

УДК:629.735 (33+35).001

Н. А. Лавро

ТАНТК им. Г.М. Бериева

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МОЛНИЕСТОЙКОСТИ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ САМОЛЕТОВ-АМФИБИЙ

В докладе рассмотрены особенности условий эксплуатации самолетов-амфибий над морской поверхностью, усугубляющие угрозу попадания молний, и приведены результаты работ по созданию новой конструкции панелей топливных баков, которые вдвое легче обычных и превосходят их по молниестойкости.

молниестойкость, топливный бак, самолет-амфибия

Новые конструктивно-технологические решения в авиации

Условия эксплуатации самолетов-амфибий существенно отличаются от условий эксплуатации самолетов аэродромной авиации. Главной отличительной особенностью для амфибий является работа их во влажном атмосферном воздухе вблизи водной поверхности и на воде.

Помимо коррозионных угроз, влажный и содержащий соли морской воздух способствует вблизи водной поверхности образованию молниевых разрядов, попадание которых в пожароопасные зоны самолета чревато пожарами. Наиболее опасными зонами являются места установки топливных баков, закрываемых конструктивными панелями, толщина которых по требованию директивных нормативных документов выбирается из условий противостояния ударам молниевых разрядов.

Специалистами ТАНТК им. Г.М. Бериева проведена работа по созданию конструкций панелей топливных баков с использованием материала типа СИАЛ на основе алюминиевого сплава 1441 для самолета-амфибии Бе-103. Этот самолет, являясь небольшой амфибией местных воздушных линий, имеет ограниченную высотность, в связи с чем опасность его поражения молнией в атмосфере вблизи водной поверхности особенно высока. В соответствии с требованиями АП-23 толщина обшивки для обес-

печения молниестойкости должна быть не менее 2,5 мм. В то же время по расчетам на прочность толщина обшивки бака могло бы составить всего 1,2 мм. Таким образом, изготовление панели бака из монолитного алюминиевого листа утяжеляло бы конструкцию более чем в 2 раза, чего допускать было нельзя. Поэтому была поставлена задача создать легкие молниестойкие панели толщиной менее чем 2,5 мм.

Для достижения поставленной задачи был разработан слоистый композиционный материал, на который получен патент.

В предложенном материале в качестве алюминиевого сплава используется высокомодульный сплав пониженной плотности, содержащий более 1,5% лития, а армирующий наполнитель выполнен в виде однонаправленной стеклоткани с основой из высокомодульных, высокопрочных стеклянных волокон и с утком из волокон легкоплавкого полимерного материала.

Листы выполнены из алюминиевого сплава с литием, имеющего модуль упругости при растяжении не менее 77000 МПа, модуль упругости при сжатии не менее 79000 МПа и плотность не более 2600 кг/м³ при прочности не менее 400 МПа.

Основа армирующего наполнителя состоит из высокомодульных высокопрочных стекловолокон диаметром 5 ... 20 мкм с плотностью 2500 – 2580 кг/м³, пределом прочности 4000 – 5000 МПа, модулем упругости 85 ... 100 ГПа и с плотностью расположения нитей в пределах 20 – 30 нитей/см.

Армирующий наполнитель содержит эластичный легкоплавкий полимерный уток с температурой плавления не выше 150 °С и с плотностью расположения нитей не более 6 на сантиметр. Материал утка выбран с таким условием, чтобы при расплавлении при температуре формования он совмещался со связующим, в качестве которого используется терморезактивное связующее. Оно выполнено на основе смеси эпоксидных смол с различной молекулярной массой и модифицировано каучуком или термопластичным материалом, имеющим температуру отверждения 120 ... 180 °С.

Модуль упругости слоистого композиционного материала в направлении основного армирования более 60 ГПа, а плотность материала менее 2400 кг/м³.

Таким образом, использование в основе слоистого алюмокомпозитного пластика тонких (0,25 ... 1,0) мм листов из алюминиевого сплава, содержащего более 1,5% лития, предпочтительно системы Al-Li-Si-Mg с высоким модулем упругости (не менее 77000 МПа) вместо листов из традиционных среднепрочных сплавов типа дуралюмин Д16 (2024) на основе системы Al-Si-Mg аналогичного назначения с модулем упругости 71500 МПа позволяет повысить модуль упругости при растяжении и сжатии композиционного материала и приблизить его к модулю упругости алюминиевых сплавов, а также превысить значение модуля слоистых алюмокомпозитов.

При этом прочностные характеристики сплава с литием и сплавов Д16 (2024) сопоставимы, а скорость роста трещины усталости ниже, что дополнительно способствует повышению сопротивления разрушению материала.

Кроме того, состав и соотношение элементов алюминиево-литиевого сплава обеспечивают достаточную технологичность и возможность получения традиционным методом тонких листов, необходимых для достижения оптимальных свойств слоистого композиционного материала.

Важным преимуществом алюминиевого сплава с литием является также пониженная плотность (не более 2600 кг/м³) по сравнению с самыми распространенными алюминиевыми сплавами типа Д16 (2770 г/м³) или В95 (2820 кг/м³). Это приводит к дополнительному понижению плотности предлагаемого слоистого алюмокомпозитного пластика, преимущественно до 2300 – 2400 кг/м³, т.е. до диапазона, характерного для класса слоистых алюмокомпозитов АЛОП и АРАЛЛ.

Использование стеклоткани в качестве армирующего наполнителя монослоя пластика более удобно и менее трудоемко в технологическом отношении при производстве препрегов и выкладке пакета композиционного материала по сравнению с армирующими наполнителями в виде ровинга.

Уток из волокон эластичного, легкоплавкого полимерного материала обеспечивает сохранение параллельности волокон в основе ткани, точность ее ориентации и тем самым уменьшает или исключает снижение свойств от несовпадения направлений армирования и приложения эксплуатационных нагрузок.

Свойства однонаправленных пятислойных алюмокомпозитов на базе листов из сплава системы Al-Li-Si-Mg при разных углах приложения нагрузки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение свойств пятислойных алюмокомпозитов
в зависимости от угла α приложения нагрузки

Угол α	Наличие утка	σ_s , МПа	E , Па
0	есть	1050	70
5	есть	920	66
10	есть	790	61
15	есть	630	57

В процессе формования композиционного материала легкоплавкий уток размягчается, а при повышенных температурах расплавляется и совмещается со связующим. Тем самым уменьшаются или устраняются деформация и локальные повреждения стекловолокон по основе и реализуются их высокие прочностные и усталостные свойства в композиционном материале.

Связующее на основе эпоксидных смол с различной молекулярной массой, модифицированных каучуками или термопластами, отверждаемыми при температурах от 120 до 180 °С, обеспечивает монолитность слоя композита, надежную связь между слоями композиционного материала при сохранении свойств листов из алюминиевого сплава, содержащего литий в искусственно состаренном состоянии.

Высокомодульные и высокопрочные тонкие стеклянные волокна с диаметром 5 ... 20 мкм при плотности расположении нитей (20 – 30 нитей/см) вносят существенный вклад в высокий уровень показателей прочности, усталости, трещиностойкости (скорости роста трещины усталости) и других свойств композиционного материала.

Состав, структура и технологические приемы изготовления предложенного слоистого композиционного материала, состоящего из чередующихся листов алюминиевого сплава и слоев композита, позволяют обеспечить повышенный модуль упругости – более 60 ГПа и пониженную плотность – менее 2400 кг/м³.

Для исследования свойств заявленного слоистого композиционного материала были изготовлены образцы трехслойной структуры размером 650 × 650 мм с однонаправленной схемой армирования стеклотканью по основе из высокопрочных стеклянных волокон и с утком малой плотности распределения из волокон легкоплавкого полимерного материала, распределенных в высокопрочном связующем на основе модифицированных эпоксидных смол. Характеристики структуры и свойства компонентов созданного (варианты 1, 2, 3) и известного (вариант 4) слоистых композиционных материалов на основе алюминиевых листов и слоев стеклопластика представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные характеристики структуры
и свойства компонентов МПКМ

Характеристика	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Алюминиевый сплав				Сплав 2024Т3
Содержание Li , %	1,5	1,7	2,0	–
Модуль упругости, ГПа				
E при растяжении	77	79	81	71,5
$E_{сж}$ при сжатии	79	81	83	73,5
Плотность d , кг/м ³	2600	2590	2580	2780
Предел прочн. $\sigma_в$, МПа	400	440	460	440
Стеклоянная ткань				Ровинг
Основа:				
Плотность нитей, н/см	30	25	20	
Стеклоянные волокна:				
Диаметр, мкм	5	10	20	10
Предел прочн. $\sigma_в$, МПа	5000	4700	4000	4700
Модуль упругости, ГПа	85	90	100	85,5
Плотность, d , кг/м ³	2500	2550	2580	2500
Уток:				
Темпер. плавл. $T_{пл.}$, °С	150	140	120	–
Плотность нитей, н/см	4	5	6	–
Связующее:				
Темпер. отверждения $T_{отв.}$, °С	180	150	120	120

Изготовление панелей и образцов для испытаний выполнялось по стандартной технологии, принятой для слоистых металлополимеров.

Плакированные листы анодировались в хромовой кислоте и покрывались адгезионным грунтом. Затем подготовленные алюминиевые листы помещали на плиту и производили укладку препрега и алюминиевых листов для получения необходимого трехслойного строения. Формование производили автоклавным методом. Механические свойства исследовали на образцах, вырезанных из слоистых листов.

Предел прочности и модуль упругости при растяжении определяли на образцах с шириной рабочей части 15 мм и в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Модуль упругости при сжатии определяли на образцах размером 20 – 100 мм согласно ГОСТ 25.003-81.

Трещиностойкость (скорость роста трещины усталости) изучали на образцах размерами 140-120 мм с исходным центральным отверстием диаметром 4 мм и пропилом $2l = 6$ мм при следующих условиях усталостного нагружения: $\sigma_{max} = 120$ МПа, $R = 0$, $f = 5$ гц.

В табл. 3 представлены механические и физические свойства слоистых листов из созданного (варианты 1, 2, 3) и известного (вариант 4) композиционных материалов.

Таблица 3

Механические и физические свойства слоистых листов

Варианты	Предел прочн. при растяж. σ_{σ} , МПа	Модуль упруг. при растяж. E , ГПа	Модуль упруг. При сжатии $E_{сж}$, ГПа	Плотн. d , г/м ³	Скорость роста трещины устал. dI/dN , мкм/цикл при $\Delta K = 31$
1	870	70	72	2350	0,08
2	875	71	73	2380	0,09
3	865	73	75,5	2340	0,09
4	850	66	68	2500	0,1

Как видно из представленных результатов, состав и структура созданного слоистого алюмокомпозитного материала позволили повысить модули упругости при растяжении и сжатии этого класса композиционных материалов

на 6 – 11%, приблизив и даже повысив их значения до наиболее распространенных алюминиевых конструкционных сплавов типа Д16 (2024), В95 (7075), а также снизить на 5 – 6% плотность до уровня ниже 2400 кг/м³, т.е. до уровня наиболее легких слоистых алюмоорганопластиков. При этом были обеспечены высокий уровень характеристик прочности и сопротивления развитию усталостных трещин, а также упрощение сложной технологии изготовления слоистого композиционного материала за счет применения армирующего наполнителя в виде однонаправленной стеклоткани.

Таким образом, предложенная конструкция на базе высокомодульного, легкого, высокопрочного, трещиностойкого слоистого алюмополимерного композиционного материала обеспечивает повышение жесткости, весовой эффективности, ресурса и надежности эксплуатации изделий.

Слоистый композиционный материал, состоящий из чередующихся листов алюминиевого сплава и слоев стеклопластика, предназначен в качестве конструкционного материала для основных элементов планера самолета (обшивок и стрингеров фюзеляжа, крыла и др.) и их ремонта (как стоппер трещин), взамен конструкционных алюминиевых сплавов.

В результате испытаний образцов панелей топливного бака установлено (табл. 4), что при воздействии испытательного импульса тока на панелях, конструктивно выполненных в однослойном варианте из листа металла 1441 – БТ10.8 толщиной 2,5 мм, сквозной прожог отсутствовал. При этом на внутренней стороне имело место образование горячей точки с температурой, не превышающей 180 °С, что является безопасным с точки зрения воспламенения топливо-воздушной смеси (температура воспламенения ≥ 230 °С).

В образцах трехслойной конструкции (рис. 1) наблюдалось проплавление только первого металлического слоя. При этом температура горячих точек не превышала 100 °С.

На образцах, выполненных из стеклопластика толщиной 0,56 мм, при воздействии испытательным импульсом тока происходило обугливание материала по всей толщине листа в месте контакта канала разряда и расслоение листа на площади 30 – 40 мм².

Таблица 4

Результаты испытания панелей кессон-баков самолета Бе-103
на молниестойкость

Образец панели и кол-во шт.	Толщина металла 1441 в мм		Результаты воздействия
	1-й слой	3-й слой	
СИАЛ 2/1–2 шт. (1441 + КМКС 1.80.Т10) ЭА – 103.0114.050 №	0,8	0,5	Расплавление внешнего слоя размером $D = 8 - 13$ мм. Деформация образцов отсутствует
СИАЛ 2/1 – 2 шт. (1441 + КМКС 1.80.Т10) ЭА – 103.0114.060 № 2А	0,5	0,5	Расплавление внешнего слоя размером $D = 12$ мм. Деформация образца в месте контакта канала разряда
Лист 1441-2 шт. ЭА – 03.0160.311 № 2А	2,5		Образование кратера, обугливание краски на обратной стороне панели $S = 60$ мм ²
Лист СТ-69Н-2 шт.	0,56		Обугливание по всей толщине листа в месте контакта разряда, расслоение листа на площади 1200 мм ²



Рис. 1. Панель 2А после испытаний на молниестойкость (наружная сторона слева, внутренняя сторона – справа)

Таким образом, можно сделать вывод, что панели топливного бака, выполненные из трехслойной конструкции толщиной 1,2 мм, не только удовлетворяют требованиям АП-23, но и превосходят по молниестойкости монолитную панель толщиной 2,5 мм.

Литература

1. Винник В.А., Лавро Н.А. Конструктивно-технологические особенности гидросамолетов и самолетов-амфибий // *Авиационная промышленность*. – М.: НИАТ. – 1996. – № 3 – 4.

2. Лавро Н.А., Тимошкин Л.А., Винник В.А., Гузер В.С. Гежа С.А. Применения гибридного композиционного материала в конструкции поплавков и пилонов самолета-амфибии Бе-200 // *Сборник докладов II научной конференции «ГЕЛЕНДЖИК-98»*. – М.: ЦАГИ, 1998.

3. Лавро Н.А., Винник В.А., Гежа С.А. Некоторые особенности и производство элементов конструкций гидросамолетов из полимерных композиционных материалов // *Сборник докладов международного семинара «Инструмент и технологии XXI века»*. – Иркутск, 2002.

4. Патент РФ №2176255 кл. С 08 L 63/00, С 08 K 13/00, В 32 В 17/10 Состав для получения связующего для препрегов, способ получения связующего для препрегов, препрег и изделие / Г.И. Шокин, И.Н. Лямина, Л.С. Беспалова, Ю.О. Попов, А.И. Пузеев, Т.В. Колокольцева, Н.А. Лавро, П.В. Панченко, И.С. Коган.

5. Патент РФ №2185964 С1 кл. В 32 В 15/08, 15/14, 15/20 Слоистый композиционный материал и изделие, выполненное из него / Е.Н. Каблов, И.Н. Фридляндер, Л.И. Аниховская, О.Г. Сенаторова, Л.А. Дементьева, В.В. Сидельников, А.Б. Лямин, С.А. Каримова, В.С. Сандлер, Н.А. Лавро, П.В. Панченко.

6. Патент РФ на промышленный образец №53590 Легкий самолет-амфибия / Г.С. Панатов, Н.А. Лавро, В.Н. Коноплев, И.М. Забалуев, В.П. Воронцов, В.Н. Кравцов.

Поступила в редакцию 02.04.2005