

УДК 629.7.063.6

Вишняков Л. Р.¹, Коханый В. А.¹, Чернявский И. И.², Коханая И. Н.¹, Ободеева И. Н.¹, Яременко О. П.¹¹ Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Украина, г. Киев² Государственное предприятие «АНТОНОВ». Украина, г. Киев

ВЛИЯНИЕ НАНОМОДИФИКАЦИИ И ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА ВЯЗАНО-ПАЯНЫМИ СЕТКАМИ НА МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТА

Рассмотрена система защиты конструкционных углепластиков от прямых ударов молнии путем поверхностной металлизации вязано-паяными проволочными сетками и введением углеродных наночастиц в объем ламинатов, образующих слоистый композит-углепластик. На основе результатов анализа мест поражения панелей имитированной молнией построена геометрическая модель композита и предложена методика расчета удельного электросопротивления слоистого полимерного композита, в котором обеспечивается диссипация энергии разряда молнии. [dx.doi.org/10.29010/081.4]

Ключевые слова: молниезащита; углепластик; удельное электросопротивление; слоистый композит; диссипация энергии; токоотвод; анизотропия.

Введение

В настоящее время стекло-углепластиковые конструкции благодаря своим высоким удельным физико-механическим характеристикам нашли широкое применение не только в ракетно-космической и авиационной технике, но и в ветроэнергетике. Однако, обладая низкой электропроводностью, эти материалы уязвимы к ударам молнии.

Принципы молниезащиты углепластиковых конструкций летательных аппаратов при прямом воздействии молнии, представлены в «Квалификационных требованиях КТ-160Д» [1]. Из перечисленных в них факторов, влияющих на углепластиковую конструкцию, основными разрушающими факторами являются – «омический» нагрев и повреждение «дуговым пятном».

Типичной форме разрядного тока молнии соответствуют следующие четыре фазы [1]:

– Компонента А (импульсный ток первоначального возвратного разряда). Характеризуется следующими значениями параметров: $I_{\max} = 200 \text{ кА} \pm 10\%$, интеграл действия тока $2 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \pm 20\%$, время $\tau \leq 500 \text{ мкс.}$;

– Компонента В (промежуточный ток). Ее характеристики: $I_{\max} = 200 \text{ кА} \pm 20$, количество электричества $Q = 10 \text{ Кл} \pm 10\%$, $\tau \leq 5 \text{ мс.}$;

– Компонента С (постоянный ток). Имеет следующие характеристики: $I_{\max} = 200\text{--}800 \text{ А}$, $Q = 200 \text{ Кл} \pm \pm 20\%$, $\tau \leq 0,25\text{--}1 \text{ с.}$;

– Компонента Д (импульсный ток повторного разряда) с характеристиками: $I_{\max} = 100 \text{ кА} \pm 10\%$, интеграл действия тока $0,25 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \pm 20\%$, $\tau \leq 500 \text{ мкс.}$

Для характеристики зон 1А и 2А полная продолжительность компоненты С не применяется, а используется средний ток 400 А на $45 \text{ мс} \pm 10\%$ для подачи $18 \text{ Кл} \pm 10\%$ электричества и обозначается компонентой С*.

При прямом ударе молнии в углепластиковую конструкцию большой импульсный ток приводит к значительному энерговыделению в объеме материала за счет Джоулевого тепла. Это, в свою очередь, вызывает деструкцию связующего и значительное газовыделение при давлении до 10^8 Па (10^3 атм), приводящее к расслоению и сквозному прожигу полимерного композиционного материала (ПКМ) [5].

Принцип ступенчатой молниезащиты углепластика основан на снижении поверхностного электросопротивления конструкции за счет наформовки в поверхностные слои различных металлических покрытий в процессе изготовления углепластика [2]: тканых или трикотажных сеток, растяжных фольг, напылением на поверхность различных металлических пленок, а также путем использования в поверхностных слоях высокопрочных электропроводных углеродных волокон (тканей), входящих в состав его упрочняющей конструкции.

Цель работы

Целью работы является рассмотреть основные принципы молниезащиты углепластиковых конструкций летательных аппаратов вязано-паяными сетками-молниеотводами и введением в объем ламинатов углеродных наночастиц, а также предложить методику расчета электросопротивления

зоны поражения током молнии вглубь углепластиковой панели и по поверхности в радиальном направлении.

Результаты исследований

В настоящей работе приводятся результаты исследования и особенности молниезащиты углепластиковых конструкций летательных аппаратов с помощью совместно разработанных ИПМ НАН Украины и ГП «Антонов» вязано-паяных сеток – молниеотводов из медных луженых микропроволок марок МЭУ 0,08 и МЭУ 0,12. Серийный выпуск этих молниеотводов освоен в НТЦ «Композиционные материалы» при ИПМ НАН Украины. Основные физико-механические свойства этих сеток представлены в табл. 1.

Существенной особенностью вязано-паяных медных сеток вместе с их высокой электропроводностью является то, что в результате теплового действия молнии припой расплавляется, а высокая подвижность петель молниеотводов приводит к диссипации энергии молнии, что в конечном итоге защищает углепластиковую конструкцию.

Сетки-молниеотводы МЭУ 0,08 и МЭУ 0,12 выполнены на трикотажном оборудовании из одной медной луженой микропроволоки диаметром, соответственно, 0,08 и 0,12 мм. Они специально разработаны для летательных аппаратов, где удельные массовые характеристики должны быть низкими.

Важной эксплуатационной характеристикой молниезащитных сеток является зависимость удельного поверхностного электросопротивления от поверхностной плотности (масса единицы площади сетеполотна), табл. 1. Именно эта зависимость определяет выбор конкретной сетки-молниеотвода для соответствующей зоны защиты планера самолета.

Подбор производится по результатам стендовых испытаний поражающего действия тока имитированной молнии на стандартную углепластиковую панель. Испытания проводятся на сертифицированном разрядном стенде в НИПКИ «Молния», г. Харьков [4].

Рассмотрим механизм молниезащиты на примере испытаний панели 1-1 (табл. 2), подвергнутой действию импульса имитированной молнии с компонентой А, параметры которой приведены в этой таблице. Панель имеет 9 слоев ламината из углеродной ткани Элур ПА, пропитанной эпоксидным связующим ЭДТ-69Н. На лицевой поверхности этой панели наформовано полотно из медной трикотажной сетки МЭУ 0,08, которое покрыто выравнивающей эпоксидной пленкой SynSkin. На поверхность панели также нанесено стандартное лакокрасочное покрытие.

При прямом ударе молнии в углепластиковую панель импульсный ток (I) распределяется в сквозном (I_v) и в радиальном направлении по поверхности панели (I_s), сумма которых по закону Кирхгофа равна общему току молнии I .

Таким же образом распределяются и корни квадратные интегралов действия общего тока молнии (\sqrt{F}), в сквозном ($\sqrt{F_v}$) и радиальном ($\sqrt{F_s}$) направлении, которые обратно пропорциональны сопротивлениям соответствующих участков испытуемой панели (R_v и R_s , соответственно).

Эти зависимости можно объединить в систему уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{F} = \sqrt{F_v} + \sqrt{F_s} \\ \frac{\sqrt{F_s}}{\sqrt{F_v}} = \frac{R_v}{R_s} \end{cases} \quad (1)$$

Решение этой системы уравнений позволяет определить интегралы действия тока молнии по сквозному направлению толщины (вглубь панели):

$$F_v = \frac{F}{\left(1 + \frac{R_v}{R_s}\right)^2} \quad (2)$$

и в радиальном направлении (по поверхности сетеполотна):

$$F_s = \frac{F}{\left(1 + \frac{R_s}{R_v}\right)^2} \quad (3)$$

Для проведения анализа поражающего действия молнии воспользуемся характеристиками углепластика, приведенными в табл. 3 [5].

Схема повреждения панели действием тока имитированной молнии для зоны поражения 1А и результаты испытаний углепластиковых панелей представлены на рис. 1 и в табл. 2.

Для определения интегралов действия тока молнии в сквозном и радиальном направлениях необходимо определить реальные сопротивления этих участков панелей.

Исходя из рис. 2, можно предположить, что объем деструкции панели в эпицентре прямого удара молнии по форме близка к усеченному конусу, который определяет реальное сопротивление углепластика вглубь панели в этом объеме.

Сопротивление усеченного конуса между его основаниями (рис. 2) может быть определено как сопротивление тела вращения с образующей:

$$y = ax + r_{\text{вн}}, \quad (4)$$

где

$$a = \text{tg}\alpha = \frac{r_{\text{н}} - r_{\text{вн}}}{\delta_{\text{к}}}, \quad (5)$$

Таблица 1

Механические и электрические свойства серийно выпускаемых медных сеток-молниевыводов треугольной структуры

Марка сеток	Структура сеток		Массо-геометрические свойства сеток		Механические свойства микропроволок		Механические свойства сеток				Удельное поверхностное электрическое сопротивление сеток, мОм		
	диаметр микропроволок	тип сеток	поверхностная плотность, г/м ²	толщина сетополотна, мм	разрывное усилие, Н	относительная деформация при разрыве, %	Прочностные свойства	Деформационные свойства	Вдоль сетополотна	поперек сетополотна	Вдоль сетополотна	поперек сетополотна	в разном направлении [6]
МЭУ-0,08	0,08	вязано-паяная	105 ⁺²⁰ ₋₅	0,15	1,25	22,4	разрывное усилие сетки шириной 50 мм, Н	относительная деформация сетки шириной 50 мм при разрыве, %	Вдоль сетополотна	поперек сетополотна	4,42	4,86	4,72
МЭУ-0,12	0,12	вязано-паяная	175 ⁺²⁰ ₋₅	0,23	3,2	12,5	разрывное усилие сетки шириной 50 мм, Н	относительная деформация сетки шириной 50 мм при разрыве, %	Вдоль сетополотна	поперек сетополотна	3,25	3,55	3,36

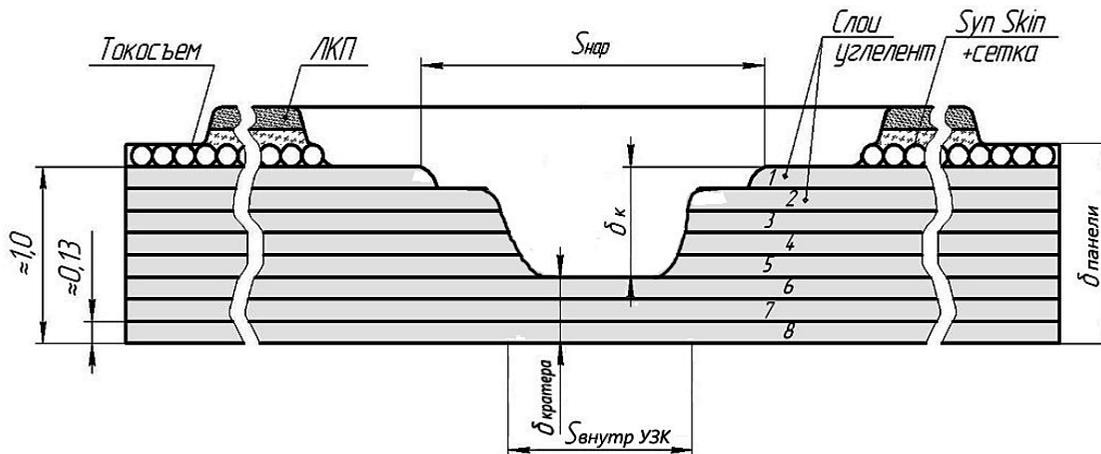
Таблица 2

Результаты испытаний углепластиковых панелей на молниестойкость

№ п.п.	Панель/Конструкция панели	Масса панели, г			Характеристика воздействующего тока			Площадь деструкции сетки по результатам рентгеновской дефектоскопии, см ²	Площадь деструкции по результатам ультрафиолетовой дефектоскопии (УЗК), см ²	Толщина, мм		
		до испытаний	после испытаний	потеря массы	Компонента А $I_{max} (kA) / \int_{деств.} \cdot 10^6 (A^2)$	Компонента В $I_{max} (kA) / I_{cp} (kA) / q (Kл)$	Компонента С $I_{cp} (kA) / q (Kл)$			Исходная	min в эпицентре поражения	глубина кратера
1	1-1/SynSkin МЭУ0,08 Элур ПА-9 слоёв	234,2	230,7	3,46	202/1,72	-	-	160	41	1,15	0,65	0,50
2	1-2/SynSkin МЭУ 0,08 Элур ПА-8 слоёв	250,5	245,9	4,63	216/1,95	7,4/2,5/12,7	0,345/12,3	368	50	1,18	0,4	0,78
3	3-1 /SynSkin МЭУ 0,08 Элур ПА-9 слоёв+ 1 об.%нанотрубок	251	246,7	4,3	216/1,95	7,4/2,5/1,27	0,43/17,9	410	20	1,13	0,6	0,53

Некоторые электрофизические характеристики углепластиковых панелей

Характеристика		Значение характеристик
Удельное электросопротивление, Ом·см	Однонаправленное волокно, ρ_0	$(1-2) \cdot 10^{-3}$
	волокна под углом 45° , ρ_{45}	$(2-4) \cdot 10^{-3}$
	поперечное сопротивление, ρ_1	10-100
Критическая энергия расслоения, $W_{кр1}$, Дж/см ³		$1,2 \cdot 10^3$
Критическая энергия разрушения, $W_{кр2}$, Дж/см ³		$2 \cdot 10^3$



$S_{нар}$ – зона разрушения внешних слоев КМ;
 $S_{внутр. УЗК}$ – зона дефекта КМ внутри, выявленная УЗК
 $\delta_{кратера}$ – минимальная толщина КМ в зоне поражения;
 $\delta_к$ – глубина кратера поражения слоев конструкционного материала.

Рис. 1. Схема повреждения материала панели при молниеразряде с типичным для зоны 1А разрушением

Сопротивление элементарного цилиндра толщиной dx , расположенного на расстоянии x от начала координат, будет равно:

$$dR_v = \frac{\rho_{dx}}{\pi(xtg\alpha + r_{вн})^2} \quad (6)$$

Отсюда:

$$R_v = \frac{\rho}{\pi} \int_0^{\delta_к} \frac{dx}{(xtg\alpha + r_{вн})^2} \quad (7)$$

Решение интеграла (7) может быть произведено путем замены переменной:

$$xtg\alpha + r_{вн} = u \quad (8)$$

$$du = tg\alpha \cdot dx \quad (9)$$

$$dx = \frac{du}{tg\alpha} \quad (10)$$

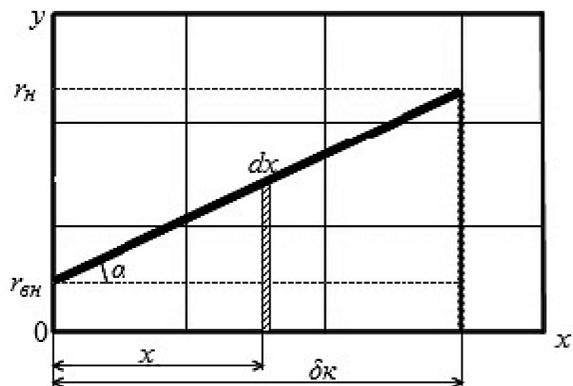


Рис. 2. График функции $y = ax + r_{вн}$, образующей тело вращения, где $r_{вн}$ и $r_н$ – внутренний и наружный радиусы оснований усеченного конуса, соответственно; α – угол между образующей со стороны меньшего основания и осью Ox ; $\delta_к$ – высота усеченного конуса (глубина кратера).

Подставив (8) и (10) в (7), получим:

$$R_v = \frac{\rho}{\pi t g \alpha} \int_0^{\delta_k} \frac{du}{u}, \quad (11)$$

$$R_v = -\frac{\rho}{\pi t g \alpha u} \Big|_0^{\delta_k}. \quad (12)$$

Произведя необходимые подстановки и математические преобразования, получим:

$$R_v = \frac{\rho \delta_k}{\pi r_n \cdot r_{вн}}. \quad (13)$$

Если $r_{вн}$ можно определить по данным ультразвукового контроля площади деструкции (табл. 2), то определить r_n не всегда представляется возможным, поэтому целесообразно его вычислить, используя данные потери массы (Δm), глубины кратера прожига (δ_k) и внутреннего радиуса деструкции панели ($r_{вн}$). Величина r_n имеет вид:

$$r_n = -\frac{r_{вн}}{2} + \sqrt{0,6 \frac{\Delta m}{\delta_k} - 0,75 r_{вн}^2}. \quad (14)$$

В работе [6] нами была рассмотрена методика расчета поверхностного электросопротивления сетеполотна в радиальном направлении. Используя эту методику, определим поверхностное электросопротивление (R_s) панели (сетки-молниеотвода)

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{r_{пан}}{r_{вн}}, \quad (15)$$

где: ρ_s – удельное поверхностное электросопротивление, соответственно, сеток МЭУ 0,08 или МЭУ 0,12 в радиальном направлении, Ом (табл. 1); $r_{пан}$ – радиус вписанной окружности в панель, см; $r_{вн}$ – внутренний радиус деструкции панели, см.

Используя выражения (13) и (15) определим электросопротивление панели 1-1 в сквозном и поверхностном направлении и по этим результатам получим интеграл действия тока молнии в сквозном направлении, пользуясь выражением (2). Все данные наших расчетов (эти и последующие) приведены в табл. 4. По данным интеграла действия молнии и сквозного электросопротивления углепластика было определено энерговыделение внутри углепластика, вызванное прямым попаданием имитированной молнии (импульсной компоненты А), по формуле:

$$W_A = F_v \cdot R_v \quad (16)$$

Такое, полученное в расчетах весьма малое энерговыделение (13,3 Дж – табл. 5) не может оставить заметных следов на панели и не является опасным. Отметим, что при расчете не было учтено, что компонента А тока молнии имеет импульсную составляющую, воздействующую на углепластик – сло-

истый анизотропный композит, содержащий электропроводные слои высокомодульных углеродных волокон (тканей), разделенных прослойками неэлектропроводного связующего (~30–35 об.%). При воздействии электрического поля тока молнии в связующем углепластика возникают диэлектрические потери за счет релаксационной поляризации, сопровождающейся большими тепловыми потерями при рассеивании энергии в диэлектрике [7].

Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используется угол диэлектрических потерь и тангенс этого угла.

Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз ϕ между током и напряжением в емкостной цепи.

Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению активной мощности P_a к реактивной P_c :

$$tg \delta = \frac{P_a}{P_c}. \quad (17)$$

Существуют параллельная и последовательная эквивалентные электрические схемы замещения диэлектрика с потерями.

Для параллельной схемы, когда неизменным является напряжение:

$$tg \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega C_p R_a}. \quad (18)$$

Для последовательной схемы при постоянстве тока:

$$tg \delta = \frac{U_a}{U_c} = \omega C_d R_a, \quad (19)$$

где C_p и C_d – емкость для параллельной и последовательной эквивалентных схем соответственно; ω – круговая частота; R_a – активные диэлектрические потери.

Для слоистых материалов, где сквозной ток молнии I_v является определяющим, целесообразно использовать последовательную эквивалентную схему замещения.

Из (19) следует:

$$R_a = \frac{tg \delta}{\omega \cdot c} = \frac{\delta_k tg \delta}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon s}, \quad (20)$$

где $tg \delta$ – для слоя углепластика из отвержденного связующего, равен 0,0071; δ_k – глубина кратера прожига панели; f – частота (Гц) для фронта импульса 50 мкс ($f = 1 \cdot 10^4$); ϵ_0 – электрическая постоянная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость 4–5; s – площадь дугового пятна – по данным [2] принимаем 300 см^2 .

Представленные в табл. 5 результаты расчетов показывают защитное действие сетки-молниеотвода МЭУ 0,08, способной отводить по поверхности углепластика практически всю энергию молнии, предохраняя тем самым углепластик от сквозного прожига.

Таблица 4

Результаты испытаний углепластиковых панелей на молниестойкость

№ панели	Сетка молниестойкой	Параметры кратера в панели			Связное «омическое» сопротивление панели, Ом	Поверхностное электросопротивление панели, Ом	Интервал действия тока имитированной молнии в сквозном направлении (компонента А), А ² сек	Активное сопротивление диэлектрических потерь в связующем, Ом	Энергозащиты, Дж					
		Глубина, мм	Объем, см ³	Потеря массы, г					При импульсном токе за счет диэлектрических потерь	При импульсном токе за счет «омического» сопротивления	А	В	С*	Общее
1	МЭУ 0,08	0,50	2,15	3,46	0,18	$1,19 \cdot 10^{-2}$	74	57	13,3	$4,2 \cdot 10^3$	-	-	-	$4,2 \cdot 10^3$
2	МЭУ 0,08	0,78	2,9	4,63	0,214	$1,11 \cdot 10^{-3}$	52	90	-	$4,7 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^3$	896	12,5	$12,5 \cdot 10^3$
3	МЭУ 0,08+1 об.% н.группок	0,53	2,65	4,3	0,12	$1,03 \cdot 10^{-3}$	141	-	17	-	$3,7 \cdot 10^3$	572	3,8	$3,8 \cdot 10^3$

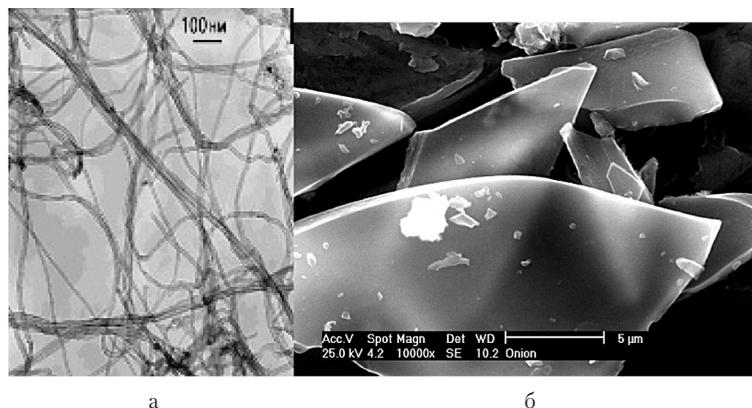


Рис. 3. Электронные изображения нанотрубок (а) и наночастиц из отходов карбонизированной древесины (б)

Был проведен расчет активных диэлектрических потерь и связанных с ними энергозатрат в углепластике при воздействии только импульсной компоненты А тока молнии (табл. 4), которые показывают, что они способны вызвать большие тепловые нагрузки, которые оказывают разрушающие воздействия: расслоение и разрушение слоев углепластика, деструкцию связующего.

Проведенные нами расчеты и экспериментальные исследования показали, что значительно снизить диэлектрические потери в связующем углепластика возможно, вводя в него электропроводные добавки. При этом повышение электропроводности связующего должно быть минимальным. Главное – это создать равномерную электропроводную структуру. Значительное увеличение электропроводности углепластиков сквозном направлении приведет к нарушению требуемого соотношения R_v и R_s . Это увеличит интеграл действия тока молнии в сквозном направлении.

В качестве электропроводных добавок нами использовались серийно выпускаемые углеродные нанотрубки по ТУ 26.8-30969031-01402007, а также разрабатываемые в ИПМ НАНУ наночастицы из древесных отходов (сосна, бамбук), электронные изображения которых представлены на рис. 3.

Особенностью углеродных наночастиц и нанотрубок является то, что они обладая высокой электропроводностью, имеют также большую удельную поверхность, обеспечивающую при малом объеме содержания устойчивую в полимерном связующем перколяционную проводимость.

При создании углепластиков с системой молниезащиты необходимо тщательно определять объемное содержание нанодобавок в углепластиковой матрице. При этом важной предпосылкой является условие, что интеграл действия тока молнии в сквозном направлении по толщине углепластика в выражении (2) не должен превышать значения $1 \cdot 10^3$:

$$F_v = \frac{F}{\left(1 + \frac{R_v}{R_s}\right)^2} \leq 1 \cdot 10^3. \quad (21)$$

Это вытекает из анализа результатов испытаний на поражающее действие имитированной молнией углепластиковых панелей. Проводя необходимые математические преобразования, получим выражение для минимально допустимого значения электросопротивления связующего в углепластике:

$$R_v \geq R_s \left(\sqrt{F \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \quad (22)$$

и отсюда, используя выражение (13), определим предельно допустимое удельное электросопротивление связующего в углепластике, содержащее нанодобавки ($\rho_{связ}$):

$$\rho_{связ} \geq \frac{\left(\sqrt{F \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \pi r_{н} r_{вн}}{\delta_k}. \quad (23)$$

Последующий расчет основан на материалах опубликованной нами работы [8]. В этой работе рассматриваются две методики определения удельного электросопротивления: «сухая» - в текстолитовой пресс-форме с помощью моста постоянного тока и «мокрая» - в электролитической ячейке с помощью моста Уинстона. В обоих случаях измеряется общее электросопротивление смеси проводника (углеродные наночастицы) с диэлектриком. В первом случае рассматривается пористый брикет углеродного материала, в порах которого находится воздух, во втором – суспензия неэлектропроводной жидкости (изопропиловый спирт) с углеродными наночастицами. «Мокрая» методика дает возможность определять удельное электросопротивление малой концентрации – всего 1-2 об.% наночастиц от объема суспензии. По этой методике нами были определены удельные электросопротивления угле-

родных нанотрубок и наночастиц, полученных из растительного сырья.

Расчет удельного электросопротивления наночастиц проводили по формуле:

$$\rho_{н.ч.} = \rho_{сусп.} \cdot \varphi(V_B) \quad (24)$$

где $\rho_{н.ч.}$ и $\rho_{сусп.}$ – удельные электросопротивления наночастиц и суспензии соответственно; $\varphi(V_B)$ – значение функции объемного содержания наночастиц, рассчитанное по методике В. В. Скорохода [3], график которой для нашего случая показан на рис. 4.

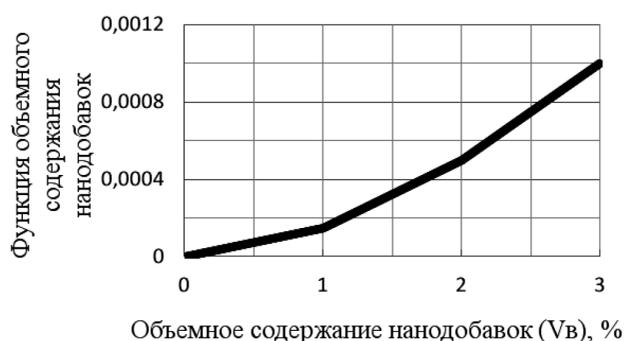


Рис. 4. График зависимости функции $\varphi(V_B)$ от объемного содержания наночастиц в суспензии

$$\varphi(V_B) = \frac{\rho_{н.ч.}}{\rho_{связ.}} \quad (25)$$

Функция предельно допустимого объемного содержания нанодобавок в связующем $\varphi(V_B)$ может быть определена, подставив выражение (23) в (25), с учетом (15):

$$\varphi(V_B) \leq \frac{2\rho_{н.ч.} \delta_k}{\rho_s \ln \frac{r_{нан.}}{r_{вн.}} (\sqrt{F \cdot 10^{-3}} - 1) r_n r_{вн.}} \quad (26)$$

Выражение (26) дает возможность определить предельно допустимое объемное содержание нанодобавок в связующем по графику, представленному на рис. 4.

Следует отметить, что введение нанодобавок в связующее требует равномерности их распределения поскольку, если в месте попадания молнии концентрация наночастиц будет повышенной, то будет существовать большая вероятность прожига панели в этом месте.

Выводы

1. Теоретически и экспериментально показана возможность применения вязано-паяных сеток МЭУ 0,08 и МЭУ 0,12 для молниезащиты углепластиковых конструкций, способных отводить значи-

Таблица 5

Некоторые электрофизические характеристики углепластиковых панелей

№ п/п	Объект измерения	Объемное содержание наночастиц в суспензии изопропилового спирта, об.%	Электросопротивление суспензии в электролитической ячейке, Ом	Удельное электросопротивление суспензии, Ом·см	Функция объемного содержания наночастиц	Удельное сопротивление наночастиц, Ом·см
1	Углеродные наночастицы из древесины бамбука	2	132,3	15,8	0,0005	$7,9 \cdot 10^{-3}$
2	Углеродные наночастицы из древесины сосны	2	$687 \cdot 10^3$	$8,2 \cdot 10^3$	0,0005	4,1
3	Углеродные нанотрубки	2	435,5	52,0	0,0005	$2,6 \cdot 10^{-2}$

Полученные значения электросопротивления наночастиц представлены в табл. 5.

Взятый из [7] методический подход для расчета предельно допустимой объемной концентрации наночастиц в суспензии предполагает, что и неэлектропроводное связующее, содержащее электропроводные нанодобавки может подчиняться аналогичной (24) зависимости, поэтому:

тельную часть заряда молнии по поверхности углепластика, предохраняя его от сквозного прожига. Углепластик, защищенный сеткой МЭУ 0,12, имеющей повышенную электропроводность, необходимо размещать в более ответственных местах элементов конструкции.

2. Отмечены диссипативные свойства вязано-паяных сеток – при распайке в узлах увеличивает-

ся подвижность проволок, тормозящая процессы расслоения и разрушения углепластика.

3. Показано, что при импульсном токе молнии существенное влияние на анизотропную структуру углепластика оказывают диэлектрические потери в связующем углепластика, приводящие к большому энерговыделению при его поляризации и, как следствие, к разрушению и деструкции углепластика в очаге прямого удара молнии.

4. Для создания электропроводной структуры в связующем углепластика, предложено использование углеродных наночастиц в количествах 1-2 об.% (не более). При равномерном распределении нанодобавок уменьшаются диэлектрические свойства связующего, что приводит к увеличению диссипации энергии разряда молнии в направлении толщины углепластика.

Литература

- [1] Квалификационные требования КТ-160Д. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – Армак. 2004.
- [2] Острик А.В., Филипенко А.А. Молниезащита углепластиковых элементов конструкций самолёта при тепловом и механическом действиях прямого удара

молнии // Конструкция из композиционных материалов. – 2010. – №1. – С. 34-44.

- [3] Скороход В.В. – Инж.-физ. ж., т.2, №8, С.51-58.
- [4] Вишняков Л.Р., Недзельский О.К., Гринь Ю.Ф., Чернявский И.И., Василенков Ю.М. Разрядные испытания имитированной током молнии композиционных материалов с молниезащитой на основе медных вязаных сеток // Вісник інженерної академії України. – 2009. – № 3-4. – С. 187-192.
- [5] Авруцкий В.А., Бизяев А.С., Гуцин И.А. Разрушение изделий из углепластика под действием токов молнии // Электричество. – 1993. – №2. – С. 28-33.
- [6] Вишняков Л.Р., Коханый В.А., Чернявский И.И. Расчёт и измерение электросопротивления анизотропных сетчатых молниеотводов для листовых конструкций из углепластиков // Технологические системы. – 2016. – № 4. – С. 17-19.
- [7] Новикова С.Ю. Физика диэлектриков. – Москва. – 2007 // Электронное издание www.cte.mpei.ru/pubs/phd/phd.pdf
- [8] Вишняков Л.Р., Коханый В.А., Чернявский И.И. Об измерении удельной электропроводности нанодисперсных дисперсных углеродных порошков // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». – 2015. – С. 23-27.

Vishnyakov L. R.¹, Kokhanyy V. A.¹, Chernyavsky I. I.², Kokhana I. N.¹, Obodeeva I. N.¹, Yaremenko O. P.¹

¹ Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

² ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kiev

INFLUENCE OF NANOMODIFICATION AND SURFACE REINFORCEMENT OF CARBON PLASTICS BY KNITTED-SOLDERED NETS ON LIGHTNING RESISTANCE OF THE COMPOSITE

The protection system of constructional carbon plastics from direct contact of a lightning by means of surface metallization of knitted-soldered wire net and by addition of nanoparticles carbon in volume of the laminates forming layered composite - plastic was considered. The geometrical model of a composite is constructed on the basis of the analysis results of places of defeat of panels by a simulated lightning. The technique of calculation of a specific electrical resistance of a layered polymer composite in which energy dissipation of the category of a lightning category was proposed. [dx.doi.org/10.29010/081.4]

Keywords: lightning protection; carbon plastic; specific electrical resistance; layered composite; dissipation of energy; current lead; anisotropy.

References

- [1] Qualification requirements KT-160Д. Operating and environmental conditions for on-board aircraft equipment. Requirements, norms and test methods. – Armaк. 2004.

- [2] Ostrik A.V., Filipenko A.A. Lightning protection of carbon-plastic elements of airplane structures during thermal and mechanical actions of direct lightning strike. - Construction of composite materials. – 2010. – No.1 – P. 34-44.
- [3] Skorokhod V.V. – Ing.-fiz., т. 2, № 8, С. 51-58.
- [4] Vishnyakov L.R., Nedzelsky O.K., Grin Y.F., Chernyavsky I.I., Vasilenkov Y.M. Discharge tests of lightning-imitated composite materials with lightning protection based on copper knitted nets// Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine.– 2009.– № 3-4.– P. 187-192.
- [5] Avrutsky V.A., Bizyaev A.S., Gushchin I.A. Destruction of products from carbon fiber reinforced plastic under the action of lightning currents // Electricity. – 1993.– №2. – P. 28-33.
- [6] Vishnyakov L.R., Kokhany V.A., Chernyavsky I.I. Calculation and measurement of the electrical resistivity of anisotropic mesh lightning arresters for sheet constructions made of carbon plastic // Technological systems. – 2016.– № 4. – P. 17-19.
- [7] Novikova Yu. P. Physics of dielectrics. – Moscow. – 2007 // Electronic publishing www.cte.mpei.ru/pubs/phd/phd.pdf
- [8] Vishnyakov L.R., Kokhany V.A., Chernyavsky I.I. On the measurement of the specific electrical conductivity of nanodispersed disperse carbon powders // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern methods and technologies for the creation and processing of materials." – 2015. – P. 23-27.