено на основе гибридного металлоуглеродного наполнителя саржевого плетения марки Tenax-E DRWF HTA40 3K-LSP-TW-200 (с содержанием металла 33 г/м²);
- ВКУ-52МЗ/480 – выполнено на основе гибридного металлоуглеродного наполнителя сатинового плетения марки Tenax-E DRWF HTA40 6K-LSP-5HS-370 (с содержанием металла 102 г/м²).

Молниезащитные покрытия выполнены на основе термостойкого эпоксидного связующего марки ВС-2526к, модифицированного углеродными наночастицами (УНЧ).

Испытания на молниестойкость проводили на базе аккредитованного экспериментального комплекса «23 ГМПИ – филиал АО «31 ГПИСС» (г. Санкт-Петербург) на высоковольтных стендах при воздействии на материал электрическими разрядами, имитирующими импульс тока молнии, с заданными параметрами согласно требованиям Авиационных Правил (АП-25, п. 25.581 «Защита от молнии») [15], квалификационных требований КТ 160Д [16] и зарубежных норм (FAR, JAR).

Для проведения испытаний образцов при воздействии импульсов тока молнии с заданными параметрами сначала провели расчет параметров высоковольтного стенда.

На рис. 1 приведена кривая изменения силы тока и величины переносимого заряда по времени протекания электрического заряда, имитирующего воздействие молнии, при проведении испытаний на молниестойкость в соответствии с нормами летной годности. Порядок применения составляющих *A*, *B*, *C*, *D* определяется для каждого конкретного случая, при этом могут использоваться как отдельные составляющие, так и сочетание двух и более составляющих. В данном случае испытания проводили при воздействии высоковольтных разрядов с параметрами тока $A+C_1$, $A+C_2$, имитирующих воздействие тока молнии, где компонент *A* – импульс главного разряда $I=200$ кА; *C* – постоянная составляющая тока (Q – величина переносимого заряда), $C_1-Q=20$ Кл и $C_2-Q=200$ Кл.

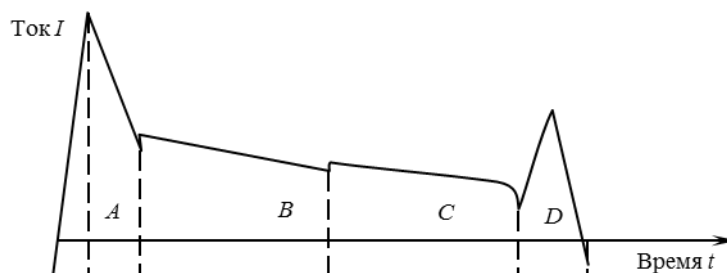


Рис. 1. Форма и параметры импульса разряда, имитирующего ток молнии, с составляющими: *A* – импульс тока первого обратного разряда; *B* – промежуточный ток; *C* – постоянный ток; *D* – ток повторного разряда

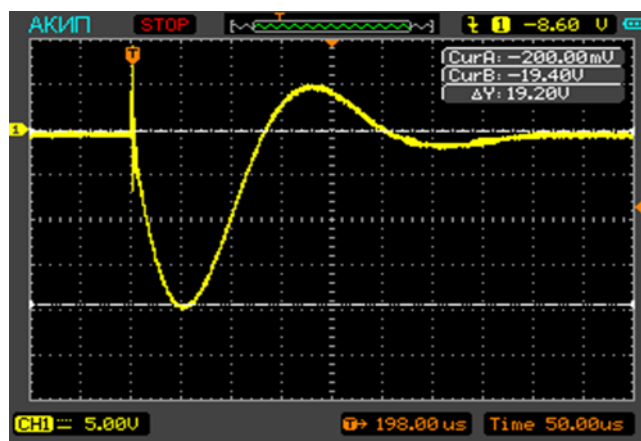
Таким образом, исследования проводили с использованием независимых генераторов импульсных токов, воспроизводящих соответственно компоненты *A* и *C* тока

молнии. Один из генераторов импульсов ГИТ-1 формировал компоненту *A* с амплитудой до 200 кА, генератор импульсов ГИТ-2 синхронизирован с работой генератора импульсов ГИТ-1 и формировал компоненту *C* с суммарным зарядом до 20 Кл, а генератор ГИТ-3 формировал компоненту *C* с суммарным зарядом до 200 Кл [17].

Синхронизацию работы генераторов импульсов тока и «сшивку» используемых в расчетах экспонент осуществляли от пульта управления.

Измерение силы тока молнии проводили с помощью осциллографа.

Типовая осциллограмма компоненты *A*, формируемой генератором ГИТ-2, приведена на рис. 2. Измерение тока молнии проводили с помощью шунта и осциллографа TDS1062.



$$I_{\max} = 201 \text{ кА}$$

Рис. 2. Осциллограмма импульса тока генератора ГИТ-2 [17]

Устройство крепления экспериментальных образцов и коаксиальный подвод тока молнии к образцу представлены на рис. 3. При проведении испытаний экспериментальный образец прикрепляют с помощью прижимной металлической пластины к стеклопластиковой подложке, что хорошо видно на схеме (рис. 4). При проведении испытаний образцы крепили с помощью прижимной металлической пластины к металлической или стеклопластиковой пластине (подложке, рис. 4, *a*) или к стеклопластиковой рамке (рис. 4, *б*).

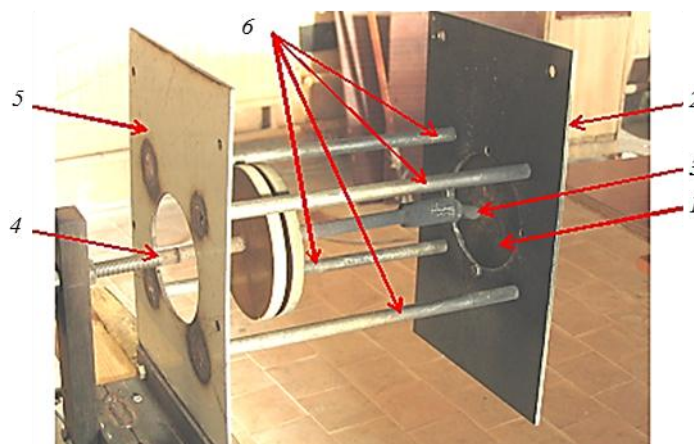


Рис. 3. Устройство коаксиального подвода тока молнии к образцу [17]:

1 – образец; 2 – алюминиевая пластина; 3 – разрядный промежуток; 4 – токоподводящий электрод; 5 – заземленная металлическая пластина; 6 – токопроводящие стержни

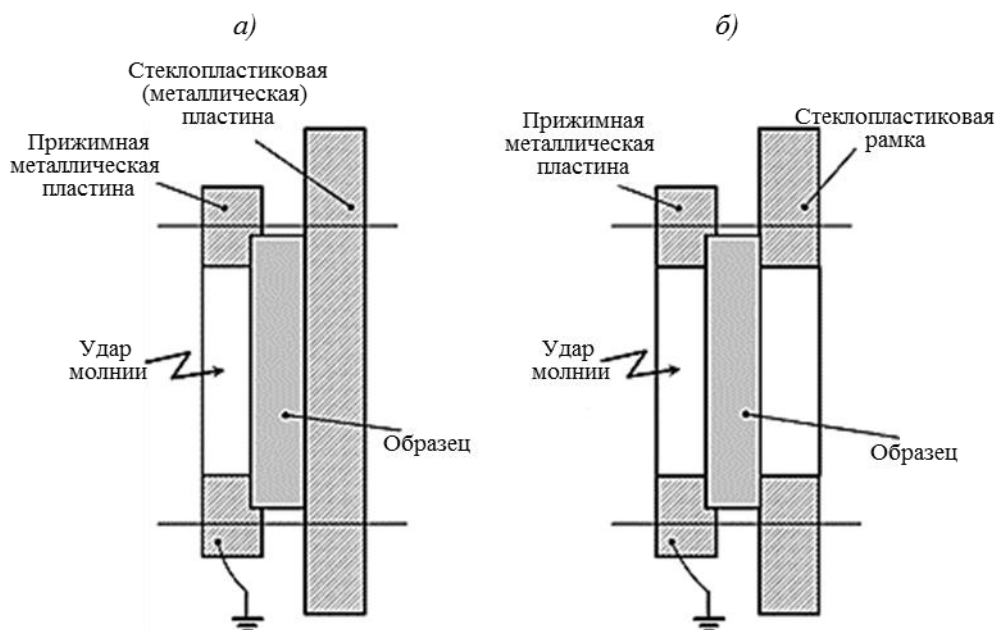


Рис. 4. Устройство крепления образцов при испытании током молнии:

а – крепление образца к стеклопластиковой (металлической) пластине; б – крепление образца к стеклопластиковой рамке

Внешний вид устройства крепления образцов и подвода тока молнии через воздушный промежуток от генераторов импульсных токов к образцу приведены на рис. 5.

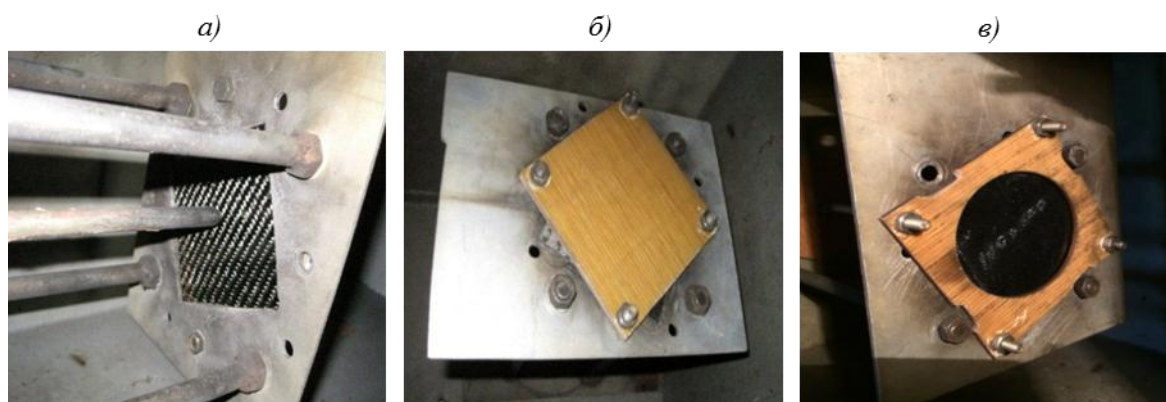


Рис. 5. Внешний вид крепления экспериментального образца:

а – вид со стороны образца и стержневой электрод для ввода тока; б, в – вид крепления к стеклопластиковой пластине и к стеклопластиковой рамке соответственно

Фрагменты прототипа конструкции панели крыла из углепластика с МЗП испытывали с применением подложки, выполненной в виде стеклопластиковой пластины, для оценки стекания разряда молнии по поверхности МЗП. Для прижима фрагментов прототипа конструкции панели крыла из углепластика использовали контактную пластину с отверстием размером 300×300 мм (контакт осуществлялся сверху и снизу испытуемого фрагмента прототипа панели крыла из углепластика шириной не менее 30 мм). Внешний вид устройства крепления образца и подвода тока молнии через воздушный промежуток от генераторов импульсных токов к фрагменту прототипа конструкции панели крыла приведены на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид крепления фрагментов прототипа конструкции панели крыла из углеродного пластика со стороны подложки (а) и электрода (б)

Каждый из образцов с МЗП (с нанесенным ЛКП и без него) подвергали однократному воздействию импульса тока молнии $200 \text{ кА}+10\%$ с суммарным зарядом $20 \text{ Кл}+20\%$ со стороны МЗП.

Молниестойкость образцов после воздействия электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии, оценена следующим образом:

- визуальным осмотром и замером зон поражения образцов с определением характера разрушения;
- измерением зоны расслоения образцов методом ультразвукового контроля (УЗК) на дефектоскопе в сравнении с результатами, полученными до испытаний;
- визуальным осмотром типичных зон поражения образцов под микроскопом при увеличении $\times 10$ и $\times 25$;
- по результатам испытаний на трехточечный изгиб не менее двух образцов, вырезанных из зон с различным удалением от эпицентра зоны поражения [18].

Результаты и обсуждение

Экспериментальные образцы

Анализ и сравнение результатов испытаний на молниестойкость экспериментальных образцов из углеродного пластика (размером $100 \times 100 \text{ мм}$) показал, что образцы без МЗП получили повреждения в виде отрыва материала по всей поверхности образца вдоль волокон, сильного прогара и трещины (рис. 7, а, б). Установлено, что при использовании МЗП марок ВКУ-52МЗ/230 и ВКУ-52МЗ/480 на образцах выявлена деградация связующего, прогар и разрывы волокон диаметром не более 45 мкм в эпицентре удара, при этом повреждения основного материала конструкции не зафиксированы (рис. 7, в). Установлено, что при использовании МЗП повышается стойкость материала к воздействию динамических и тепловых нагрузок за счет повышенной плотности используемой углеродной ткани. Полностью отсутствуют сквозной пробой, трещины, отрыв слоев и повреждения обратной стороны образцов, наблюдается лишь незначительное изменение поверхности, связанное с эрозией связующего и разрушением волокон верхнего слоя (рис. 7, г).

Исследования опико-микроскопическим методом образцов из ПКМ с МЗП после воздействия электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии, показали, что нанесение МЗП марки ВКУ-52МЗ обеспечивает снижение размера и изменение характера разрушения внешней стороны образца (частичное нарушение целостности волокон углеродного наполнителя и эрозия связующего верхних слоев образцов) и полностью исключает сквозные пробои и прогары с внутренней стороны, сохраняя целостность конструктивной части ПКМ. Результаты исследования приведены на рис. 8.

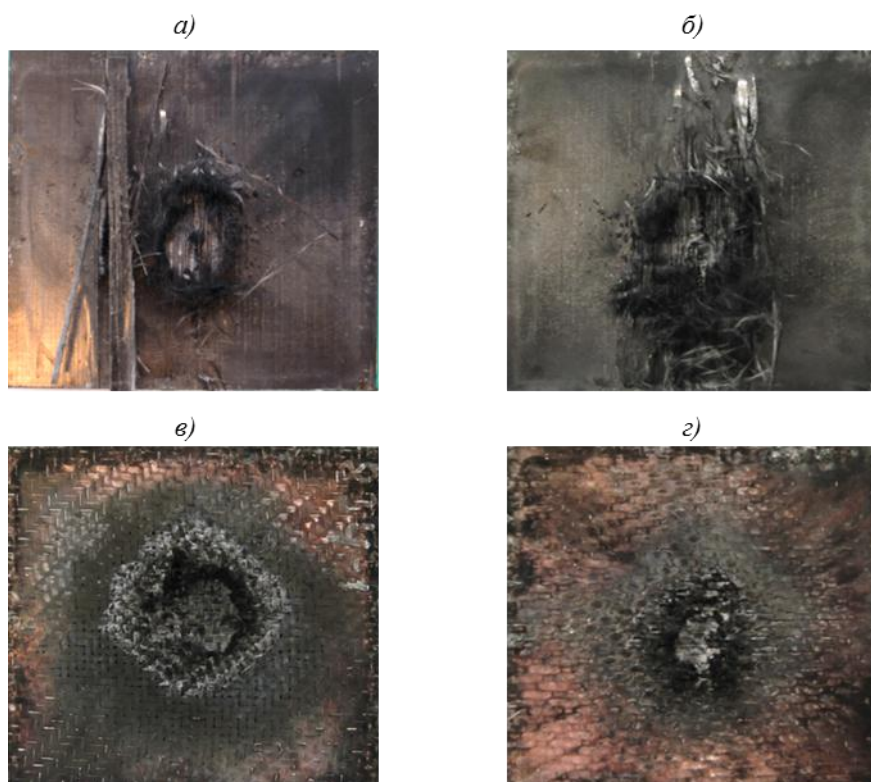


Рис. 7. Внешний вид образцов после проведения испытаний:

а, б – образцы углепластика без молниезащитного покрытия (МЗП); *в* – образец углепластика с МЗП ВКУ-52МЗ/230; *г* – образец углепластика с МЗП ВКУ-52МЗ/480

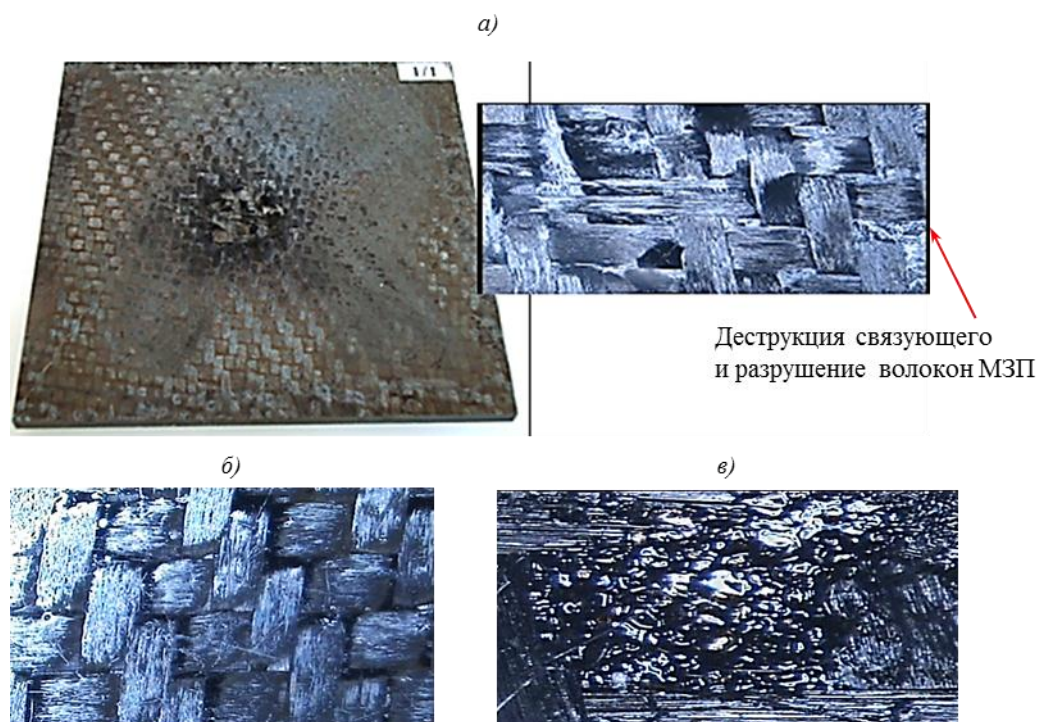


Рис. 8. Разрушения образца из ПКМ с молниезащитным покрытием (МЗП) на основе двух слоев угленанокомпозита после испытаний на молниестойкость:

а – внешнее разрушение; *б* – внутренняя сторона образца с МЗП; *в* – деструкция связующего в МЗП на границе эпицентра поражения током молнии

После проведения испытаний на молниестойкость образцы исследованы высокочастотным эхо-импульсным методом путем сканирования преобразователем по всей площади образца с целью определения образовавшихся внутренних дефектов [19, 20] и для исследования механических свойств образцов после высоковольтных испытаний, имитирующих ток молнии.

Установлено, что в образцах из углепластика (толщиной 2–2,3 мм) с покрытием ВКУ-52МЗ дефекты и повреждения (выгорание связующего, расслоение, разрыв волокон) в эпицентре удара молнии залегают на глубину не более 0,2–0,6 мм со стороны воздействия молниевых разрядов. Это свидетельствует о том, что повреждены 1–2 слоя материала (молниезащитное покрытие), а основной материал (углепластик) не поврежден. На образцах из углепластика без покрытия обнаружены дефекты и повреждения в виде деструкции и выгорания связующего, расслоений, образования трещин, достигающие глубины залегания от 0,9 до 1,3 мм.

Далее на этих же экспериментальных образцах определяли остаточную прочность материала после воздействия молниевых разрядов, а именно – предел прочности при изгибе по ГОСТ 25.604. Полученные результаты приведены в таблице.

Предел прочности при изгибе экспериментальных образцов из углепластика с молниезащитным покрытием в различных участках зоны поражения

Параметры тока при высоковольтных испытаниях	Сохранение прочности, %, на расстоянии от эпицентра поражения, мм			
	0	10	20	30
$I=200$ кА, $Q=20$ Кл	Образец углепластика с ВКУ-52МЗ/230			
	65	70	72	76
	Образец углепластика с ВКУ-52МЗ/480			
	70	83	88	90

Установлено, что сохранение прочности при изгибе в эпицентре удара при воздействии тока с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл при использовании МЗП ВКУ-52МЗ/230 составляет 65% от исходной прочности образца, а в случае с использованием МЗП ВКУ-52МЗ/480 прочность при изгибе в эпицентре удара составляет 70% от исходной прочности образца и возрастает до 90% на удалении от эпицентра на 30 мм [9].

Фрагменты прототипа конструкции панели крыла

Перед проведением испытаний на молниестойкость фрагментов прототипа конструкции панели крыла для определения возможных дефектов и расслоений, образовавшихся в процессе формования, проведено ультразвуковое исследование панели до воздействия молниевых разрядов [11]. Контроль фрагментов прототипа конструкции панели крыла, также как и для экспериментальных образцов, проводили высокочастотным эхо-импульсным методом путем сканирования преобразователем по всей площади образца с целью определения образовавшихся дефектов. Установлено, что во фрагментах прототипа конструкции панели крыла отсутствуют расслоения, трещины и поры, что свидетельствует о получении качественного монолитного бездефектного изделия.

Принимая во внимание то, что разряд молнии включает как электрическое, так и ударное воздействие на материал, исследование фрагментов прототипа конструкции панели крыла на воздействие высоковольтных испытаний, имитирующих ток молнии, включало оценку сохранения ресурса прочности [21] до и после воздействия молниевых разрядов методами трехточечного и четырехточечного изгиба.

Для проведения испытаний из фрагментов прототипа конструкции панели крыла вырезали образцы размером 150×350×50 мм. Проведены испытания на трехточечный и четырехточечный изгиб вырезанных образцов без ударного воздействия и с предварительным ударным воздействием свободно падающим грузом с энергией удара 6,7 Дж/мм

по ASTM D 7136. Ударное воздействие свободно падающим грузом имитировало возможный удар молнии в процессе эксплуатации летательного аппарата. По результатам испытаний установлено, что на образцах при воздействии максимальной нагрузки ~60 кН зафиксированы отслоение углепластиковой обшивки от пенозаполнителя и их расслоение (рис. 9). Сохранение остаточной прочности после динамического воздействия свободно падающим грузом составляет не менее 80% от исходного значения, что для композиционных материалов является хорошим показателем сохранения свойств.

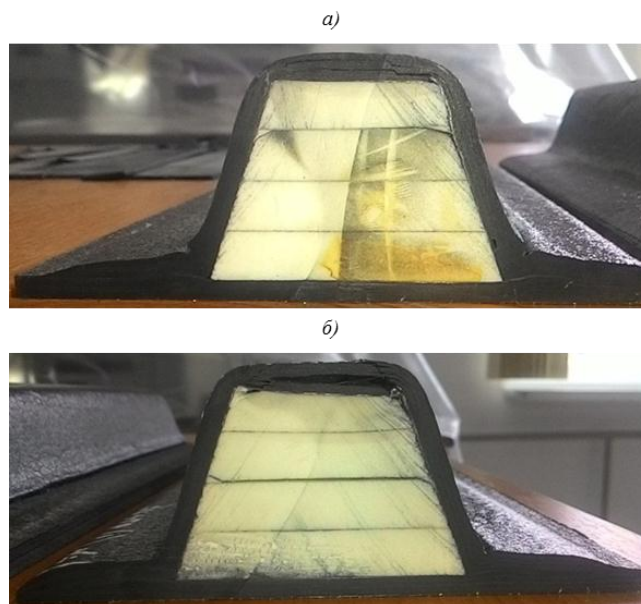


Рис. 9. Вид элемента фрагмента прототипа конструкции панели крыла после испытаний на трехточечный (а) и четырехточечный изгиб (б)

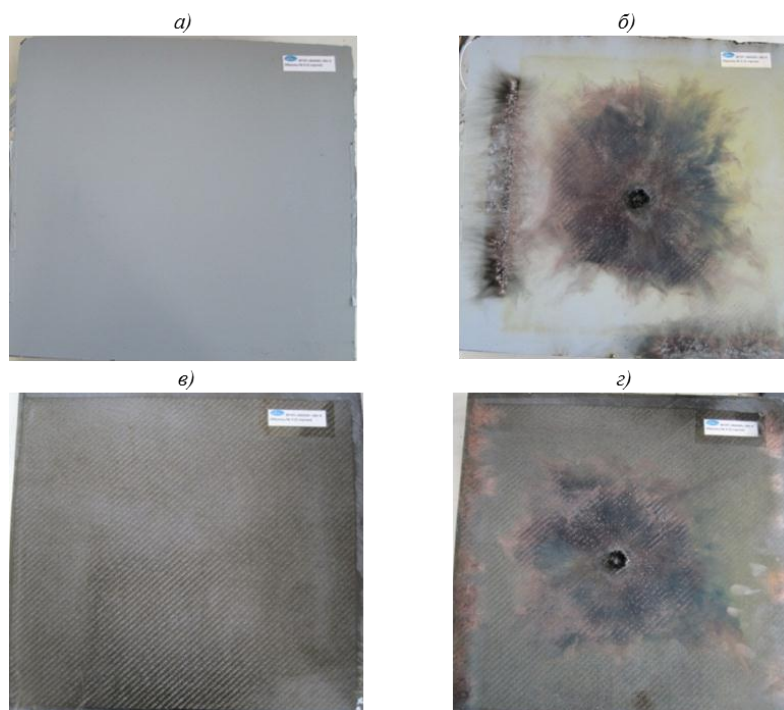


Рис. 10. Внешний вид фрагментов прототипа конструкции панели крыла с молниезащитным покрытием (МЗП) марки ВКУ-52МЗ до (а) и после (б–г) проведения испытаний на молниестойкость при воздействии молниевых разрядов с параметрами $I=200$ кА и $Q=20$ Кл [11] с нанесенным лакокрасочным покрытием (ЛКП) (а, б) и без ЛКП (в, г)

Анализ и сравнение результатов испытаний на молниестойкость фрагментов прототипа конструкции панели крыла показали, что на всех фрагментах (рис. 10) полностью отсутствуют сквозной пробой, трещины, отрыв слоев и повреждения обратной стороны. На фрагментах прототипа панели крыла с МЗП марки ВКУ-52МЗ с нанесенным ЛКП (рис. 10, *а*) зафиксировано выгорание ЛКП в области стекания разряда молнии, что не привело к характерным повреждениям (прогар, деструкция связующего, расщепление углеродных волокон) МЗП вне зоны эпицентра удара (рис. 10, *б*). Установлено также, что все фрагменты прототипа панели крыла с МЗП марки ВКУ-52МЗ (с нанесенным ЛКП и без него) получили характерные повреждения в эпицентре зоны удара (прогар, деструкция связующего, расщепление углеродных волокон) на площади диаметром не более 35 мм.

Для проведения исследований методом УЗК из фрагментов вырезали образцы-темплеты. Установлено, что глубина повреждений образцов из ПКМ с МЗП марки ВКУ-52МЗ в эпицентре молниевых ударов составила от 1,0 до 1,6 мм, размер повреждений, измеренных по направлению длинной стороны стрингера, составил от 104 до 174 мм. Толщина темплета составляла порядка 4–4,5 мм, следовательно, поврежден верхний слой МЗП и зафиксирована небольшая деструкция связующего в слое основного материала углепластика ВКУ-47И (рис. 11). На образцах из углепластика ВКУ-47И без МЗП обнаружены дефекты в виде внутренних трещин и расслоений.

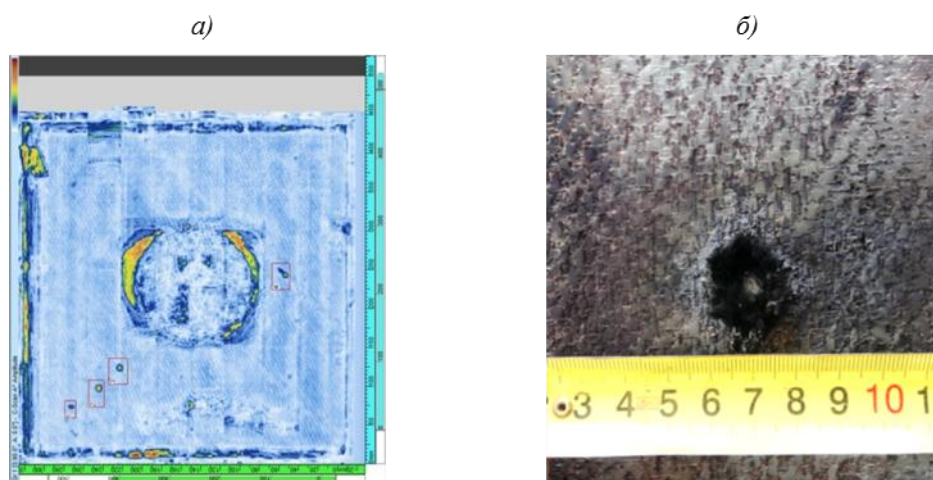


Рис. 11. Образец из углепластика ВКУ-47И с молниезащитным покрытием на основе двух слоев ВКУ-52МЗ:

а – после испытаний на молниестойкость; *б* – изображение *С*-скана, полученное методом УЗК [11]

Для проведения сравнительной оценки сохранения ресурса прочности исследуемых фрагментов после испытаний на молниестойкость (с учетом ранее проведенных испытаний на сохранение остаточной прочности до воздействия молниевых разрядов), из подвергшихся удару молнией фрагментов вырезали образцы размером 150×350×50 мм для исследования их методами трехточечного и четырехточечного изгиба. Установлено, что при испытании образцов после удара молнией на трехточечный изгиб полученные значения нагрузки, при которых происходит разрушение материала, уменьшились на 23%. При этом результаты испытаний образцов на четырехточечный изгиб показали сохранение механических характеристик на уровне показателей, полученных на образцах, не подверженных молниевому удару.

Проведенные исследования и полученные результаты показали, что для реализации функции молниезащиты для ПКМ достаточно покрытия, состоящего из одного слоя МЗП марки ВКУ-52МЗ.

Заключения

Повышение молниестойкости МЗП, содержащего наночастицы, главным образом связано с эффектом значительного повышения проводимости диэлектрической матрицы с диспергированными в ней электропроводящими частицами, особенно с ростом температуры, воздействующей на материал при высоковольтных разрядах. В этом случае механизм увеличения проводимости связан с возрастанием степени инжекции слабосвязанных электронов в наночастицах, приводящей к возрастанию тепловой флуктуации атомов и высокой поляризуемости наночастиц [22].

Текстура равнопрочной металлоуглеродной ткани в составе МЗП обеспечивает многовекторность рассеивания электрического тока, протекающего по переплетающимся углеродным жгутам в направлении основы и утка, что приводит к локализации зоны поражения.

Таким образом, введение в состав МЗП электропроводящих наночастиц обеспечивает увеличение проводимости матрицы – в результате плотность тока и удельное электросопротивление снижаются в 3–4 раза, что, в свою очередь, приводит к снижению размеров зоны повреждения, уменьшению ее площади, минимизации разрушений углеродных волокон и матрицы, исключает появление прогаров по толщине и повышает защиту основного материала конструкции.

Основными повреждениями для фрагментов прототипа конструкции панели крыла с МЗП марки ВКУ-52МЗ после воздействия молниевых разрядов стали: прогар, деструкция связующего, расщепление углеродных волокон в эпицентре зоны удара на площади диаметром не более 35 мм.

Исследования экспериментальных образцов с МЗП показали, что сохранение прочности при изгибе в эпицентре удара при воздействии тока с параметрами $I=200$ кА и $Q=20$ Кл при использовании молниезащитного покрытия марки ВКУ-52МЗ составляет >65% от исходной прочности образца.

Результаты по ресурсу прочности относительно фрагментов прототипа конструкции панели крыла из углепластика ВКУ-47И с МЗП марки ВКУ-52МЗ выявили, что воздействие молниевых разрядов с параметрами тока $I=200$ кА и $Q=20$ Кл приводит к незначительному снижению прочности и не влияет на свойства основного материала конструкции при его дальнейшей эксплуатации.

Покрытие марки ВКУ-52МЗ (две его модификации – ВКУ-52МЗ/230 и ВКУ-52МЗ/480) может быть рекомендовано для защиты ЛА от разрядов молнии с параметрами: сила тока 200 кА и переносимый заряд порядка 20 Кл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информац. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные полимерные угленаноккомпозиты – новое направление материаловедения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №12. С. 2–9.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
4. Сидорина А.И., Гуняева А.Г. Рынок углеродных волокон и композитов на их основе (обзор) // Химические волокна. 2016. №4. С.48–53.
5. Курносоев А.О., Мельников Д.А. Характеристики стеклопластиков на основе высокодеформативных расплавных связующих в условиях воздействия эксплуатационных факторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №11. С. 14–18.

6. 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.
7. Гуняева А.Г., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Черфас Л.В. Молниестойкие угленаноккомпозиты, модифицированные наночастицами, изготовленные способом инфузионного формования // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №10. С. 25–32.
8. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Молниестойкость современных полимерных композитов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 36–42.
9. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S.C. 277–286.
10. Гуняева А.Г., Черфас Л.В., Комарова О.А., Федотов М.Ю. Изыскание путей создания молниезащитного покрытия на основе углеродной ткани с металлическими включениями и возможности его применения в элементе конструкции крыла ЛА, выполненного из углепластика // Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций: сб. матер. молодеж. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 6.
11. Железняк В.Г., Чурсова Л.В. Модификация связующих и матриц на их основе с целью повышения вязкости разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 47–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-47-50.
12. 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: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2017).
13. Панель из полимерного композиционного материала с молниезащитным покрытием: пат. 2588552 Рос. Федерация; заявл. 03.06.15; опубл. 27.06.16, Бюл. №18. 10 с.
14. 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.
15. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 28-й Сессии по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. 3-е изд. с поправками 1–7. М.: Авиаиздат. 2014. С. 71–72.
16. Квалификационные требования КТ 160Д. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Раздел 23. Прямое воздействие молнии. Авиационный реестр межгосударственного авиационного комитета. Армак, 2004. 324 с.
17. Бухаров С.В., Гуняева А.Г., Раскутин А.Е. Исследования зоны поражения молниезащитного покрытия из углепластиков высоковольтными разрядами, имитирующими токи молнии // Научные труды (Вестник «МАТИ»). 2014. №22 (94). С. 4–14.
18. 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.
19. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль изделий из ПКМ и многослойных клееных конструкций ультразвуковыми методами отражения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1. С. 69–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-69-74.
20. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. Неразрушающий контроль углепластиков на наличие несплошностей с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3. С. 84–89. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-84-89.
21. Мельников Д.А., Громова А.А., Раскутин А.Е., Курносков А.О. Теоретический расчет и экспериментальное определение модуля упругости и прочности стеклопластика ВПС-53/120 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №1 (49). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-8-8.
22. Черфас Л.В., Гуняева А.Г., Комарова О.А., Антюфеева Н.В. Анализ срока годности наномодифицированного препрега при хранении по его реакционной способности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1 (37). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-12-12.