

Молниезащита углепластиковых элементов конструкции самолета при тепловом и механическом действиях прямого удара молнии

А.В. ОСТРИК, *А.А. ФИЛИПЕНКО

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка

**Центральный научно-исследовательский институт
специального машиностроения, г. Хотьково*

В работе рассматриваются современные методы защиты углепластиковых элементов конструкции самолета от теплового и механического действий прямого удара молнии. Приводятся оценки вклада различных физических механизмов в повреждение конструкции. Даются общие рекомендации по молниезащите углепластиковых элементов конструкции при прямом ударе молнии.

Ключевые слова: молниезащита; углепластиковые элементы конструкции самолета; прямой удар молнии; тепловое и механическое действия.

Углепластиковые элементы конструкций нашли широкое применение в ракетно-космической технике. Представляется целесообразным их использование и в конструкциях самолетов, предназначенных для перевозки пассажиров, поскольку удельные деформационно-прочностные характеристики углепластиков существенно выше соответствующих величин для традиционных в авиации алюминиевых сплавов (для углепластиков характеристики берутся в направлении армирования):

$$\left(\frac{E}{\rho}\right)_{УП} / \left(\frac{E}{\rho}\right)_{АММБ} \approx 3 \dots 6, \quad \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)_{УП} / \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)_{АММБ} \approx 3 \dots 10,$$

где E -модуль Юнга; σ -предел прочности на растяжение; ρ -плотность материала.

Внедрение углепластиков позволяет повысить экономичность гражданской авиации. Однако в силу ряда хорошо известных отличий в поведении композитных материалов по сравнению с металлами обеспечение безопасности полетов требует разработки новых подходов к конструированию и диагностике (в том числе, и предполетной) углепластиковых элементов самолета.

В частности, одной из основных оказывается проблема молниезащиты самолетов с элементами конструкции из углепластика. Очевидным отличием углепластиковых элементов от металлических, которое обуславливает их большую уязвимость к прямому воздействию удара молнии, является существенно более низкая проводимость (по сравнению с алюминием в 500 раз). Поэтому именно на увеличение проводимости и направлены в основном разрабатываемые на современном этапе конструктивные способы защиты.

В настоящей работе рассматриваются физические механизмы прямого воздействия молнии на углепластиковые элементы конструкции самолета. Приводятся оценки их вклада в повреждение конструкции. На основе этих оценок и обзора современных конструктивных методов защиты даются общие рекомендации по молниезащите самолета при прямом ударе молнии.

Конструктивные методы молниезащиты

Молниезащитные сетки. В авиационной технике широкое применение

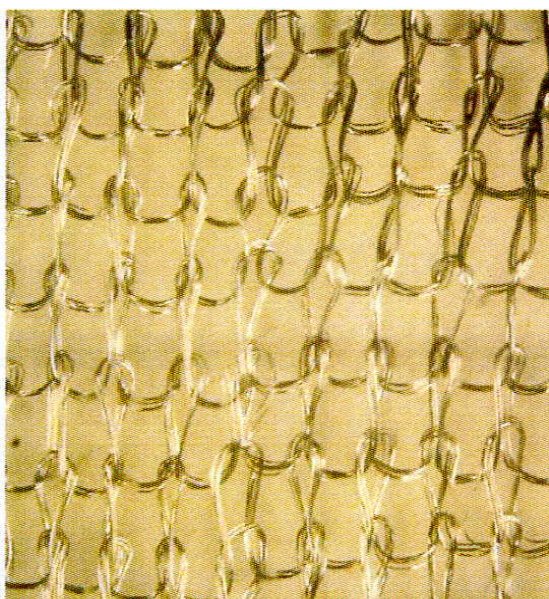


Рис. 1. Полотно из микропроволоки [1]

получили армирующие трикотажные сетки из медной проволоки диаметром 50-150мкм [1] (см. рис. 1). Сетчатое полотно требуемой ширины и строения изготавливается на специальном вязальном оборудовании. При этом, варьируя параметрами сетки (размерами ячейки, диаметром и количеством проволочек, формой петель и регулярностью их расположения в полотне), можно управлять в некоторых пределах анизотропией механических и электрофизических свойств. Характеристики полотен из медной микропроволоки представлены в таблице 1.

Известны и альтернативные технологии изготовления молниезащитных микросеток из высокопроводящих металлов (меди алюминия, бронзы [2] и т.д.), характеристики которых представлены в таблицах 2-4 [3, 4]. По утверждению специалистов компании производителя Dexamet эти микросетки превосходят по своим качествам тканые и позволяют защитить углепластиковые элементы конструкции самолета от ударов молнии с силой тока 200кА.

Известны и альтернативные технологии изготовления молниезащитных микросеток из высокопроводящих металлов

Таблица 1. Молниезащитные полотна из медных микропроволоок

Наименование показателей	Норма	
	ПМ-0,08	ПМ-0,12
Диаметр проволоки, мм	0,08	0,12
Ширина полотна, мм	600±15	400±15
Поверхностная плотность, г/м ²	85±5	155±5
Количество петель на 10 см полотна:		
	по вертикали	54±2
по горизонтали	32±2	35±2
Толщина полотна, мм	0,3±0,05	0,4±0,05
Удельная поверхностная электропроводность, См		
	по вертикали	205±5
по горизонтали	130±5	240±5

Таблица 2. Алюминиевые микросетки

Код продукта Dexamet	2AL8-075F	2AL8-080	4AL8-080F	5AL10-080
Масса, фунт/ см ($\pm 10\%$)	0.013	0.016	0.016	0.028
Толщина стенки ячейки ($\pm 10\%$), дюйм/мм	0.002/0.051	0.004/0.102	0.004/0.102	0.005/0.127
Размер ячейки по диагонали ($\pm 5\%$), дюйм/мм	0.075/1.905	0.080/2.032	0.080/2.032	0.080/2.032
Толщина сетки (± 0.001 дюйм/ ± 0.025 mm)	0.002/0.051	0.006/0.152	0.004/0.102	0.006/0.152
Открытая площадь ($\pm 5\%$)	52%	71%	71%	60%

Таблица 3. Медные микросетки

Код продукта Dexamet	2CU4-100A	2CU6-100A	3CU7-125A	3CU7-100A
Масса, фунт/ см ($\pm 10\%$)	0.015	0.022	0.029	0.040
Толщина стенки ячейки ($\pm 10\%$), дюйм/мм	0.002/ 0.051	0.002/ 0.051	0.003/ 0.076	0.003/0.076
Размер ячейки по диагонали ($\pm 5\%$), дюйм/мм	0.100/ 2.54	0.100/ 2.54	0.125/ 3.175	0.100/ 2.54
Толщина сетки (± 0.001 дюйм/ ± 0.025 mm)	0.004/ 0.102	0.005/ 0.127	0.005/ 0.127	0.005/ 0.127
Открытая площадь ($\pm 5\%$)	84%	76%	79%	70%

Таблица 4. Медные выровненные микросетки

Код продукта Dexamet	2CU4-100FA	2CU6-100FA	3CU7-125FA	3CU7-100FA
Масса, фунт/ см ($\pm 10\%$)	0.015	0.022	0.029	0.040
Толщина стенки ячейки ($\pm 10\%$), дюйм/мм	0.002/ 0.051	0.002/0.051	0.003/0.076	0.003/0.076
Размер ячейки по диагонали ($\pm 5\%$), дюйм/мм	0.100/2.54	0.100/2.54	0.125/3.175	0.100/2.54
Толщина сетки (± 0.001 дюйм/ ± 0.025 mm)	0.002/0.051	0.002/0.051	0.003/0.076	0.003/0.076
Открытая площадь ($\pm 5\%$)	84%	76%	79%	70%

Углеродные молниезащитные покрытия для углепластиков. Основная идея углеродных молниезащитного покрытия для углепластиков состоит в использовании композиционного покрытия, входящего в состав углепластика и

идущего в расчет его прочности [5]. В качестве токопроводящего слоя используется материал на основе высокопрочных углеродных волокон.

Для более быстрого отвода энергии при воздействии молнии применяют

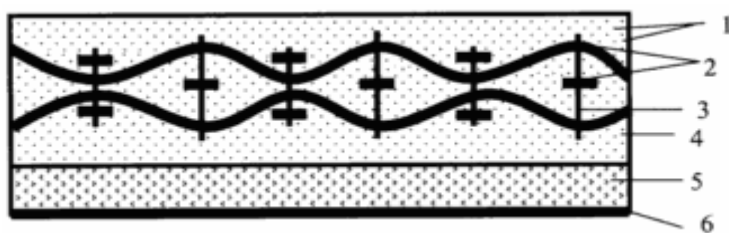


Рис. 2. Углеродное молниезащитное покрытие [5]: 1 - углеродные наномодификаторы, 2 - углеродные волокна токопроводящего слоя, 3 – трансверсально-армирующие углеродные волокна, 4 - полимерная матрица токопроводящего слоя, 5 - диэлектрический слой - полимерная матрица углепластиковой конструкции, 6 - углепластиковая конструкция

специальное ориентирование слоев углеродной ткани в токопроводящем слое под углом $-30 - +60^\circ$ друг относительно друга. Между слоями углеродной ткани располагают трансверсально-армирующие углеродные волокна, связывающие отдельные слои путем многослойного ткачества или прошивкой, причем количество трансверсально-армирующих волокон составляет 1 - 5 на 1 см^2 (см. рис. 2).

Поскольку основной причиной разрушения углепластиковых материалов является взрыв продуктов деструкции связующего (эффект взрывающихся проволочек), то в межволоконное пространство углеродного защитного покрытия вводится полимерное связующее с высокой температурой деструкции $T > 250^\circ\text{C}$. Кроме того, для повышения контактной электропроводности между отдельными слоями углеродной ткани в полимерное связующее токопроводящего слоя вводят углеродные наномодификаторы (фуллерены и их производные) в количестве 3-25 весовых процентов [5]. При этом диэлектрический и токопроводящий слои молниезащитного покрытия могут изготавливаться в едином технологическом цикле с углепластиковой конструкцией методом прямого прессования.

Некоторые характеристики молниезащитного покрытия приведены в таблице 5.

Таблица 5. Характеристики углеродного молниезащитного покрытия (равнопрочная углеродная ткань+ термостойкое ЭПК+углеродные наночастицы)

ρ , г/см ³	δ , мм	σ , кСм/м	λ_{\perp} , Вт/м/К	σ_{11}^+ , МПа	σ_{22}^+ , МПа	E_{11}^+ , ГПа	E_{22}^+ , ГПа	σ_{11}^- , МПа	σ_{22}^- , МПа	$\Sigma_{\text{ви}}$, МПа	τ_{xz} , МПа	μ
1,58	0,19	18	1623	670	600	73	60	720	600	1170	47	0,07

Из результатов проведенных авторами патента [5] экспериментов следует, что предлагаемое углеродное молниезащитное покрытие эффективно защищает углепластиковые конструкции внешнего контура летательных аппаратов от воздействия смещающихся разрядов молнии с максимальным значением тока $I=200 \text{ кА}$ и зарядом $Q=20 \text{ Кл}$.

Проводящие напыляемые пленки и краски. В настоящее время интенсивно развиваются различные способы газотермического напыления (газопламенное, высокоскоростное газопламенное, детонационное, плазменное и т.д.)

металлов на поверхности конструкционных материалов [6]. Поверхностная металлическая пленка или клейкая фольга толщиной в десятки микрон эффективно защищает углепластиковые элементы конструкций от прожигающего действия дугового пятна. Принцип защиты основан на перемещении пятна по мере выжигания металлической пленки и увеличение ее толщины нежелательно, поскольку повышается опасность прямого контакта дугового разряда с защищаемым углепластиком.

Лакокрасочные токопроводящие покрытия используются для выравнивания потенциала на поверхности композитной конструкции. Кроме того, они также могут играть роль дополнительной защиты от прожигания дуговым пятном.

Параметры и физические механизмы прямого воздействия молнии

Согласно квалификационным требованиям [7] прямое воздействие молнии на конструкцию самолета приводит к:

- омическому нагреву;
- эффекту взрывающихся проволочек;
- прожигу дуговым пятном;
- образованию горячих точек;
- воздействию радиальных и осевых ударных волн (УВ), идущих от канала разряда;
- давлению магнитных сил;
- магнитному взаимодействию токов;
- искрению;
- пробоем диэлектрических материалов.

Искрение и образование горячих точек приводят к воспламенению горючих материалов и поскольку для исследуемых элементов конструкции самолета интереса не представляют, то далее не рассматриваются.

Удар молнии отличается разнообразием реализаций [8], что, несомненно, требует его типизации. Такая типизация по фазам вспышки молнии применительно к ее воздействию на самолет представлена в [7]. Перечисленные выше факторы, определяющие повреждение конструкции, формируются благодаря одной или нескольким фаз, параметры которых и мы и рассмотрим далее.

Фазы вспышки молнии. Механические повреждения элементов конструкции при прямом воздействии молнии в основном определяются следующими параметрами:

- максимальной величиной тока I_{\max} , определяющей максимальные магнитные силы;
- скоростью изменения силы тока dI/dt , с которой связаны токи, образующиеся в конструкции благодаря электромагнитной индукции;
- интегралом действия $F = \int_0^{\infty} I^2 dt$, задающим омический нагрев;

- величиной прошедшего заряда Q , с которым связано прожигающее действие.

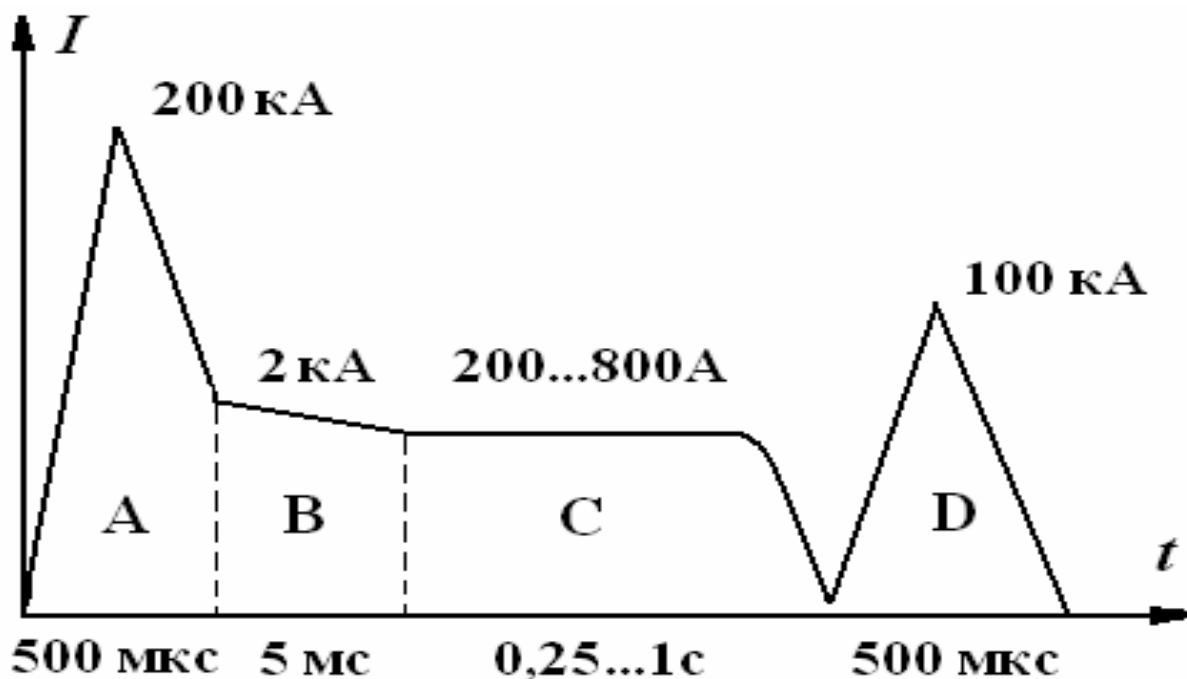


Рис. 3. Типизированная форма разрядного тока

Типизированная форма разрядного тока показана на рис. 3 [7]. Ей соответствуют следующие четыре фазы:

- составляющая *A* (импульс тока главного разряда), $I_{\max}=200\pm 10\%$ кА, $F=2\times 10^6\pm 20\%$ $A^2\times c$, $\tau\leq 500\text{мкс}$;
- составляющая *B* (промежуточный ток), $I_{\max}=2\pm 10\%$ кА, $Q=10\pm 10\%$ Кл, $\tau\leq 5\text{мс}$;
- составляющая *C* (постоянный ток), $I_{\max}=200\dots 800$ А, $Q=200\pm 20\%$ Кл, $\tau=0,25\dots 1\text{с}$;
- составляющая *D* (импульс тока повторного разряда), $I_{\max}=100\pm 10\%$ кА, $F=0,25\times 10^6\pm 20\%$ $A^2\times c$, $\tau\leq 500\text{мкс}$.

Омический нагрев. Как уже отмечалась, при прямом ударе конструкция может быть прогрета в результате прохождения через нее подводимого по каналу разряда тока. Полный заряд, переносимый молнией, меняется в зависимости от ее типа (положительная или отрицательная) и мощности в интервале от 7, 5Кл (отрицательная, с вероятностью реализации 50%) до 350Кл (положительная, с вероятностью реализации 5%) [8].

Перенос заряда через материал объекта прямыми ударами сопровождается омическим нагревом, который определяется интегралом $F = \int_0^{\infty} I^2 dt$. Данные по

значениям этого интеграла в зависимости от типа молний и вероятностей их реализации представлены в таблице 6. Далее для оценок используется значение $F= 2\times 10^6 A^2\times c$, которое соответствует квалификационным требованиям [7] и реализуется с вероятностью более 5% среди положительных вспышек. рассмат-

ривать максимальные значения F , имеющие малую вероятность реализации, вряд ли, целесообразно, т.к. вероятность прямого удара сама по себе мала (в

Таблица 6. Значения интеграла $F = \int_0^{\infty} I^2 dt$ [8]

Вероятность реализации	95%	50%	5%
$F, A^2 \times c$ (для положительных вспышек)	$2,5 \times 10^4$	$6,5 \times 10^5$	$1,5 \times 10^7$
$F, A^2 \times c$ (для отрицательных вспышек)	$6,0 \times 10^3$	$5,5 \times 10^4$	$5,5 \times 10^5$

среднем один удар на 3000 часов полета [8]), а, как известно, вероятности перемножаются (события прямого удара и реализации определенной мощности и типа молнии для малоразмерных объектов типа самолета могут быть приняты независимыми). Также следует отметить, что вероятность реализации отрицательных вспышек выше положительных и большая величина $F = 2 \times 10^6 A^2 \times c$ (вместо более вероятной величины $F = 6,0 \times 10^3 A^2 \times c$) берется лишь из соображений запаса стойкости конструкции.

Как легко видеть, удельное энерговыделение (на единицу объема) Q_J определяется величиной интеграла F и сечением проводника S по формуле:

$$Q_J = \int_0^{\infty} \rho j^2 dt = \int_0^{\infty} \frac{\rho I^2}{S^2} dt = \frac{\rho}{S^2} \int_0^{\infty} I^2 dt = \frac{\rho F}{S^2}. \quad (1)$$

Таким образом, при заданных значениях интеграла F и характерной площади сечения конструкции S омический нагрев тем больше, чем больше удельное сопротивление материала. Учитывая, что удельное сопротивление углеродных материалов в сотни раз превышает удельное сопротивление металлов, становится понятной острота проблемы защиты углепластиковых элементов конструкции самолета от прямых ударов молнии.

Очевидно, что омический нагрев преобладает для фаз вспышки молнии A и D , характеризующихся большим значением интеграла F .

Эффект взрывающихся проволочек. Как следует из (1) для металлических включений в углепластик (проводов, сеток, дисперсных наполнителей), имеющих нерасчетно малые площади поперечного сечения, омический нагрев весьма значителен, что приводит к испарению металла с последующим разрушением образующимися парами окружающего материала. Отметим, что эффект взрывающихся проволочек может наблюдаться в углепластике и при отсутствии металлических включений, когда омический нагрев более проводящих углеродных волокон вызывает образование газообразных продуктов термодеструкции низкотемпературного связующего. Расширяющиеся газы могут вызвать существенные повреждения углепластика (например, разрывы волокон) и снижение его прочностных характеристик. Эффект взрывающихся проволочек характерен для фаз вспышки молнии A и D , при которых велико значение интеграла F , определяющего плотность энергии, затрачиваемой на нагрев и фазовые переходы от твердого состояния в газообразное.

Прожиг дуговым пятном. Канал разряда в области присоединения к поверхности конструкции является мощным источником потоков энергии: излучения из канала, передачи тепла от плазмы канала к конструкции теплопроводностью; омического нагрева токами в окрестности дугового пятна.

Максимальный поток излучения можно оценить, считая его излучением абсолютно черного тела (на главной стадии достигаются температуры $T \approx 30000\text{K}$):

$$q_{rad} = \sigma T^4 \approx 5,67 \times 10^{-8} (30000)^4 \text{ Вт} / \text{м}^2 \approx 4,6 \text{ МВт} / \text{см}^2.$$

Полученное значение максимального потока достаточно велико, однако время существования столь высоких температур (и тем более потока излучения, который уменьшается пропорционально четвертой степени температуры) не превышает $\tau \approx 50 \text{ мкс}$ и общая плотность поглощаемой поверхностью энергии составляет

$$W \approx \frac{1}{2} \times q_{rad} \times \tau \approx \frac{1}{2} \times 4,6 \times 10^6 \times 50 \times 10^{-6} \text{ Дж} / \text{см}^2 \approx 0,13 \text{ кДж} / \text{см}^2.$$

Потоки энергии в единицы мегаватт на квадратный сантиметр, соответствуют режиму развитого испарения, и большая часть энергии W будет затрачена на тепловой унос. Величину теплового уноса $\Delta\delta$ защитной металлической пленки оценивается по формуле:

$$\Delta\delta = \frac{W}{\rho Q_{eff}}, \quad (2)$$

где Q_{eff} - эффективная энергия разрушения металла.

В таблице 7 представлены результаты оценок тепловых уносов по формуле (2), из которых следует, что металлические пленки должны иметь толщину не менее нескольких десятков микрон (исключая алюминий) для обеспечения защиты от фаз вспышки молнии A и D . При этом по минимуму весовых затрат наиболее предпочтительным является молибден (140 г/м^2), однако он существенно проигрывает меди по величине удельного сопротивления, важного для омического нагрева. Весовые затраты меди по сравнению с другими хорошо проводящими металлами отличаются незначительно.

Таблица 7. Максимальные тепловые уносы на главной стадии вспышки молнии

материал	Al	Ni	Cu	Mo	W	C	бронза	латунь	сталь
$\rho \times 10^8, \text{ Ом} \times \text{м}$	2,8	7,3	1,7	5,7	5,5	1400	18	6,3	12
$\rho \Delta\delta, \text{ г/м}^2$	240	210	290	140	260	-	270	250	150
$\Delta\delta, \text{ мкм}$	87	24	32	14	13,5	-	30	29	19

Таким образом, защитные пленки из меди и молибдена являются наиболее перспективными для защиты от прожигającego действия.

Дополнительный вклад в прожиг могут вносить медленные компоненты фаз вспышки молнии B и C , поскольку во время их реализации протекает наибольший заряд Q , обуславливающий омический нагрев, и реализуется длитель-

ный контакт поверхности с плазмой канала разряда, во время которого существенным оказывает подвод энергии теплопроводностью. Таким образом, прожиг на этих стадиях может быть обусловлен омическим нагревом в области дугового пятна и подводом энергии из канала разряда у поверхности конструкции.

Оценим максимально возможный подвод энергии вследствие омического нагрева в области дугового пятна, считая, что изменение тока для медленных составляющих фаз незначительно (полагаем, что диаметр разрядного канала 20см и $S \approx 300 \text{ см}^2$)

$$Q_J = \rho j \tau = \rho \left(\frac{Q}{S \tau} \right)^2 \tau = \rho \frac{Q^2}{S^2 \tau} \approx 5 \times 10^{-8} \frac{200^2}{300^2 \times 10^{-8} \times 1} \text{ Дж} / \text{ м}^3 \approx 2 \text{ Дж} / \text{ м}^3.$$

Энерговыведение в несколько джоулей на кубометр для процесса прожига не имеет никакого значения, и омический нагрев для медленных составляющих фаз, как правило, не учитывается.

Прожику может также способствовать омический нагрев материала в области дугового пятна на фазе вспышке молнии *A*. Согласно (1) энерговыведение в этом случае не превысит значений

$$Q_J = \frac{\rho F}{S^2} \approx 5 \times 10^{-8} \frac{2 \times 10^6}{300^2 \times 10^{-8}} \text{ Дж} / \text{ м}^3 \approx 100 \text{ Дж} / \text{ м}^3$$

и этим видом нагрева можно, очевидно, пренебречь.

Наибольшую трудность представляет расчет передачи тепла от плазмы разряда к конструкции посредством теплопроводности. Оценим максимально возможное значение этого потока. Очевидно, что между плазмой с температурой $T=3000 \dots 30000 \text{ К}$ и конденсированной частью конструкции находится испаренный материал. Перенос тепла в нем и определяет искомый поток (предполагается, что теплопроводность плазмы много больше теплопроводности паров металла). Поток тем больше, чем меньше паров. Поэтому при оценке максимального потока массы испаренного излучением материала в фазе *A* приняты в соответствии с таблицей 7. Тогда для пленочной защиты из меди имеем (при максимальной оценке считается, что пар не успел расшириться и $\rho = \rho_g$, а $T_p \ll T$)

$$q_{\text{con}} \approx \lambda \frac{T - T_p}{\rho \Delta \delta} \rho_g \approx 0,1 \times \frac{30000}{32 \times 10^{-6}} \text{ Вт} / \text{ м}^2 \approx 10 \text{ кВт} / \text{ см}^2. \quad (3)$$

Следует отметить, что оценка потока (3) завышена, поскольку расширение пара и уменьшение температуры плазмы приведут к снижению теплового потока посредством теплопроводности. Однако полученная величина свидетельствует о важности этого механизма передачи тепла для процесса прожигания материалов молнией.

Таким образом, проведенные оценки показывают, что прожиг реализуется благодаря воздействию излучения в начале фазы вспышки *A* и в результате передачи тепла теплопроводностью на стадиях *B* и *C*. Дополнительный тепловой унос может реализоваться под действием излучения из канала разряда в начале фазы вспышки молнии *D*.

Действие ударной волны. В литературе отсутствуют данные о параметрах ударных волн, формирующихся вблизи канала разряда молнии. Однако можно оценить эти параметры из простейших физических соображений.

Ударная волна от разряда молнии формируется в результате чрезвычайно быстрого прогрева ее канала до высоких температур. Расширяющийся высокотемпературный канал вытесняет окружающий воздух, формируя в нем ударную волну (эта волна в [7] называется радиальной). По мере распространения ударная волна затухает и вырождается в акустическую, которая, как известно [9], может быть слышна на расстояниях десятки километров. Принимая начальный радиус УВ порядка размера канала $r_c \approx 20\text{см}$ и считая ее цилиндрической, получим оценку для перепада давления в УВ в окрестности канала молнии (принимая, что расстояние слышимости $s \approx 30\text{км}$, а условие слышимости громового раската $u/c \approx 10^{-4}$)

$$\Delta p_\Phi = \Delta p_a \sqrt{\frac{s}{r_c}} \rho_0 u c \approx 10^{-4} \rho_0 c^2 \sqrt{\frac{s}{r_c}} \approx 10^{-4} \times 1,29 \times (340)^2 \sqrt{\frac{3 \times 10^4}{0,2}} \text{Па} \approx 0,058 \text{бар}. \quad (4)$$

Если считать, что интенсивным источником УВ является область в окрестности лидера (эта волна в [7] называется осевой), то волна уже будет более близкой к сферической и тогда получаем

$$\Delta p_\Phi = \Delta p_a \frac{s}{r_c} \rho_0 u c \approx 10^{-4} \rho_0 c^2 \frac{s}{r_c} \approx 10^{-4} \times 1,29 \times (340)^2 \frac{3 \times 10^4}{0,2} \text{Па} \approx 22,4 \text{бар}. \quad (5)$$

Грубую оценку уровня давления можно найти, считая воздух идеальным газом, нагреваемым в канале. Температура при таком нагреве на главной стадии может достигать 30000^0К в течение первых 10 мкс (примерно за последующие 20 мкс она падает до 20000^0К) [8], что на порядок меньше характерного времени расширения канала $\tau \approx r_c / D(p) = 0,3 / (3 \times 10^3) \text{с} = 100 \text{мкс}$ ($D(100\text{бар}) \approx 3\text{км/с}$), и можно считать нагрев изохорическим. Для изохорического нагрева получаем (ионизацией также пренебрегаем)

$$\Delta p_\Phi = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right) \approx 1 \times \left(\frac{30000}{300} \right) \text{бар} \approx 100 \text{бар}. \quad (6)$$

В литературе имеются косвенные данные о том, что перепад давления во фронте УВ, бегущей впереди лидера, также порядка 100бар.

Таким образом, все проведенные оценки показывают, что давление во фронте УВ, образующейся при прямом ударе молнии не может превышать 100бар.

Полученный разброс в оценках значений Δp_Φ (от долей бара до 100бар) и отсутствие экспериментальных данных по параметрам УВ в окрестности лидера не позволяют надежно спрогнозировать перепад давления во фронте УВ при прямом ударе молнии. Наиболее обоснованной представляется оценка (5), поскольку она опирается на косвенные экспериментальные данные. Использование полученной в ней величины $\Delta p_\Phi \approx 20\text{бар}$ оправдывается тем, что она намного превышает значение оценки (4), что идет в запас прочности, и по порядку величины близка к явно завышенной оценке (6).

Поскольку характерная длительность главной фазы порядка $\tau_n \approx 100 \text{ мкс}$, то импульс давления нагрузки от механического действия молнии при прямом ударе составляет

$$I_p \approx \frac{1}{2} \Delta p_\phi \tau_n = \frac{1}{2} \times 20 \times 10^{-4} \text{ бар} \times c = 0,1 \text{ кПа} \times c.$$

Магнитные силы. Магнитные силы, проявляющиеся при больших значениях тока в течение фаз вспышки молнии A и D , реализуются в виде магнитного давления на поверхность проводника или магнитного взаимодействия токов.

Магнитное давление p_m , пропорциональное квадрату плотности тока j может быть причиной повреждений лишь при $j \geq 1 \text{ кА/мм}^2$, т.е. в случае больших токов через проводники малого сечения. Так уже для проводника диаметром 5 мм ($S \approx 0,2 \text{ см}^2$) имеем для $I=200 \text{ кА}$ [10]

$$p_m = \frac{\mu_0}{8\pi} \left(\frac{I}{S} \right)^2 S \approx \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8\pi} \left(\frac{2 \times 10^5}{2 \times 10^{-5}} \right)^2 2 \times 10^{-5} \text{ Па} \approx 1000 \text{ бар}.$$

В металлических защитных сетках элементов конструкций самолета максимальный ток фаза A , величиной $I=200 \text{ кА}$, распределяется, как правило, на значительно большее сечение и магнитное давление не представляет опасности для прочности проводников, из которых изготавливается сетка.

Магнитное взаимодействие токов возникает в случае их протекания по двум близко расположенным проводникам (одним из которых, может быть канал разряда) или по частям одного проводника, резко меняющего направление. Оно существенно, когда токи от молнии проходят через небольшую область пространства: в обтекателях антенны РЛС, в трубках Пито, измеряющих скорость набегающего потока воздуха и т.д. Так для трубки Пито сечением $a \times b = 28 \times 30 \text{ мм}$ сила, действующая на единицу длины при токе $I=200 \text{ кА}$ составляет:

$$F_{ed} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2 \times (I/4)^2}{a} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{4\pi} \frac{2 \times (5 \times 10^4)^2}{28 \times 10^{-3}} \text{ Н/м} = 18 \text{ кг/см}.$$

Отметим, что для протяженных элементов конструкции магнитные силы не представляют непосредственной опасности.

Пробой диэлектрика. Диэлектрические материалы могут быть пробиты в сильном поле лидерной головки молнии. Как правило, условием пробоя является наличие проводящей поверхности с тыльной по отношению к молнии стороны диэлектрика. Локальный пробой углеродных элементов конструкции может иметь место в областях их контакта с металлическими деталями, однако это процесс вряд ли будет иметь катастрофическим последствиям, хотя и приведет к местному снижению прочности конструкции.

Таким образом, приведенные расчетные оценки показывают, что для углепластиковых элементов конструкции основными физическими механизмами повреждения от прямого воздействия молнии являются: омический нагрев и прожиг. В некоторых случаях могут иметь место деформация и разрушение элементов от действия УВ.

Общие рекомендации по конструктивной молниезащите самолета

Элементы самолета вне прямого контакта с молнией. Для углепластиковых элементов самолета, где низка вероятность прямого контакта с каналом молнии (зона 3; определение зон смотрите, например, в [11]), не требуется обеспечение защиты от прожигающего действия молнии. При этом если площадь материала в сечении элемента достаточно велика, то не требуется защиты и от омического нагрева. Однако в некоторых случаях (в частности, для углепластиковой части фюзеляжа) требуется увеличение экранирующих свойств углепластиковых элементов для обеспечения защиты радиоэлектронного оборудования самолета от электромагнитных полей молнии и других внешних источников (средств радиолокации и радиопередатчиков большой мощности). Увеличение экранирующих свойств может быть достигнуто введением в состав пакета вязаного полотна из медной микропроволки (молниезащитной сетки).

Длина волны электромагнитного излучения от разряда молнии, по крайней мере, больше

$$\lambda = c\tau \approx 3 \times 10^8 \times 10^{-4} \text{ м} \approx 300 \text{ м}$$

и никаких ограничений на размеры ячейки сетки не требуется. Однако для защиты от электромагнитного излучения радиолокационных станций с длиной волны $\lambda \geq 1 \text{ см}$ характерные размеры ячейки не должны превышать 5 мм.

Кроме того, должен быть обеспечен надежный электрический контакт полотна с остальными металлическими конструкциями самолета. Это требуется для обеспечения надежного приема и передачи волн в диапазоне частот 2-30 МГц, когда весь самолет является приемно-передающей антенной (длина волны такого излучения $\lambda = 10-150 \text{ м}$ оказывается сравнимой с характерными размерами планера).

Элементы самолета в области прямого контакта с молнией (в частности, кессон стабилизатора (КС) и конечная часть крыла (КЧК)). Для этих элементов высока вероятность начального контакта с молнией с высокой (зона 1В [11]: задняя часть КЧК и задняя угловая часть КС) или низкой (зона 1А [11]: передняя часть КЧК, передняя крайняя часть КС) вероятностями задержки. Части элементов, расположенные ближе к основному корпусу, работают в более мягких условиях (зоны 2В и 2А), в которых велика вероятность контакта с каналом молнии, смещающимся с зон более раннего контакта). Тем не менее, прожигающее действие может реализоваться и в этих зонах, что требует соответствующих мер защиты. Сечения КС и КЧК не достаточны для обеспечения прохождения через них тока молнии и необходимо уменьшение электрического сопротивления этих элементов конструкции.

Как показывает приведенный выше краткий обзор конструктивных средств молниезащиты, наиболее эффективной защитой от прожига оказываются напыленные металлические пленки из меди и молибдена. Проведенные оценки и анализ экспериментальных данных позволяют сделать вывод, что толщина металлической пленки должна составлять 10-20 мкм. Учитывая представленные в

таблице 7 данные по уносу от действия излучения из канала разряда, получаем, что на внешнюю поверхность защищаемых элементов необходимо нанести методами газотермического напыления слой меди (толщиной 40-50 мкм с весовыми затратами 360-450г/м²) или молибдена (толщиной 25-35 мкм с весовыми затратами 250-350г/м²). Кроме того, в зонах 1В представляется целесообразным спрофилировать толщину слоя металла так, чтобы спровоцировать срыв молнии с защищаемых элементов (для этого требуется сделать профиль с толщиной, увеличивающейся к краю, который расположен ниже по потоку набегающего воздуха). Как уже отмечалось, дальнейшее увеличение толщины защитных металлических слоев нецелесообразно, поскольку может привести к нежелательной задержке молнии в фиксированной области защищаемого элемента.

Уменьшение электрического сопротивления КС и КЧК может быть достигнуто с помощью рассмотренного выше углеродного молниезащитного покрытия для углепластиков. Целесообразность применения этого конструктивного средства молниезащиты обуславливается тем, что диэлектрический и токопроводящий слои углеродного покрытия могут изготавливаться в едином технологическом цикле с защищаемой углепластиковой конструкцией методом прямого прессования.

На все защищаемые элементы должны быть нанесены лакокрасочные токопроводящие покрытия для обеспечения выравнивания потенциала на поверхности углепластиковых конструкций после удара молнии и дополнительной защиты от прожигания дуговым пятном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишняков Л.Р., Коханый В.А., Коханая И.Н., Андриенко Е.М. Разработка сеток для молниезащитных авиационных конструкций из полимерных материалов. // Материалы XXV Международной конференции "Композиционные материалы в промышленности". Украинский инф. Центр "Наука. Техника. Технология", 2005г., стр. 277.
2. Патент Франции 2582987, В 29 С 67/12, 1987.
3. <http://www.dexmet.com/Lightning-Strike-Protection/>
4. http://www.skyshop.com.au/pdf/2009-2010_catalog%20181.pdf
5. Каблов Е.Н.; Гуняев Г.М.; Ильченко С.И.; Пономарев А.Н.; Кавун Т.Н.; Комарова О.А.; Копылов А.Е. Многослойное молниезащитное покрытие. ФГУП «ВНИИАМ». Патент Российской Федерации RU2217320. 2002.
6. Хасуй А. Техника напыления. Перевод с японского Масленникова С.Л.. М. Изд-во Машиностроение. 1975.
7. Квалификационные требования (КТ-160Д). Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. Авиационный регистр межгосударственного авиационного комитета. Армак. 2004.

8. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
9. *Троцкий О.А.* Молнии – оружие богов. - М.: Информэлектро, 1998.
10. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний. 2002.
11. *Alain Broc, Philippe Lalande, Emmanuel Montreuil, and et al.* A lightning swept stroke model: A valuable tool to investigate the lightning strike to aircraft. *Aerospace Science and Technology* 10 (2006). P. 700-708.

Protection from lightning for carbon plastics elements of an aircraft structures at thermal and mechanical actions of a fireflaught direct stroke

A.V. OSTRUK, *A.A. FILIPENKO

Institute for Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka

*Central Scientific Research Institute of Special Mechanical Engineering, Khotkovo

In work modern methods of protection for carbon plastics elements of an aircraft structures from thermal and mechanical actions of a direct stroke of a lightning are considered. Estimations of the contribution of various physical processes in design damage are resulted. The general recommendations on protection from lightning for carbon plastics elements are made at a fireflaught direct stroke.

Keywords: the protection from lightning; carbon plastics elements of an aircraft structures; fireflaught direct stroke; thermal and mechanical actions.