

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА К ПРЯМОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ. ЧАСТЬ 1: СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЕВОЙ ОБШИВКИ

*Дослідним шляхом отримані результати проплавлення і відповідно електротермічній стійкості виконаних з різних алюмінієвих сплавів з різною товщиною листових зразків обшивки літального апарату у разі прямої роздільної або сумісної дії на них імпульсної А– або тривалої С– компоненти струму штучної блискавки з нормованими амплітудно-тимчасовими параметрами.*

*Опытным путем получены результаты проплавления и соответственно электротермической стойкости выполненных из различных алюминиевых сплавов с различными толщинами листовых образцов обшивки летательного аппарата в случае прямого раздельного или совместного воздействия на них импульсной А– или длительной С– компоненты тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами.*

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно требованиям действующих международных нормативно-технических документов, представленных в [1-4], основные технические системы, устройства и элементы летательных аппаратов (ЛА) гражданского и военного назначения должны проверяться на прямое воздействие на них соответствующих компонент тока искусственной молнии. Как известно, к таким токовым компонентам относятся [1-4]: импульсная А, промежуточная В, укороченная длительная С\*, длительная С и повторная импульсная D составляющие тока искусственной молнии, амплитудно-временные параметры (АВП) которых приведены в указанных выше нормативных документах. В этих же документах определен порядок токового нагружения испытываемых объектов (ИО) при определении их устойчивости к прямым воздействиям имитированных грозовых разрядов, включающий как раздельное, так и совместное воздействие на них тех или иных компонент тока молнии с нормированными АВП. Для практической реализации изложенных в [1-4] требований при испытаниях ЛА на молниестойкость в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в 2007 г. на исследовательско-испытательном полигоне института был создан генератор тока искусственной молнии (ГТМ) с суммарной запасаемой электрической энергией до 1 МДж, содержащий в своем составе пять отдельных генераторов импульсных токов (ГИТ) [5-8]. Данные ГИТ, построенные по классической схеме на основе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), при своем разряде воспроизводят на электрической нагрузке (объекте исследований) требуемые по условиям проведения испытаний согласно [1-4] импульсы тока искусственной молнии, из которых импульсная А- и длительная С- компоненты тока являются определяющими по электротермическому действию на ИО.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛА К ТОКУ ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

В качестве исследуемого опытным путем на молниестойкость металлического элемента ЛА выберем его электропроводящую обшивку. Принимаем, что исследуемый в ГТМ металлический элемент обшивки

ЛА представляет собой плоский листовый образец без защитного покрытия, который может быть выполнен из различных марок алюминиевого сплава (например, из АМг2М, А0М и АД5М) с размером в плане 0,5×0,5 м<sup>2</sup>. Пусть толщина  $h$  такого плоского листового образца обшивки ЛА изменяется в пределах от 1 до 5 мм. Рассмотрим приведенную на рис. 1 двухэлектродную систему (ДЭС) рабочего стола ГТМ и принципиальные электрические схемы генераторов ГИТ-А и ГИТ-С (рис. 2), предназначенных в составе мощного ГТМ для формирования на общей электрической нагрузке (испытываемом листовом образце обшивки ЛА) либо отдельно импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии или их требуемым образом в соответствии с [1-4] разнесенной во времени совместной комбинации.

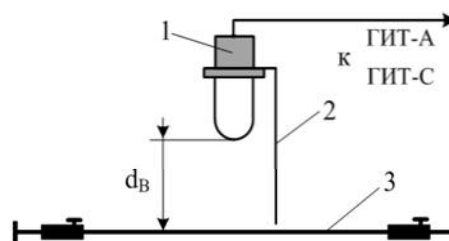


Рис. 1. Схематическое изображение ДЭС, используемой в разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С при получении в листовых ИО импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии (1 – верхний массивный стальной электрод; 2 – тонкий медный ЭВП; 3 – нижний массивный алюминиевый электрод рабочего стола ГТМ)

Отметим, что согласно международным требованиям [1-4] данные компоненты тока искусственной молнии (обычно отрицательной полярности) характеризуются следующими основными нормированными АВП: а) импульсная А- компонента тока молнии – амплитудой тока  $I_{mA} = 200$  кА с допуском  $\pm 10\%$ ; интегралом действия  $J_{dA} = 2 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с при допуске  $\pm 20\%$ ; временем амплитуды тока  $t_{mA} \leq 50$  мкс; длительностью протекания  $\tau_A \leq 500$  мкс; б) длительная С- компонента тока молнии – амплитудой тока до  $I_{mC} = 0,8$  кА; количеством электричества  $Q_C = 200$  Кл при допуске  $\pm 20\%$ ; длительностью протекания  $0,25$  с  $\leq \tau_C \leq 1$  с. Принима-

ем, что в проводимых экспериментах длина  $d_B$  воздушного промежутка над ИО между верхним 1 и нижним 3 массивными металлическими электродами ДЭС рабочего стола ГТМ (см. рис. 1), в котором искусственно формируется сильноточный плазменный канал (СПК) искрового грозового разряда, составляет не менее 25 мм, а длина тонкого медного электрически взрывающегося проводника (ЭВП) диаметром 0,2 мм над плоским массивным алюминиевым электродом 3 или испытываемым листовым образцом обшивки ЛА по требованиям [1-4] равна 50 мм. Считаем, что указанная выше ДЭС с воздушным промежутком длиной  $d_B$  выполняет роль эквивалента электрической нагрузки для разрядных цепей генераторов ГИТ-А и ГИТ-С.

Пусть отрицательное зарядное напряжение  $U_{3A}$  для ГИТ-А равно 27 кВ, а отрицательное зарядное напряжение  $U_{3C}$  для ГИТ-С –4,2 кВ. Согласно данным схемы на рис. 2 основные электрические параметры разрядных цепей ГТМ, используемых при рассматриваемых испытаниях листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА, имеют следующие значения [5-8]: для ГИТ-А –  $C_A = 333$  мкФ;  $L_A = 2,05$  мГн;  $R_A = 0,061$  Ом; для ГИТ-С –  $C_C = 45,36$  мФ;  $L_C = 11,43$  мГн;  $R_C = 4,74$  Ом. Примем, что в эквиваленте электрической нагрузки примененного при испытаниях листовых ИО мощного ГТМ квадратная пластина нижнего электрода 3 в воздушной ДЭС рабочего стола генератора молнии выполнена из алюминиевого сплава марки АМц с толщиной стенки 2 мм и размерами в плане  $0,5 \times 0,5$  м<sup>2</sup>.

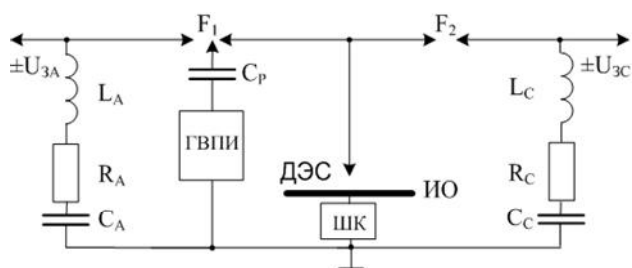


Рис. 2. Принципиальные электрические схемы разрядных цепей генераторов ГИТ-А и ГИТ-С для формирования в испытываемом листовом образце обшивки ЛА импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

В соответствии со схемой рис. 2 полагаем, что электрический запуск высоковольтных воздушных коммутаторов ГИТ-А (трехэлектродного разрядника  $F_1$ ) и ГИТ-С (двухэлектродного разрядника  $F_2$ ) осуществляется путем подачи на них через разделительную емкость  $C_P = 180$  пФ от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) управляющего микросекундного импульса напряжения амплитудой 100 кВ соответствующей полярности (например, положительной при отрицательном зарядном напряжении для генераторов ГИТ-А и ГИТ-С). Принимаем, что СПК в воздушном промежутке ДЭС (например, длиной  $d_B = 25$  мм) над нижним алюминиевым электродом 3 инициируется при помощи закрепленного на верхнем стальном электроде 1 указанного ЭВП (тонкого без изоляции прямолинейного медного провода 2 диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм), показанного на

рис. 1 и 3 и отделенного от нижнего алюминиевого электрода 3 воздушным промежутком длиной 1 мм. Измерение АВП формируемых в испытываемых листовых образцах обшивки ЛА компонент тока искусственной молнии выполняется при помощи метрологически поверенного измерительного коаксиального шунта ШК-300, имеющего два выхода с различными значениями коэффициента преобразования  $K_{ш}$  [5, 7].

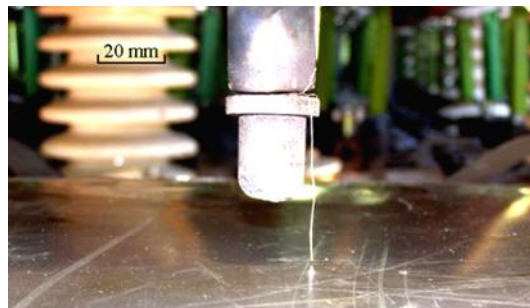


Рис. 3. Внешний вид ДЭС при испытаниях листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА в ГТМ на электротермическую стойкость к прямому действию на них импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

В соответствии с [5, 7] считаем, что при измерении АВП импульсной А- компоненты тока молнии коэффициент преобразования  $K_{шA}$  для шунта ШК-300, соединенного триаксиальной кабельной линией связи длиной 60 м с регистрирующей аппаратурой, равен 11261 А/В, а при фиксации АВП длительной С- компоненты тока молнии коэффициент преобразования используемого шунта составляет  $K_{шC} = 5642$  А/В. Требуется по результатам опытного электротеплового воздействия на испытываемые листовые образцы алюминиевой обшивки ЛА имитируемых в мощном ГТМ импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП, получаемых в сильноточных разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С согласно рис. 2 с СПК атмосферного воздушно-искрового грозового разряда длиной до 25 мм в их ДЭС, определить основные характеристики зон проплавления (их радиусы на наружной  $r_n$  и внутренней  $r_v$  плоских поверхностях образцов и их глубины  $h_n$ ) в указанных листовых образцах обшивки ЛА и соответственно оценить по критерию  $h_n < h$  электротермическую стойкость испытываемых образцов к прямому действию на них рассматриваемых токовых компонент имитированного грозового разряда [9].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЕВОЙ ОБШИВКИ ЛА К ОСНОВНЫМ КОМПОНЕНТАМ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

**1. Осциллограммы испытательных компонент тока искусственной молнии.** Согласно рис. 2 при подаче от генератора ГВПИ на управляющий электрод трехэлектродного воздушного разрядника  $F_1$  каскадного исполнения [5, 6] поджигающего импульса напряжения амплитудой 100 кВ положительной полярности предварительно заряженный до отрицательного напряжения  $U_{3A} = -27$  кВ ЕНЭ генератора ГИТ-А раз-

рывается на описанную в разделе 1 ДЭС с ИО и формирует в испытываемом листовом образце алюминиевой обшивки ЛА требуемую в соответствии с [1-4] импульсную А- компоненту тока молнии. На рис. 4 приведена типовая осциллограмма такого испытательного импульса тока, полученная с помощью измерительного коаксиального шунта ШК-300 и цифрового запоминающего осциллографа типа *Tektronix TDS 1012* (масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка).

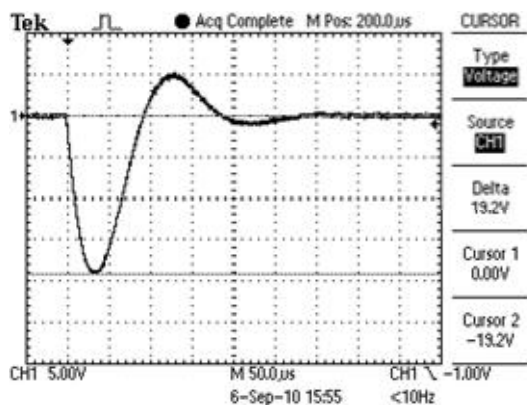


Рис. 4. Типовая осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии при разряде генератора ГИТ-А на ДЭС с воздушным зазором 25 мм и испытываемым листовым образцом обшивки ЛА толщиной 3 мм из алюминиевого сплава АМг2М ( $U_{3A} = -27$  кВ)

Из приведенной на рис. 4 осциллограммы импульсной А- компоненты тока молнии видно, что ее первая амплитуда  $I_{mA}$  будет примерно равной  $19,2 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 216,2 \text{ кА}$ . Данной амплитуде  $I_{mA}$  импульсного тока молнии соответствует время, равное  $t_{mA} = 32$  мкс. Переход через ось абсцисс первой отрицательной полуволны А- компоненты тока молнии происходит при времени  $t_{A1} = 90$  мкс, а ее второй положительной полуволны – при времени около  $t_{A2} = 180$  мкс. Амплитуда второй положительной полуволны рассматриваемого тока не превышает 56,3 кА. Импульсная А- компонента тока искусственной молнии, генерируемая ГИТ-А на принятой электрической нагрузке (образце), характеризуется достаточно сильным затуханием (логарифмический декремент колебаний составляет не менее 2,732 при коэффициенте затухания в разрядной цепи генератора ГИТ-А, равном около  $15,17 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ). Численное значение интеграла действия для рассматриваемой импульсной А- компоненты имитированного тока молнии при ее длительности  $\tau_A = 500$  мкс оказывается равным  $J_{dA} = 2,03 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ .

На рис. 5 представлена типовая осциллограмма длительной С- компоненты тока искусственной молнии, полученной в рассматриваемой согласно рис. 2 электрической схеме разряда генератора ГИТ-С при  $d_B = 25$  мм и  $U_{3C} = -4,2$  кВ с помощью измерительного коаксиального шунта ШК-300 и цифрового запоминающего осциллографа типа *Tektronix TDS 1012* (масштаб по вертикали – 50 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка). Из данных рис. 5 следует, что в этом случае амплитуда  $I_{mC}$  отрицательной аperiодической волны длительной С- компоненты

имитированного тока молнии оказывается равной около  $0,154 \text{ В} \times 5642 \text{ А/В} = 0,869 \text{ кА}$ . Этой токовой амплитуде  $I_{mC}$  соответствует время, равное  $t_{mC} = 11$  мс. Длительность протекания по испытываемому листовому образцу алюминиевой обшивки ЛА сформированной в разрядной цепи ГИТ-С длительной С- компоненты тока искусственной молнии равна около  $\tau_C = 1000$  мс, а переносимое ею количество электричества (заряд) составляет примерно  $Q_C = 216$  Кл.

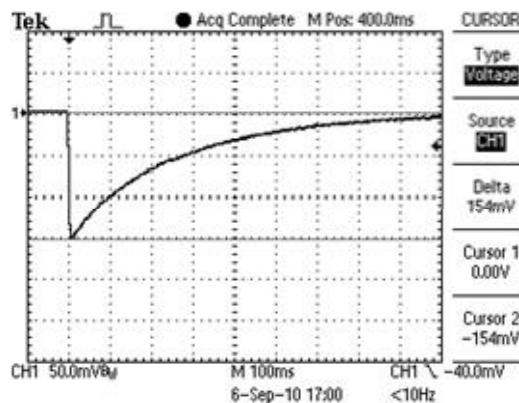


Рис. 5. Типовая осциллограмма длительной С- компоненты тока искусственной молнии при разряде генератора ГИТ-С на ДЭС с воздушным зазором 25 мм и испытываемым листовым образцом обшивки ЛА толщиной 3 мм из алюминиевого сплава АМг2М ( $U_{3C} = -4,2$  кВ)

Заметим, что в ходе проведенных испытаний образцов алюминиевой обшивки ЛА на молниестойкость экспериментально зафиксированные АВП используемых компонент имитированного в цепях ГИТ-А и ГИТ-С тока молнии при неизменных значениях их зарядных напряжений  $U_{3A} = -27$  кВ и  $U_{3C} = -4,2$  кВ изменялись из-за варьирования толщин  $h$  листовых образцов в пределах от 1 до 5 мм не более чем на 2 %.

**2. Особенности проплавления листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА от действия тока искусственной молнии.** На рис. 6 приведен типовой внешний вид термического повреждения испытываемых листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА при воздействии на них лишь импульсной А- компоненты тока молнии с нормированными АВП.

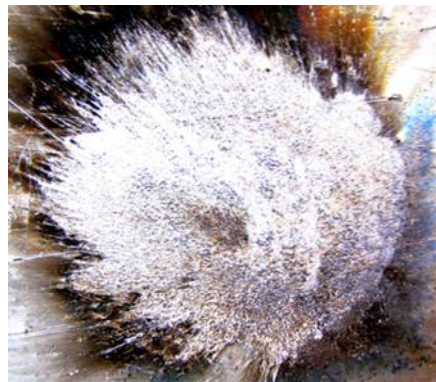


Рис. 6. Типовой внешний вид зоны частичного проплавления образца обшивки ЛА из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 3 мм при воздействии на него в воздухе СПК импульсной А- компоненты тока искусственной молнии

В результате выполненных экспериментов было установлено, что при действии в атмосферном воздухе СПК от импульсной А- компоненты тока молнии ( $I_{mA} = 216,2$  кА;  $t_{mA} = 32$  мкс;  $\tau_A = 500$  мкс;  $J_{dA} = 2,03 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с) на исследуемые образцы обшивки ЛА из алюминиевых сплавов АМг2М, А0М и АД5М на их наружной поверхности, обращенной к ДЭС и взрывающимся медным проволочкам ЭВП, возникает лунка частичного проплавления тарельчатой формы наружным радиусом  $r_n = 30,5$  мм и глубиной около  $h_n = 100$  мкм. Измерение геометрических размеров лунок проплавления в испытываемых листовых образцах выполнялось при помощи специального микрометра и стандартного штангенциркуля, показанных на рис. 7 и 8.



Рис. 7. Внешний вид специального микрометра, примененного при определении глубины проплавления  $h_n$  в листовых образцах алюминиевой обшивки ЛА от поражающего действия на них в воздухе СПК тока искусственной молнии

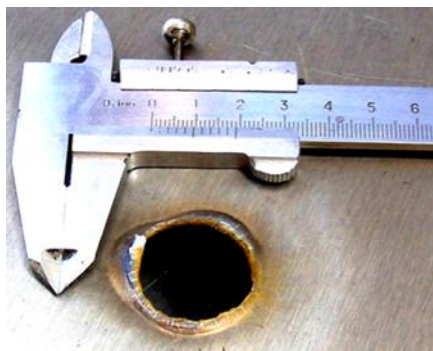


Рис. 8. Внешний вид внутренней зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1 мм от действия длительной С- компоненты тока молнии

На рис. 8 представлен общий вид зоны термического повреждения для образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1 мм (со стороны его внутренней поверхности) от действия на него в атмосферном воздухе СПК лишь длительной С- компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП ( $I_{mC} = 0,869$  кА;  $t_{mC} = 11$  мс;  $\tau_C = 1000$  мс;  $Q_C = 216$  Кл).

На рис. 9 приведен общий вид зоны электротермического повреждения от действия в атмосферном воздухе СПК длительной С- компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП для листового образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1 мм со стороны его наружной поверхности.

Из данных рис. 8 и 9 видно, что в рассматриваемом случае отдельного электротермического воздействия длительной С- компоненты тока молнии с при-

нятыми АВП округлая лунка сквозного проплавления для исследуемого образца из алюминиевого сплава АМг2М ( $h = 1$  мм) характеризуется наружным  $r_n = 12,75$  мм и внутренним  $r_b = 12$  мм радиусами. При совместном воздействии на указанный образец алюминиевой обшивки ЛА толщиной 1 мм вначале импульсной А-, а затем длительной С- компонент тока молнии с нормированными АВП общие виды возникающей в нем зоны сквозного проплавления представлены на рис. 10 (для наружной поверхности образца) и рис. 11 (для внутренней поверхности образца). При этом на наружной поверхности образца округлая лунка сквозного проплавления имеет примерно радиус  $r_n = 13$  мм, а на его внутренней поверхности – радиус  $r_b = 12,25$  мм.

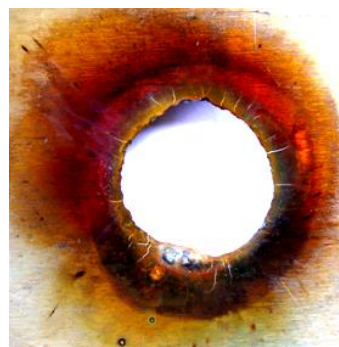


Рис. 9. Внешний вид наружной зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1 мм от действия длительной С- компоненты тока молнии

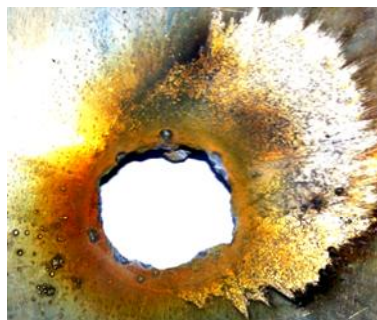


Рис. 10. Внешний вид наружной зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

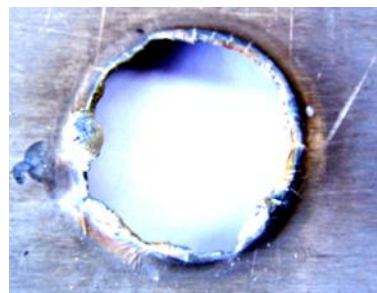


Рис. 11. Внешний вид внутренней зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

Из данных рис. 8-11 следует, что результаты проплавления листового образца обшивки ЛА из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1 мм от совместного действия в атмосферном воздухе на него указанных выше А- и С- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП фактически не отличаются от электротермических результатов раздельного действия на его стенку вначале импульсной А-, а затем длительной С- компоненты тока молнии.

Результаты проплавления листового образца обшивки ЛА из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 2 мм от совместного действия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с принятыми нами АВП представлены на рис. 12 (для наружной поверхности образца) и рис. 13 (для внутренней поверхности образца). На основании обследования зоны поражения исследуемого образца испытательным током молнии было установлено, что в этом случае имеет место сквозное проплавление образца. Округлая лунка конической формы сквозного проплавления в своем основании, расположенном на наружной плоской поверхности образца, приближенно характеризуется наружным радиусом  $r_n = 3$  мм (см. рис. 12). Срезанная вершина данной лунки, выходящая на внутреннюю плоскую поверхность образца, имеет внутренний радиус округлой зоны проплавления, равный около  $r_b = 1,75$  мм (см. рис. 13).

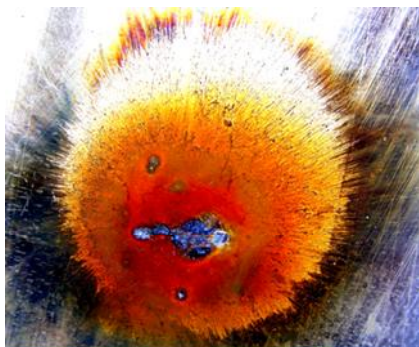


Рис. 12. Внешний вид наружной зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 2 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

На рис. 13 рядом с конусом проплавления на внутренней плоской поверхности образца хорошо виден в полутоне округлый пояс зоны подплавления его материала, составляющий по ширине до 0,5 мм.

Выполненные эксперименты показали, что для листового образца из алюминиевого сплава АМг2М с толщиной стенки  $h = 2$  мм результаты электротермического воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с АВП, указанными выше в п. 1 раздела 2, в режимах то ли раздельного, то ли совместного протекания по нему данных токовых компонент молнии по геометрическим характеристикам зон проплавления в его стенке практически не отличаются друг от друга.

На рис. 14 и 15 приведены результаты воздействия на листовую образец обшивки ЛА из алюминиевого сплава А0М толщиной 3 мм только длительной С-

компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП ( $I_{mC} = 0,87$  кА;  $t_{mC} = 11$  мс;  $\tau_C = 1000$  мс;  $Q_C = 217$  Кл), касающиеся соответственно зон его проплавления от прямого действия ее СПК на наружной (рис. 14) и внутренней (рис. 15) поверхностях.



Рис. 13. Внешний вид внутренней зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава АМг2М толщиной 2 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

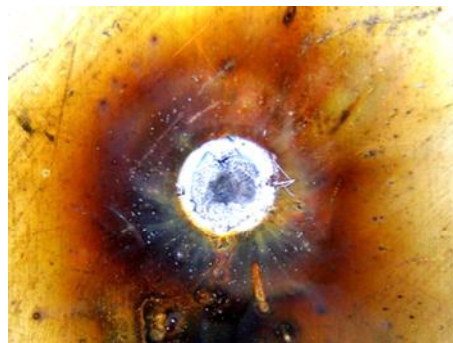


Рис. 14. Внешний вид наружной зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава А0М толщиной 3 мм от действия длительной С- компоненты тока молнии



Рис. 15. Внешний вид внутренней зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава А0М толщиной 3 мм от действия длительной С- компоненты тока молнии

Обработка результатов прямого электротермического воздействия на данный образец длительной С- компоненты имитированного тока молнии показала, что при этом округлая лунка сквозного проплавления в нем имеет коническую форму с наружным  $r_n = 2,65$  мм и внутренним  $r_b = 0,75$  мм радиусами. На рис. 14 хорошо видна центральная светлая округлая зона пе-

регрева и расплавления материала алюминиевого образца на наружной поверхности его стенки (с температурой свыше 658 °С [9, 10]), соответствующая основанию конуса проплавления диаметром до 5,3 мм.

На внутренней поверхности листового образца ( $h = 3$  мм) из алюминиевого сплава А0М вокруг вышедшего наружу конуса проплавления отчетливо просматривается округлый светлый пояс зоны подплавления материала этого образца, ширина которого по радиусу составляет до 0,6 мм (см. рис. 15).

Данные рис. 16 и 17 демонстрируют результаты электротермического совместного действия на листовом образце толщиной 4 мм из алюминиевого сплава А0М импульсной А- ( $I_{mA} = 218$  кА;  $t_{mA} = 32$  мкс;  $\tau_A = 500$  мкс;  $J_{dA} = 2,06 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с) и длительной С- ( $I_{mC} = 0,869$  кА;  $t_{mC} = 11$  мс;  $\tau_C = 1000$  мс;  $Q_C = 216$  Кл) компонент тока искусственной молнии. Зоны термического повреждения данного образца обшивки ЛА характеризуются сквозной округлой лункой проплавления с наружным  $r_n = 2,65$  мм (см. центральную светлую округлую зону поражения образца на рис. 16) и внутренним  $r_v = 0,55$  мм (см. центральную округлую зону поражения образца на рис. 17) радиусами.

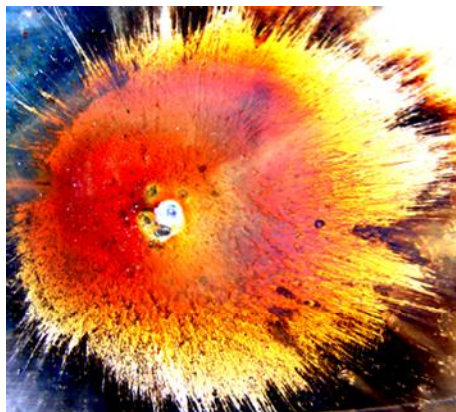


Рис. 16. Внешний вид наружной зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава А0М толщиной 4 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии



Рис. 17. Внешний вид внутренней зоны сквозного проплавления образца из алюминиевого сплава А0М толщиной 4 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

Необходимо отметить, что в ходе проведенных экспериментальных исследований была достоверно установлена следующая особенность поведения образца из сплава А0М в условиях прямого удара в него СПК рассматриваемых компонент тока молнии: результаты совместного действия на исследуемый алюминиевый образец толщиной 4 мм указанных А- и С- компонент тока искусственной молнии мало отличаются от результатов раздельного электротермического действия на его стенку вначале А- компоненты тока молнии, а затем С- компоненты тока молнии с аналогичными нормированными согласно [1-4] АВП.

На рис. 18 и 19 приведены опытные данные по проплавлению листового образца из алюминиевого сплава АД5М толщиной 5 мм в режиме совместного воздействия на него импульсной А- ( $I_{mA} = 220$  кА;  $t_{mA} = 32$  мкс;  $\tau_A = 500$  мкс;  $J_{dA} = 2,1 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с) и длительной С- ( $I_{mC} = 0,869$  кА;  $t_{mC} = 11$  мс;  $\tau_C = 1000$  мс;  $Q_C = 216$  Кл) компонент тока искусственной молнии. В этом случае имеет место частичное проплавление стенки образца, характеризующееся округлой конической лункой проплавления с наружным радиусом около  $r_n = 2,55$  мм (см. центральную светлую расплавленную часть очага поражения испытываемого образца на рис. 18).



Рис. 18. Внешний вид наружной зоны частичного проплавления образца из алюминиевого сплава АД5М толщиной 5 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии



Рис. 19. Внешний вид внутренней зоны частичного проплавления образца из алюминиевого сплава АД5М толщиной 5 мм от совместного воздействия на него импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии

При этом в указанном образце ( $h = 5$  мм) из сплава АД5М вершина конуса проплавления практически упирается в плоскость внутренней поверхности его стенки, что приводит к визуально заметным на ней следам существенного джоулевого нагрева прилегающих к этой поверхности слоев материала исследуемого в разрядных цепях ГТМ листового образца обшивки ЛА (см. рис. 19). Сквозного проплавления стенки данного алюминиевого образца не наблюдается.

Раздельное воздействие на листовой образец из алюминиевого сплава АД5М толщиной 5 мм рассматриваемых основных компонент тока искусственной молнии не приводит к новым экспериментальным результатам его (образца) проплавления.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенной серии экспериментов на открытом атмосферном воздухе с помощью мощного генератора тока искусственной молнии [5-8], воспроизводящего в соответствии с действующими международными нормативно-техническими документами [1-4] его основные компоненты с необходимыми АВП, установлено, что испытываемые листовые образцы из алюминиевых сплавов АМг2М и А0М толщиной 1, 2, 3 и 4 мм без защитных покрытий и размером в плане  $0,5 \times 0,5$  м<sup>2</sup> требованиям электротермической стойкости к имитированному току молнии с нормированными импульсной А- и длительной С- компонентами не удовлетворяют. Листовые образцы из алюминиевого сплава АД5М толщиной 5 мм без защитных покрытий с аналогичными габаритными размерами данным требованиям удовлетворяют.

2. Полученные результаты могут быть определенным образом использованы в авиастроительной и ракетно-космической отраслях Украины и ряда других развитых зарубежных стран при решении проблемы обеспечения молниестойкости металлической обшивки ЛА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока" (США). – 1985. – С. 30-39.
2. SAE ARP 5416/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов" (США). – 1997. – 145 с.
3. КТР-ВВФ/ДО-160D/ED-14D. Квалификационные требования "Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний". Раздел 23.0. "Прямое воздействие молнии". – М.: Изд-во госстандартов Российской Федерации, 2004. – С. 258-273.

4. MIL-STD-464A. Военный стандарт США "Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем", 2002. – 162 с.
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85.
6. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №6. – С.58–62.
7. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 69-75.
8. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощный импульсный генератор тока молнии: разработка и примеры применения / Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы Международной научной конференции (17-21 августа 2009 г.). – Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2009. – С. 113-115.
9. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во "Точка", 2010. – 407 с.
10. Нильсен Х., Хуфнагель В., Ганулис Г. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение): Справочник / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 680 с.

Поступила 15.10.2010

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,  
Кравченко Владимир Иванович, д.т.н., проф.,  
Носенко Марина Александровна  
НИПКИ "Молния"  
Национального технического университета  
"Харьковский политехнический институт".  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. (057) 707-68-41  
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua*

*M.I. Baranov, V.I. Kravchenko, M.A. Nosenko*  
**Experimental researches of electro-thermal stability of metallic elements of aircraft to direct action of current of artificial lightning. Part 1: stability of the aluminium edging.**  
Experimental a way are the results of melting got and according to electro-thermal stability executed from different aluminium alloys with the different thicknesses of sheet standards of edging of aircraft in the case of direct separate or joint action on them impulsive A- or protracted C- components of current of artificial lightning with the rationed peak-temporal parameters.  
**Key words – current of artificial lightning, metallic edging of aircraft, electro-thermal stability.**