

УДК 621.3.027.3:621.315.56

ББК 324:Л252

И.А. ГУЩИН

ДИНАМИКА ПОСЛОЙНОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА ТОКАМИ МОЛНИИ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Ключевые слова: воздействие молнии, проводящий композиционный материал, разрушение углепластика, молниестойкость.

На основании двух моделей растекания токов молнии по углепластику определены критерии разрушения материала. Одна из моделей – модель анизотропно-проводящей среды из уравнения Лапласа с заданными граничными условиями Неймана – позволяет получить точное решение в виде функций Бесселя для продольных и поперечных плотностей тока и рассмотреть зоны разрушения материала по радиусу и глубине. Модель адекватно описывает эксперимент с различным расположением электродов, имитирующих прохождение токов молнии по конструкциям из проводящего композита и металла. Вторая – модель слоистой структуры композита – построена с помощью схемы замещения углепластика и позволяет найти численным методом распределение токов. Результаты расчетов по обеим моделям хорошо согласуются между собой. Анализ динамики деструкции углепластика выявил критерии разрушения с параметрами реального углепластика и данными эксперимента, которые не противоречат параметрам разрушения углепластиков, полученным в зарубежных экспериментальных исследованиях. Эти критерии позволяют установить зависимость значения интеграла действия тока от количества слоев композитного материала. Были учтены варианты с малым количеством слоев и большим, когда возможен критерий сквозного пробоя. Сравнение расчетных и экспериментальных данных разрушения показало хорошее соответствие кривых. Полученные критерии позволяют прогнозировать последствия воздействия молнии при различных параметрах материала и предпринимать меры по повышению молниестойкости изделий из углепластика на стадии проектирования летательного аппарата.

Интерес к изучению процессов разрушения проводящих композиционных материалов типа углепластика токами молнии актуален из-за уникальных прочностных и электропроводящих свойств этих материалов [2]. Доля использования их в энергоемких производствах, особенно в авиастроении, постоянно растет, увеличивается также количество случаев поражаемости композитов токами молнии по сравнению с аналогом при использовании металлических летательных конструкций [3–5]. Проблема повышения молниестойкости конструкций невозможна без теоретического исследования растекания токов молнии по углепластику и его разрушения, которое должно подтверждаться ответственными и зарубежными экспериментальными исследованиями.

Целью настоящей статьи является нахождение принципов и критериев разрушения графито-эпоксидных материалов типа углепластиков под действием токов молнии на основании ранее предложенных моделей растекания токов и сравнения их с экспериментом.

Известные модели растекания токов [1] – модели сплошной и слоистой структуры – позволяют решить задачу распределения токов по слоям, найти параметры разрушения и прогнозировать последствия воздействия молнии на

стадии разработки перспективных аэроконструкций различного назначения. Полученные выражения для распределения токов дают возможность найти продольные и поперечные удельные сопротивления, которые возможно проверить экспериментом.

Для имитации протекания токов молнии по реальной обшивке в эксперименте специально были изготовлены образцы из углепластика с использованием металлической фольги на концах с целью устранения контактов между слоями материала. Модель позволяла найти продольное сопротивление композиционного материала. Для определения поперечного сопротивления на торцах образцов между слоями помещалась диэлектрическая пленка, исключая протекания тока. При различных расположениях электродов имитировались продольное и поперечное прохождение тока молнии по обшивке из углепластика и стекание тока на корпус летательного аппарата с металлическими конструкционными элементами. Результаты расчетов согласовались с экспериментом с погрешностью, не превышающей 15%.

Так, например, в модели сплошной электропроводящей анизотропной среды для практических расчетов была найдена эквивалентная глубина разрушения z_3 из равенства энергии выделения в слое толщиной z_3 при максимальной плотности тока в верхнем слое $W(1)$ и суммарной энергии выделения во всех слоях $W(i)$

$$W(1)z_3 = \sum_{i=1}^n W(i)d,$$

где $W(1) = \frac{A(j_r^2(1)\rho_r + j_z^2(1)\rho_z)}{2}$; $W(i) = \frac{A(j_r^2(i)\rho_r + j_z^2(i)\rho_z)}{2}$ (A – интеграл действия тока; d – толщина слоя; j_r и j_z – поперечная и продольная плотности тока, соответственно).

В этом случае относительная глубина энергосвечения

$$\frac{z_3}{d} = \sum_{i=1}^n \frac{j_r^2(i)\rho_r + j_z^2(i)\rho_z}{j_r^2(1)\rho_r + j_z^2(1)\rho_z}.$$

При $r = r_{\text{кан}}$ и $\rho_z / \rho_r \gg 10^4$ относительная глубина энергосвечения z_3 / d стремится к 1.

На рис. 1 показаны результаты расчетов z_3 / d от радиуса r при различных отношениях поперечного и продольного удельных сопротивлений ρ_z / ρ_r .

Анализ численных расчетов функции $z_3(\rho_z / \rho_r)$, $z_3(r/r_{\text{кан}})$ и $z_3(\rho_z / \rho_r)$ при различных параметрах позволил найти аппроксимирующую функцию

$$z_3 / d = \frac{a_1 \cdot r/r_{\text{кан}} + b_1}{\lg(\rho_z / \rho_r + b_3)} (a_2 n_{\text{сл}} + b_2) a_3,$$

где $a_1 = 1,05$; $b_1 = 0,13$; $a_2 = 0,07$; $b_2 = 0,5$; $a_3 = 1,42$; $b_3 = -2,89$, при изменении $1 \leq r/r_{\text{кан}} \leq 3$, $4 \leq n_{\text{сл}} \leq 10$, $10^3 \leq \rho_z / \rho_r \leq 10^4$

$$z_3(r/r_{\text{кан}}) = \frac{d(r/r_{\text{кан}} + 1)}{2},$$

при $\rho_z / \rho_r = 10^4$ и изменении $r/r_{\text{кан}}$ в пределах $1 \leq r/r_{\text{кан}} \leq 3$

$$z_3(\rho_z / \rho_r) = \frac{ad}{\lg(\rho_z / \rho_r) + b},$$

где $a = 3,75$; $b_3 = -0,5$ при $r = r_{\text{кан}}$.

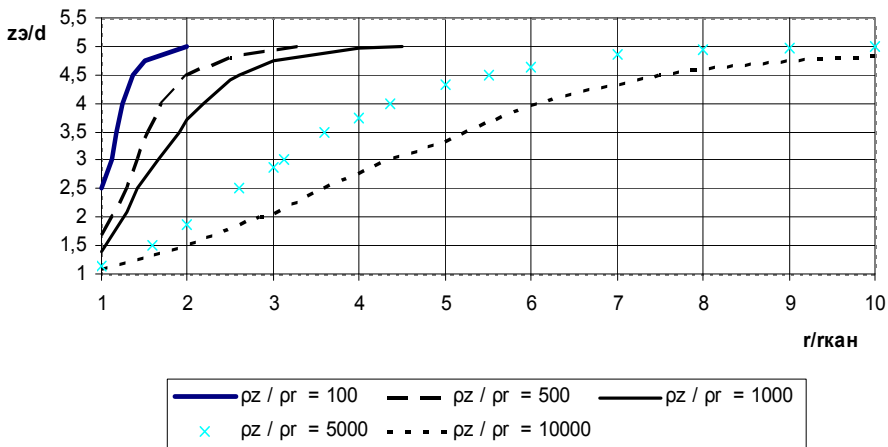


Рис. 1. Распределение по радиусу $r/r_{\text{кан}}$ относительной глубины энерговыведения z_3/d при различных отношениях ρ_z/ρ_r

Для относительного радиуса (плотность тока выравнивается по слоям, при $z_3 = n_{\text{сл}} d$) найдены зависимости, имеющие практическую значимость:

$$\frac{r_{\text{эКВ}}}{r_{\text{кан}}} = n_{\text{сл}} - 1, \text{ при } \rho_z/\rho_r = 10^3; \frac{r_{\text{эКВ}}}{r_{\text{кан}}} = 2n_{\text{сл}} + 2 \text{ при } \rho_z/\rho_r = 10^3.$$

Сильная анизотропия композиционного материала при $\rho_z/\rho_r \gg 10^4$ приводит к тому, что вблизи канала разряда происходит максимальное выделение энергии только в первом слое и начинается послойное разрушение материала во времени.

Таким образом, альтернативный подход к углепластику как анизотропно электропроводящему материалу позволяет оценить радиус и глубину разрушения и прогнозировать воздействия молнии на различных этапах исследования поражения летательного аппарата.

Для рассмотрения динамики послойного разрушения удобно использовать модель слоистой структуры углепластика, основанную на схеме замещения, адекватно приближенную к реальному материалу. Результаты расчета по двум моделям прекрасно согласуются с экспериментом.

В данной работе проведено сравнение полученных результатов с результатами известных зарубежных источников [6]. Особенность согласования результатов анализа процессов разрушения углепластика с этими данными состояла в соответствии критериев, которые были приняты в эксперименте и которые необходимо взять за основу при расчетах. В работе [1] была найдена зависимость

$$A = \frac{N_p(N_p + 1) (\pi r_{\text{кан}} z_3)^2 W_{\text{кр}2}}{\rho_m}, \tag{1}$$

где A – интеграл действия; $N_p = z_p/z_3$ – число эквивалентных толщин z_3 , уместающихся на общей толщине материала z_p ; $r_{\text{кан}}$ – радиус канала молнии; ρ_m – удельное сопротивление углепластика в максимуме тока I_m ; $W_{\text{кр}2}$ – критическая энергия разрушения слоя.

Выражение (1) соответствует условию сквозного разрушения материала, а данные [6] определяют границы разрушения по внешним признакам – мак-

симальному радиусу разрушенной зоны и наличию сквозного разрушения. Поэтому для этих сравнений необходимо нахождение зависимости интеграла действия от количества слоев углепластика, которая соответствует определенному радиусу разрушенной зоны. В эксперименте зависимость, построенная для случая сильной степени разрушения, соответствует радиусу разрушенной зоны $r_p = 5$ см. Это учитывалось при расчетах. Кроме того, при малых толщинах материала $n_{сл} < r_p^2 W_{кр1} / (r_{кан}^2 W_{кр2})$ расчет ведется из условия, что материал подвергается сквозному разрушению и для этого требуется только часть энергии, выделяющейся при протекании тока молнии. Часть энергии выделяется в верхнем слое за время сквозного разрушения. Плотность энергии, выделяющейся в верхнем слое на любом радиусе r за это время:

$$W_1 = \frac{n W_{кр2} r_{кан}^2}{r^2},$$

где W_1 , $W_{кр2}$ – энергосодержание в первом слое и критическая энергия разрушения слоя, соответственно; $r_{кан}$ и r – радиус канала молнии и радиус растекания соответственно; n – число слоев.

После сквозного разрушения ток растекается по всем слоям материала и плотность энергии на радиусе r определяется выражением

$$W_2 = \frac{A \rho_m \exp\left(-\frac{t_n}{\tau}\right)}{2(\pi r d)^2},$$

где t_n – время до сквозного разрушения; d – толщина слоя.

Общая плотность энергии, выделяющейся в верхнем слое на любом радиусе r , равна $W_p = W_1 + W_2$. Приравняв ее удельной энергии расслоения $W_{кр1}$, легко найти искомую зависимость для интеграла действия:

$$A = \frac{2(\pi r_p d)^2 (n W_{кр1}) \left[1 - W_{кр2} \frac{r_{кан}^2 (n_{сл} - 1)}{2 W_{кр1} r_p^2}\right]}{\rho_m}. \quad (2)$$

Эта формула пригодна для небольшого количества слоев углепластика при $n_{сл} < 15$. Для $n_{сл} \geq 15$ применим критерий сквозного разрушения (1).

На рис. 2 на одной координатной сетке представлены расчетные данные по выражениям (1) и (2) и данные результатов экспериментов [6].

При вычислениях учитывались следующие параметры (таблица).

Параметры разрушения углепластиков

$r_{кан}$, см	d , см	$W_{кр1}$, Дж/см ³	$W_{кр2}$, Дж/см ³	r_p , см
1	0,01	1200	2000	5

Для расчета нижней границы сильных разрушений использовали условие: более половины толщины материала получают разрушения при импульсах токов молнии.

Для прогнозирования возможной области разрушений при воздействии молнии пользуются соотношениями для радиуса и глубины разрушения:

$$r_p = r_{кан} \sqrt{\frac{n_p W_{кр2}}{W_{кр1}}}, \quad z_p = n_p d = \pi r_{кан} \sqrt{\frac{A \rho_m}{W_{кр2}}}.$$

Эти выражения позволяют проводить оценочные расчеты с приемлемой погрешностью до начала эксперимента и показывают хорошие результаты.

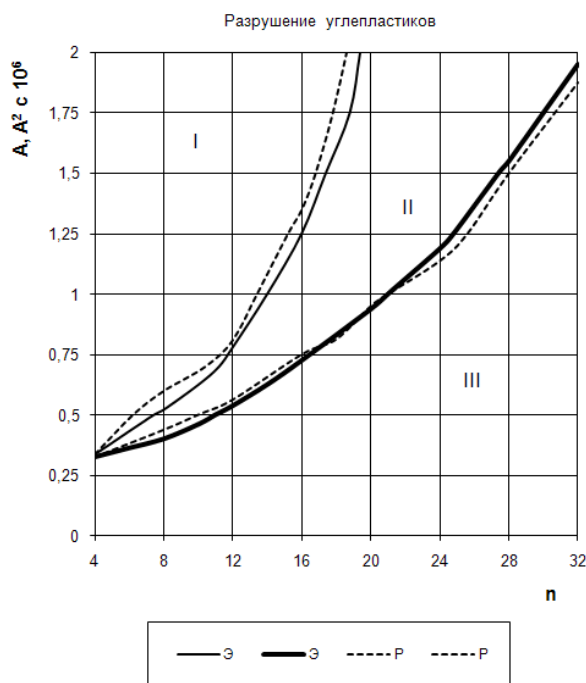


Рис. 2. Разрушение графито-эпоксидных композиционных материалов типа углепластиков:
 I – сквозное разрушение и большие по площади деструкции;
 II – повреждения в пределах 10 см; III – разрушения наружных слоев.
 Сплошная линия – эксперимент [6]. Штрих-пунктирная – расчет по формуле (1) и (2)

Таким образом, изучение электропроводящих свойств углепластиков и поведения материалов под действием токов молнии в нашей стране и за рубежом дало возможность не только провести всесторонний анализ их разрушения и соответствующие эксперименты по определению удельных сопротивлений при радиальном и поперечном протекании токов по конструкциям, но и построить теоретические модели для описания процессов разрушения в динамике.

Эти модели сплошной анизотропно проводящей среды и слоистой структуры позволяют проводить анализ растекания токов по композиционному материалу и давать оценку радиуса и глубины его разрушений токами молнии. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом, показывающим зависимость числа разрушенных слоев углепластика от введенной в материал энергии. Критерии разрушения, полученные в результате теоретического анализа динамики разрушения, подтверждают применимость указанных моделей для прогнозирования деструкции слоистых графито-эпоксидных материалов, используемых в летательных аппаратах нового поколения, до проведения высокотратных экспериментов и служат основой повышения стойкости и разработки принципов их защиты от воздействия молнии.

Различные обоснованные способы и принципы молниезащиты для проводящих композиционных материалов будут рассмотрены в следующих работах.

Литература

1. Гуцин И.А. Анализ динамики послойного разрушения углепластика токами молнии // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 63–68.
2. Avrootskij V., Bizyaev A., Guschin I., Prokhorov E., Sergievskaya I., Sobolevskaya E. Lightning Protection of carbon fiber composites. Proc. of 21st Int. Conf. on Lightning Protection, Berlin, Sept. 21-25, 1992, pp. 271–273.
3. Jinru S., Xueling Y., Xiangyu T., Jingliang C. & Yi Wu. Damage Characteristics of CFRP Laminates Subjected to Multiple Lightning Current Strike. *Applied Composite Materials*, 2019, vol. 26, pp. 745–762.
4. Li S., Yin J., Yao X., Chang F., Shi X. Damage analysis for carbon fiber/epoxy composite exposed to simulated lightning current. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2016, vol. 35, pp. 1201–1213.
5. Mazur V. Lightning threat to aircraft: do we know all we need to know? *J. Aircr.*, 2015, vol. 30, pp. 156–159.
6. Plumer J., Robb J. The direct effects of lightning on aircraft. *IEEE Trans. On Electromagn. Compat.*, 1982, vol. 24, no. 2, pp. 158–172.

ГУЦИН ИГОРЬ АРДАЛЬЕВОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elpardon@gmail.com).

Igor A. GUSCHIN

DYNAMICS OF LAYER-BY-LAYER DESTRUCTION OF CARBON PLASTIC BY LIGHTNING CURRENTS: THEORY AND EXPERIMENT

Key words: *impact of lightning, conductive composite material, destruction of carbon plastic, lightning resistance.*

On the basis of two models of lightning currents spreading on carbon plastic, the criteria of material destruction are determined. One of the models – the anisotropic conductive medium model from the Laplace equation with specified Neumann boundary conditions – makes it possible to obtain an exact solution in the form of Bessel functions for longitudinal and transverse current densities and to consider the material destruction zones by the radius and the depth. The model adequately describes the experiment with different arrangement of electrodes simulating the passage of lightning currents on constructions made of conductive composite and metal. The second – the model of composite layered structure – is constructed using the diagram of carbon plastic substitution and makes it possible to find the distribution of currents by a numerical method. The results of the calculations for both models are well consistent. The dynamics analysis of carbon plastic destruction revealed the criteria of destruction with parameters of real carbon plastic and experiment data that do not contradict the parameters of carbon plastic destruction obtained in foreign experimental studies. These criteria allow to determine the dependence between the value of the current integral and the number of layers of the composite material. Options with a small number of layers and with a large one when the reach-through breakdown criterion is possible were taken into account. Comparison of calculated and experimental destruction data showed good curve matching. The obtained criteria make it possible to predict the effects of lightning exposure under different material parameters and to take measures to improve the lightning resistance of carbon plastic products at the stage of aircraft design.

References

1. Gushchin I.A. *Analiz dinamiki posloinogo razrusheniya ugleplastika tokami molnii* [Analysis of the dynamics of layer-by-layer destruction of CFRP by lightning currents]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 63–68.
2. Avrootskij V., Bizyaev A., Guschin I., Prokhorov E., Sergievskaya I., Sobolevskaya E. Lightning Protection of carbon fiber composites. Proc. of 21st Int. Conf. on Lightning Protection, Berlin, Sept. 21-25, 1992, pp. 271–273.
3. Jinru S., Xueling Y., Xiangyu T., Jingliang C. & Yi Wu. Damage Characteristics of CFRP Laminates Subjected to Multiple Lightning Current Strike. *Applied Composite Materials*, 2019, vol. 26, pp. 745–762.
4. Li S., Yin J., Yao X., Chang F., Shi X. Damage analysis for carbon fiber/epoxy composite exposed to simulated lightning current. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2016, vol. 35, pp. 1201–1213.
5. Mazur V. Lightning threat to aircraft: do we know all we need to know? *J. Aircr.*, 2015, vol. 30, pp. 156–159.
6. Plumer J., Robb J. The direct effects of lightning on aircraft. *IEEE Trans. On Electromagn. Compat.*, 1982, vol. 24, no. 2, pp. 158–172.

IGOR A. GUSCHIN – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elpardon@gmail.com).

Формат цитирования: Гушчин И.А. Динамика послойного разрушения углепластика токами молнии: теория и эксперимент // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 67–73. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-67-73.