

Литература

1. Солонина А.И., Уляхович Д.А., Арбузов С.М. и др. Основы цифровой обработки сигналов. Курс лекций – Санкт-Петербург/БХВ-Петербург. - 2003, 594 с.
2. Петрович Н.Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией / Н.Т. Петрович – М.: Сов. Радио. - 1965, 263 с.
3. Малинкин В.Б. Инвариантная обработка сигналов в радиотехнических системах / В.Б. Малинкин, Е.И. Алгазин, А.В. Малинкин // Монография, Красноярск, изд. Полицом. - 2012, 243 с.
4. Анализ функционирования системы ориентации и стабилизации геостационарного спутника связи // Петров М.Н., Анаров М.Ж. // Научное издание под ред. проф. Петрова М.Н. – Красноярск: изд. Полицом. ул. Вавилова 1, стр. 9. - 2018 г. – 115 с. Тир 500 экз.

Сведения об авторах

Петров Михаил Николаевич – профессор, главный научный сотрудник Сибирского государственного университета науки и технологии им. М.Ф. Решетнева, (Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31), т. 8 (391) 293 -20-70, e-mail: mnp_kafes@mail.ru.

Малинкин Виталий Борисович - профессор, профессор кафедры «Многоканальная электрическая связь» Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, 630102. г. Новосибирск, ул. Кирова, 86. e-mail: mesmbv@yandex.ru.

Малинкин Андрей Витальевич - инженер –исследователь Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, 630102. г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

Малинкин Евгений Витальевич - инженер –исследователь Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация, 630102. г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

УДК 621.315.56.3.027.3:621

DOI: 10.36535/0869-4176-2021-01-3

ПОВЫШЕНИЕ МОЛНИЕСТОЙКОСТИ ПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ

Кандидат техн. наук И.А. Гуцин
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
университет имени И.Н. Ульянова»

Рассмотрена проблема безопасности полетов летательных аппаратов при воздействиях молний. На основе анализа растекания тока молнии по конструкциям из проводящих композиционных материалов разработаны принципы и критерии молниезащиты и предложены мероприятия по повышению молниестойкости композитов.

Ключевые слова: безопасность полетов, воздействие молнии на летательные аппараты, проводящие композиционные материалы, разрушение углепластиков токами молнии, молниезащита, молниестойкость углепластиков.

INCREASING THE LIGHTNING RESISTANCE OF CONDUCTIVE COMPOSITES

Ph.D. (Tech.) *I.A. Guschin*
The Federal State Educational Establishment
of Higher Education “The Chuvash state university
named after I. N. Ulyanov”

The problem of flight safety of aircraft under the effects of lightning is considered. Based on the analysis of lightning current spreading over structures made of conductive composite materials, the principles and criteria of lightning protection are developed and measures to improve the lightning resistance of composites are proposed.

Keywords: safety of flights, impact of lightning on aircraft that conduct composite materials, destruction of carbon fiber by lightning currents, lightning protection, lightning resistance of carbon fiber.

Интерес к проблеме безопасности полетов летательных аппаратов в условиях грозовой деятельности вызван тем, что в них используются в больших объемах полимерные композиционные материалы из-за высоких прочностных и весовых характеристик. С увеличением числа таких воздушных судов они становятся более подвержены воздействию молнии и разрушению по сравнению с цельнометаллическими конструкциями [1-3]. Снижение безопасности полетов [4] требует разработки мер по повышению молниестойкости изделий, создания принципов и критериев эффективной молниезащиты [5,6], проведения экспериментов [7-11]. При этом следует ориентироваться не просто на проектирование молниезащитных систем, обеспечивающих требуемый уровень безопасности полетов, а на разработку наиболее оптимальных и эффективных средств. Решение таких задач невозможно без принципов и критериев создания средств молниезащиты и их оптимизации.

Сложность задачи объясняется тем, что механизм разрушения диэлектрических и проводящих композиционных материалов неодинаков [1-2]: для учета этого требуется комплексный подход на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Анализ динамики разрушения проводящих композитов (ПК) проводился автором на основе рассмотрения двух моделей растекания токов молнии: модели анизотропно-проводящей среды [5] и слоистой структуры. Обе модели позволяли оценить разрушения композитов в продольном и поперечном направлении и показали хорошее совпадение с экспериментом [6]. Полученные результаты давали возможность прогнозировать деструкцию углепластика на стадии проектирования летательного аппарата без проведения дорогостоящих экспериментов.

Известна сильная анизотропия углепластика (отношение значений удельных сопротивлений вдоль и поперек слоев достигает 10^5). Непосредственно в месте контакта канала с углепластиком энерговыделение наибольшее. Показанная в моделях неравномерность растекания тока по толщине при поперечном воздействии канала молнии являлась причиной послойного разрушения материала.

Одним из путей повышения молниестойкости графито-эпоксидных материалов является уменьшение степени анизотропии проводящих свойств, которая приводит к более равномерному растеканию по слоям композита и уменьшению степени его разрушения. Анализ растекания токов при различных значениях ρ_z/ρ_r показал, что в диапазоне $\rho_z/\rho_r = 10-100$ достигается практически равномерное распределение.

Для примера на рис. 1 приведено распределение тока молнии по радиусу $j_r(r)$ в верхнем слое при различных отношениях ρ_z/ρ_r .

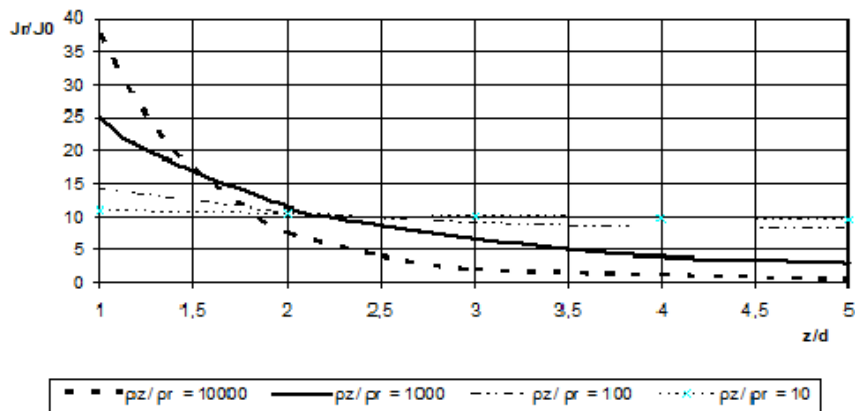


Рис. 1. Распределение j_r/j_0 по радиусу $r/r_{кан}$ в верхнем слое при различных отношениях ρ_z/ρ_r

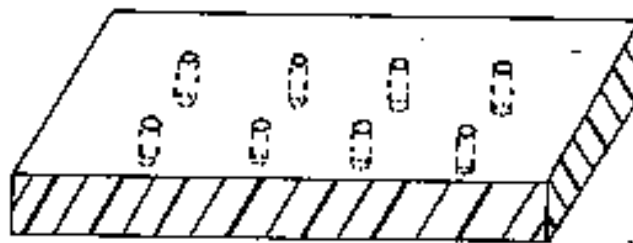


Рис. 2. Армирование как способ повышения молниестойкости ПК

В отсутствии анизотропии ($\rho_z/\rho_r = 1$) разрушение углепластика происходит на радиусе

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

где A - интеграл действия при экспоненциальной форме импульса тока, равный $I_m Q/2$; h - толщина углепластика.

При нормированном импульсе тока $2 \cdot 10^5$ А, $Q = 4$ Кл, толщине пластины $h = 0,2$ см, $\rho = 2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см и энергии разрушения 1200 Дж/см³ величина радиуса разрушения составляет $0,7$ см. Если эквивалентный радиус канала (радиус контактного пятна) больше $0,7$ см, то разрушение вовсе не произойдет. Подобная оценка при наличии сильной анизотропии ($\rho_z/\rho_r = 10^4$) по критерию [2] дает радиус 5 см, что существенно превосходит результат при $\rho_z/\rho_r = 1$.

Уменьшение степени анизотропии до приемлемой $\rho_z/\rho_r < 100$ может быть достигнуто применением различных проводящих добавок, вводимых в состав связующего при изготовлении композита.

Другим способом повышения молниестойкости углепластика является армирование материала металлическим проводником (рис. 2). Армирующие проводники находятся в заранее подготовленных отверстиях в композиционном материале, который обладает сильно выраженным анизотропным эффектом в поперечном и продольном направлении.

Такой способ позволяет значительно уменьшить удельное сопротивление поперек слоев ρ_z и снизить анизотропию проводящего композита до значений $\rho_z/\rho_r = 1 \dots 10$. Для

достижения средней проводимости $2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см необходимо, чтобы площадь пластины углепластика S_y , армируемая проводом, проходящим сквозь слои по всей толщине углепластика и занимающим площадь S_{π} составляла:

$$S_{\pi} = (\rho_n / \rho_y) \cdot S_y,$$

где ρ_n и ρ_y – удельные сопротивления провода и углепластика вдоль слоев.

Так при использовании медного провода с $\rho_n = 2 \cdot 10^{-6}$ Ом·см на каждом квадратном сантиметре площади пластины должно быть определенное число армирующих проволок, занимающих площадь $S_{\pi} = 10^{-3}$ см². При использовании провода диаметром $d_n = 0,1$ мм на квадратном сантиметре должно быть не менее 12-13 проволок.

Кроме этого условия необходимо, чтобы армирующие проводники пропускали ток молнии по толщине образца без разрушения. Чтобы провод не перегревался выше допустимой температуры $T_{доп}$ при протекании по нему импульса тока, его сечение должно быть не менее

$$S_{\pi} \geq \sqrt{\rho_n A / (T_{доп} \cdot C \cdot \gamma)},$$

где C и γ – теплоемкость и удельная масса провода.

Это сечение, поделенное на площадь опорного пятна канала разряда $\pi r_{кан}^2$, дает относительное сечение, то есть сечение, занимаемое проводом на единице площади углепластика $S_{\pi 0} = S_{\pi} / \pi r_{кан}^2$, а отношение этой величины к сечению отдельного провода есть число проволок на единице площади:

$$n_{\pi} = 4 S_{\pi} / (\pi r_{кан}^2) (\pi d_n^2).$$

Вес армирующего провода на единице площади углепластика:

$$P = h \sqrt{\rho_n A \gamma / (T_{доп} \cdot C)},$$

при $A = 10^6$ А²с, $r_{кан} = 1$ см и $T_{доп} = 400$ К число и вес проволок на единице площади при использовании медного провода диаметром $d_n = 0,5$ мм равны соответственно $n = 4,2$ 1/см² и $P_{\pi} = 66$ г/м², а для алюминиевого провода $n = 91$ 1/см² и $P_{\pi} = 48$ г/м². Это соответствует увеличению на 5% веса материала при использовании меди и на 3% при использовании алюминия в качестве армирующего материала.

Несмотря на хорошие весовые характеристики предложенного способа защиты, следует отметить и его недостатки. Одним из них, по нашим наблюдениям, является нарушение целостности самого материала при армировании, которое влияет на механические свойства углепластика. В ряде случаев при грубой технологии встает проблема применения лакокрасочных покрытий (ЛКП) над выступающими над поверхностью композита армирующими проволоками, которые могут привести к ухудшению аэродинамических характеристик летательного аппарата.

При необходимости сохранения целостности материала, на наш взгляд, следует использовать другой вариант увеличения молниестойкости углепластика.

Этот вариант учитывает отвод тока молнии по защитным слоям, имеющим высокую проводимость и низкую разрядную напряженность вдоль поверхности. Перспективной для повышения молниестойкости углепластика представляется защита, выполненная из самого материала самого композита. Она, как правило, является составной частью изде-

лия и выполняет такие же молниезащитные функции, как и любое другое проводящее покрытие. Вместе с тем, такая защита обеспечивает увеличение прочности слоистого композиционного материала. Непроводящая матрица обычно изготавливается из материала связующего защищаемой конструкции.

При использовании в качестве молниезащитного покрытия шин из углеродных волокон, образующих тканую структуру (рис. 3 и рис. 4), ток молнии протекает по всему объему покрытия по внешним и внутренним переплетенным шинам. В результате чего плотность тока снижается в 2 раза, а удельное энерговыделение в 4 раза.

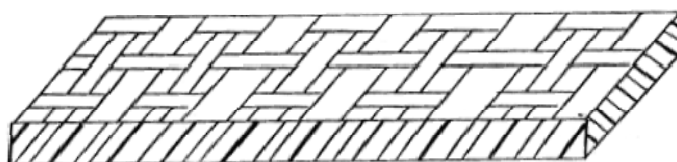


Рис. 3. Тканая структура проводящего композита (ПК)

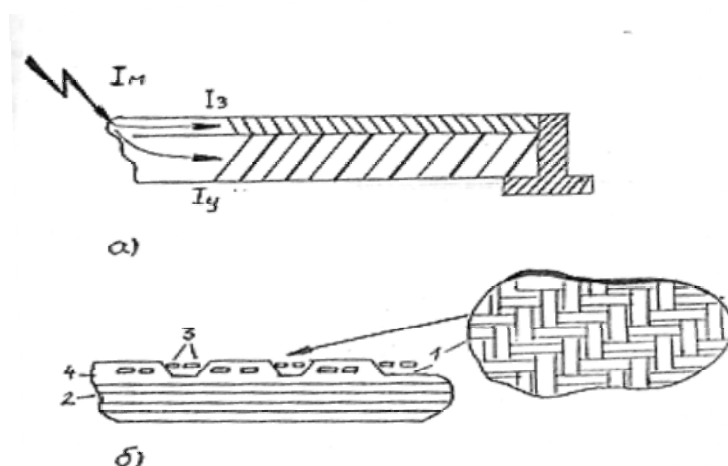


Рис. 4. Принцип работы молниезащиты с проводящими покрытиями:
А – растекание тока по композиту и защитному слою; б – конструкция защитного слоя.

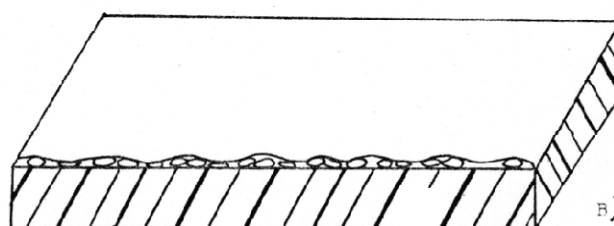


Рис. 5. Металлизированные волокна ПК

Это значительно снижает локальные разрушения в местах контакта канала молнии с покрытием. Однако такой способ весьма трудоемок и низкотехнологичен при изготовлении. Кроме того, незначительное снижение удельного энерговыделения из-за невысокой

проводимости проводящего слоя может привести к повреждениям наружных слоев композита. Поэтому встает задача выбора покрытия с требуемыми молниезащитными характеристиками. Возможность контроля параметров молниезащиты приводит к необходимости разработки критериев защищенности проводящего композита. Такие критерии рассмотрены на примере проводящего покрытия с металлизированными волокнами во внешнем слое углепластика (рис. 5), которые здесь выполняют свои молниезащитные функции за счет проводящих свойств и разрядных процессов, происходящих вдоль поверхности композита с защитным слоем.

Следовательно, рассмотренные способы молниезащиты проводящих композиционных материалов позволяют значительно повысить молниестойкость изделий из этих материалов. При выборе способа молниезащиты следует учитывать такие показатели, как весовые характеристики защиты и ее проводящие свойства, определяемые высокой поверхностной проводимостью. Эта проводимость должна быть достаточна для шунтирования тока в защитном изделии и снижения его до безопасного значения. Рассмотрение этих вопросов планируется в следующих работах.

Литература

1. Авруцкий В.А. Оптимизация сеточной молниезащиты из диэлектрических конструкционных материалов /В.А. Авруцкий, А.С. Бизяев, И.А. Гушин, Е.Н. Прохоров, И.М. Сергиевская // *Электричество*. - 1992. №1. С. 27-31.
2. Авруцкий В.А., Бизяев А.С., Гушин И.А., Прохоров Е.Н., Сергиевская И.М. Разрушение изделий из углепластика под действием токов молнии // *Электричество*. - 1993. №2. С. 28-33.
3. Gardiner G. Lightning Strike Protection For Composite Structures / G .Gardiner // *Composites World*, 7/1/2006.
4. Гушин И.А. Система отображения пилотажной информации при посадке летательного аппарата / И.А. Гушин, Ю.П. Комзолов, Д.Н. Левин, И.М., Левитин, А.А. Титов // Патент на изобретение RUS 2046059.
5. Гушин И.А. Аналитическая модель растекания тока по проводящему композиционному материалу // *Вестник Чувашского университета*. - 2016. №3. С. 30-35.
6. Гушин И.А. Сравнение моделей разрушения углепластика токами молнии // *Вестник Чувашского университета*. - 2018. №3. С. 53-59.
7. Korsgaard J. Improved lightning protection system enhances the reliability of multi-MW blades/ J. Korsgaard presentation of COWC in October 2005, pp. 1-30.
8. Madsen S.F. Lightning exposure of Carbon Fiber Composites in wind turbine blades/ S.F. Madsen, L. Carloni // *Journal of Lightning Research*. 24th Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics,, Technical University of Denmark, Copenhagen, June. - 2015, pp. 105-110.
9. Madsen S.F. Proposal of New Zoning Concept Considering Lightning Protection of Wind Turbine Blades / S.F. Madsen // *Journal of Lightning Research*. - 2012, no. 4, 108-117.
10. Karch C. Lightning protection of carbon fibre reinforced plastics /C. Karch, C. Metzner // 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 25-30 Sept. - 2016, pp. 1-8.
11. Sonehara T. / T. Sonehara, H. Kusano, N. Tokuoka, Y. Hirano // *Visualization of Lightning Impulse Current Discharge on CFRP Laminate*, ICLP, 2014, 11-18 Oct. 2014., pp. 835 – 839

Сведения об авторе

Гушин Игорь Ардадьенович, – доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, 428015, Чувашская Республика, Московский пр-т, д. 15, +7(917) 667-568-9, elpardo@list.ru