

УДК 621.3.027.3:621.315.56

ББК 324:Л252

И.А. ГУЩИН

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МОЛНИЕЗАЩИЩЕННОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВ

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

На основании ранее проведенного аналитического исследования разрушения проводящих композитов токами молнии рассмотрены способы повышения их молниестойкости. Для обоснования этих способов проведен анализ распределения токов при различных отношениях поперечного и продольного удельных сопротивлений. Один из способов с использованием проводящих добавок в составе связующего материала позволяет влиять на анизотропию проводящей среды углепластика. Предложены параметры диапазона степени анизотропии углепластика для достижения равномерного растекания тока и уменьшения радиуса разрушения композита токами молнии. Получена формула для радиуса разрушения при отсутствии анизотропии и проведены оценочные расчеты. Рассмотрен способ армирования углепластика тонкими проволочками для повышения его молниестойкости. Найдены расчетные выражения для оценки массы, количества проволочек на единицу площади и условия отсутствия перегрева. Проведены сравнения весовых характеристик для различных армирующих материалов и сделан вывод по их эффективности. Рассмотрены достоинства и недостатки этого способа защиты. Третий способ повышения молниестойкости композита предлагает в качестве защитного покрытия использовать материал углепластика с тканой структурой. Эта защита уменьшает энерговыделение в материале и размеры разрушений. Сделан вывод о необходимости контроля параметров молниезащиты и выбора покрытия с требуемыми характеристиками. Принципы и критерии молниезащиты для реальных углепластиков будут рассмотрены в последующих работах.

Известно, что конструкции из проводящих композиционных материалов типа углепластика сильно разрушаются токами молнии по сравнению с их металлическими аналогами [4–7]. Доля использования этих материалов в авиационной промышленности постоянно увеличивается, что приводит к снижению безопасности полетов в условиях грозовой деятельности. Поэтому изучение способов повышения молниестойкости проводящих композитов и разработка перспективной молниезащиты летательного аппарата остаются актуальной задачей при проектировании новейших типов авиационной техники. Решение данной проблемы основывается на предварительном изучении электропроводящих характеристик углепластиков при протекании токов молнии, анализе распределения этих токов по слоям в динамике и создания принципов и критериев разрушения [1–3]. На этом этапе были рассмотрены две модели разрушения, позволяющие оценить степень деструкции композита и дающие полное согласие с экспериментальными отечественными и зарубежными исследованиями.

Целью настоящей работы является исследование путей повышения молниестойкости углепластиков на основе ранее проведенного аналитического исследования разрушения проводящих композитов токами молнии.

Несмотря на уникальные прочностные характеристики графито-эпоксидных материалов, электропроводящие свойства их сильно анизотропны в поперечном и продольном направлениях протекания тока. Например, отношение удельных сопротивлений в указанных направлениях может достигать 10^5 . Следовательно, снижение степени анизотропии является одним из эффективных путей повышения молниестойкости проводящего композиционного материала. На рис. 1 и 2 представлены результаты распределения радиальных токов молнии по радиусу и глубине.

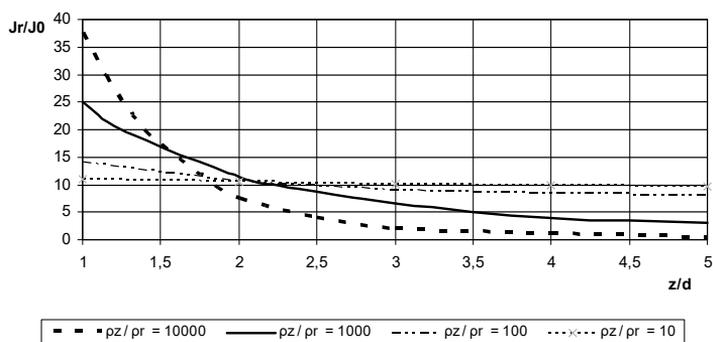


Рис. 1. Распределение j_r/j_0 по глубине z/d для $r = r_{\text{кан}}$ при различных отношениях ρ_z/ρ_r

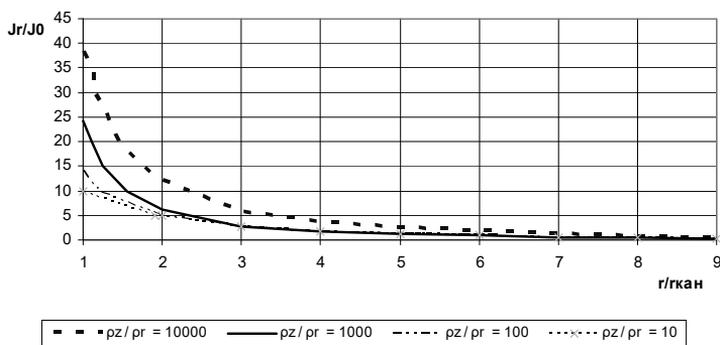


Рис. 2. Распределение j_r/j_0 по радиусу $r/r_{\text{кан}}$ в верхнем слое при различных отношениях ρ_z/ρ_r

Из анализа зависимостей следует, что выравнивание токов по слоям достигается в диапазоне значений $\rho_z/\rho_r = 10 \dots 100$. В наилучшем случае при отсутствии анизотропии ($\rho_z/\rho_r = 1$) деструкция углепластика толщиной h происходит на радиусе

$$r_p = \frac{1}{(2\pi h)} \sqrt{\frac{\rho A}{W_p}},$$

где $A = I_m Q/2$ – интеграл действия при экспоненциальной форме импульса тока; ρ и W_p – удельное сопротивление и удельная энергия разрушения углепластика, соответственно.

Пример вычисления радиуса разрушения углепластика по этой формуле при исходных данных приведен в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для вычисления радиуса разрушения углепластика

$A, \text{А}\cdot\text{Кл}$	$h, \text{см}$	$\rho_z, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$W_p, \text{Дж}/\text{см}^3$	ρ_z / ρ_r	$r_p, \text{см}$
$4 \cdot 10^5$	0,20	$2 \cdot 10^{-3}$	1200	1	0,7

Если радиус канала тока молнии больше 0,7 см, разрушения не последует. Сильная анизотропия ($\rho_z / \rho_r = 10^4$) по критерию разрушения [2] приводит к радиусу разрушения в 7 раз больше и составляет 5 см в отличие от изотропного материала.

Достигнуть степени анизотропии $\rho_z / \rho_r = 10 \dots 100$ могут помочь проводящие добавки в составе связующего в углепластике. Для повышения молниестойкости композита предлагается армировать композитный материал металлическими проводниками, расположенными в узлах сетки проводящего композиционного материала (рис. 3).



Рис. 3. Армирование ПК

Этот вариант позволяет значительно уменьшить поперечное удельное сопротивление ρ_z и степень анизотропии проводящего композита до значений $\rho_z / \rho_r = 1 \dots 10$. Для увеличения эффективности такого способа молниезащиты в работе [3] были учтены следующие условия:

- достижение среднего удельного сопротивления $2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см возможно при выполнении $S_n = (\rho_n / \rho_y) \cdot S_y$, где ρ_n и ρ_y – продольные удельные сопротивления провода и углепластика; S_n и S_y – площади пластины углепластика и армируемые проводом, соответственно;
- на каждом квадратном сантиметре должно быть определенное число армирующих проволочек;
- пропускание тока молнии проводниками по всей толщине материала без разрушения;

– отсутствие перегрева провода при пропускании импульсного тока с сечением $S_{\text{п}} \geq \sqrt{\rho_n A / (T_{\text{доп}} \cdot C \cdot \gamma)}$, где C и γ – теплоемкость и удельная масса провода; $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура.

Из этих условий было найдено выражения для числа проволочек на единице площади и массы армирующего провода на единице площади углепластика:

$$n_{\text{п}} = 4 S_{\text{п}} / (\pi r_{\text{кан}}^2) (\pi d_{\text{п}}^2) P_{\text{п}} = h \sqrt{\rho_n A \gamma / (T_{\text{доп}} \cdot C)}$$

Сравнение эффективности различных материалов показано в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для сравнения эффективности материалов

Материал	A , $A^2 \cdot c$	$r_{\text{кан}}$, см	$T_{\text{доп}}$, К	$d_{\text{п}}$, диаметр, мм	n , $1/\text{см}^2$	$P_{\text{п}}$, г/м ²	ΔP , увеличение веса ПК, %
Cu	10^6	1	400	0,5	4,2	66	5
Al	10^6	1	400	0,5	91	48	3

Из табл. 2 следует, что данные материалы, используемые при армировании, показывают хорошие весовые характеристики.

Наряду с достоинствами предложенного способа молниезащиты существуют и недостатки. Во-первых, это уменьшение механической прочности материала за счет плотного его армирования проводником. Во-вторых, это трудности нанесения лакокрасочных покрытий на изделия при изготовлении летательного аппарата на заключительном этапе. Этот способ пригоден для малых по площади конструкций по сравнению с общей площадью воздушного судна.

Для сохранения целостности проводящего композиционного материала предлагается использовать другие виды повышения молниестойкости композитов. Одним из таких способов является применение углепластиков с тканой структурой (рис. 4).

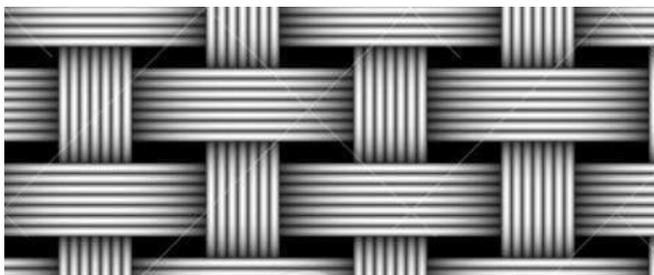


Рис. 4. Тканая структура ПК

При такой структуре ток молнии протекает по всем волокнам по всему объему материала, что приводит к снижению плотности тока и удельного энерговыделения в 2 и 4 раза, соответственно. Преимуществом в этом случае

являются незначительные повреждения верхних слоев защиты на радиусе канала молнии по сравнению с разрушением обычного графито-эпоксидного материала.

Таким образом, при изучении молниезащищенности углепластиков встает проблема поиска покрытия с заданными характеристиками. Для контроля за всеми параметрами молниезащиты необходима разработка обоснованных принципов и критериев молниезащиты проводящих композитов типа углепластика, которые будут рассмотрены в следующих работах.

Литература

1. Гущин И.А. Анализ динамики послойного разрушения углепластика токами молнии // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 63–68.
2. Гущин И.А. Динамика послойного разрушения углепластика токами молнии: теория и эксперимент // Вестник Чувашского университета. 2020. № 3. С. 67–73.
3. Guschin I.A., Erina T.N. Analysis of carbon fiber destruction by lightning current. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3, Applied and Fundamental Research Dedicated to the 75th Anniversary of Professor Abdul-Hamid Mahmoudovich Bisliyev. Ser. "3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences, ISEES, 2020, p. 012032.
4. 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.
5. 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.
6. Mazur V. Lightning threat to aircraft: do we know all we need to know? *J. Aircr.*, 2015, vol. 30, pp. 156–159.
7. Monetta T., Acquesta A., Bellucci F. Graphene/Epoxy Coating as Multifunctional Material for Aircraft Structures. *Aerospace*, 2015, vol. 2(3), pp. 423–434.

ГУЩИН ИГОРЬ АРДАЛЬЕВОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (elpardon@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2202-1497>).

Igor A. GUSCHIN

WAYS TO INCREASE THE LIGHTNING PROTECTION OF CARBON FIBER PLASTICS

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

Based on the previously conducted analytical study of the destruction of conducting composites by lightning currents, methods for increasing their lightning resistance are considered. To substantiate these methods, an analysis of the current distribution at different ratios of transverse and longitudinal resistivity was carried out. One of the methods using conductive additives in the composition of the binder material allows you to influence the anisotropy of the conductive medium of carbon fiber. The parameters of the range of the degree of anisotropy of carbon fiber are proposed to achieve uniform current spreading and reduce the radius of destruction of the composite by lightning currents. The formula for the fracture radius in the absence of anisotropy is obtained and estimated calculations are performed. The method of reinforcing carbon fiber with thin wires to increase its lightning resistance is considered. Calculated expressions are found for estimating the

weight, the number of delays per unit area, and the absence of overheating. Comparisons of weight characteristics for various reinforcing materials are carried out and a conclusion is made on their effectiveness. The advantages and disadvantages of this method of protection are considered. The third way to increase the lightning resistance of the composite suggests using a carbon fiber material with a woven structure as a protective coating. This protection reduces the energy release in the material and the size of the damage. It is concluded that it is necessary to control the lightning protection parameters and choose a coating with the required characteristics. The principles and criteria of lightning protection for real carbon fiber plastics will be considered in subsequent works.

References

1. Guschin 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. Guschin I.A. *Dinamika posloinogo razrusheniya ugleplastika tokami molnii: teoriya i eksperiment* [Dynamic of Layer-by-layer destruction of CFRP by lightning currents: theory and experiment.]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 3, pp. 67–73.
3. Guschin I.A., Erina T.N. Analysis of carbon fiber destruction by lightning current. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 3, Applied and Fundamental Research Dedicated to the 75th Anniversary of Professor Abdul-Hamid Mahmoudovich Bisliyev. Ser. "3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences, ISEES, 2020, p. 012032.
4. 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.
5. 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.
6. Mazur V. Lightning threat to aircraft: do we know all we need to know? *J. Aircr.*, 2015, vol. 30, pp. 156–159.
7. Monetta T., Acquesta A., Bellucci F. Graphene/Epoxy Coating as Multifunctional Material for Aircraft Structures. *Aerospace*, 2015, vol. 2(3), pp. 423–434.

IGOR A. GUSCHIN – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elpardon@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2202-1497>).

Формат цитирования: Гуцин И.А. Пути повышения молниезащищенности углепластиков // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 39–44. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-39-44.