

УДК 669.018.29

В.В. Антипов¹, Н.Ю. Серебrenникова¹, В.В. Шестов¹, В.В. Сидельников¹

СЛОИСТЫЕ ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224

Появление металлополимерных слоистых материалов – логический шаг в развитии идеи, технологии и опыта широкого применения клееных слоистых материалов и конструкций, обладающих повышенной живучестью и надежностью. Такие материалы являются новым семейством конструкционных гибридных листовых материалов, предназначенных для использования в элементах летательных аппаратов. Металлополимерные материалы включают тонкие металлические листы и промежуточные тонкие слои полимерных композитов, состоящих из терморезактивных или термопластичных связующих с высокопрочными армирующими волокнами.

Уникальный комплекс характеристик слоистых металлополимеров (высокая трещиностойкость и удельная статическая прочность, хорошие выносливость, коррозионные и ударные свойства, повышенная пожаростойкость) по сравнению с монолитными алюминиевыми листами делает этот материал перспективным для будущих поколений авиационных конструкций.

Ключевые слова: слоистый алюмокомпозит, гибридный материал, высокопрочный алюминий-литиевый сплав.

V.V. Antipov, N.Yu. Serebrennikova, V.V. Shestov, V.V. Sidelnikov

Laminated hybrid materials on basis of Al–Li alloy sheets

Creation of metal-polymeric laminates is a logical step in development of the idea, technology and experience of wide application of adhesive laminates and structures possessing a higher survivability and reliability. They appeared to be a new family of structural hybrid sheet materials, designated, first of all, for a usage in primary components of aircraft. They include thin metallic sheets and intermediate thin interlayers of polymeric composites, consisting of thermosetting or thermoplastic binders with high-strength reinforced fibers.

The unique combination of fiber metal laminates (FML) characteristics (high crack resistance and specific static strength, good fatigue, corrosion, impact

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

performances, fire resistance) makes this material as the advanced one for future generation of aviation structures in comparison with monolithic aluminium sheets.

Keywords: *fiber metal laminates, hybrid material, high-strength Al–Li alloy.*

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

В настоящее время ведутся работы по созданию слоистых гибридных металлополимерных композиционных материалов (СИАЛ – в России, GLARE – за рубежом), которые являются новым классом конструкционных листовых материалов, предназначенных для использования в элементах летательных аппаратов (обшивка фюзеляжа). Такие материалы обладают высоким сопротивлением развитию трещины усталости, пониженной плотностью и высокой прочностью по сравнению с монолитными алюминиевыми листами [1–3].

Во ФГУП «ВИАМ» ведутся работы по разработке, изготовлению и испытанию слоистых гибридных материалов. В институте имеются лаборатории, занимающиеся разработкой и освоением алюминиевых сплавов и полуфабрикатов, клееных материалов и стеклопластиков. Слоистые клееные материалы и конструкции широко применены в широкофюзеляжных самолетах Ил-86, Ил-96 и др. Разработаны методы формования в автоклавах и прессах слоистых конструкций с предварительной подготовкой поверхности листов из алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов.

В институте имеется большой опыт испытаний комплекса механических, коррозионных, технологических свойств материалов применительно к условиям работы самолетных конструкций. Испытания СИАЛов базируются на методах определения статических и усталостных свойств, характеристик трещиностойкости (dl/dN , K_c^y и др.), принятых для листов из алюминиевых сплавов, а также на методах испытания клеевых соединений (на сдвиг, отслаивание). Коррозионные испытания выполняются в различных средах: искусственных – тропический климат и солевой туман, естественная атмосфера; морская и промышленная среды.

Алюмостеклопластик типа СИАЛ состоит из тонких листов толщиной 0,3–0,5 мм алюминиевых (1163, Д16ч., В95п.ч.) или алюминий-литиевых (1441, В-1469) сплавов и прослоек толщиной 0,2–0,5 мм из пластика на основе клеевых препрегов, армированных высокопрочными стеклонаполнителями (рис. 1). Изготавливают СИАЛы преимущественно автоклавным формованием. Расположение и количество монослоев определяется назначением и габаритами детали [4, 5].

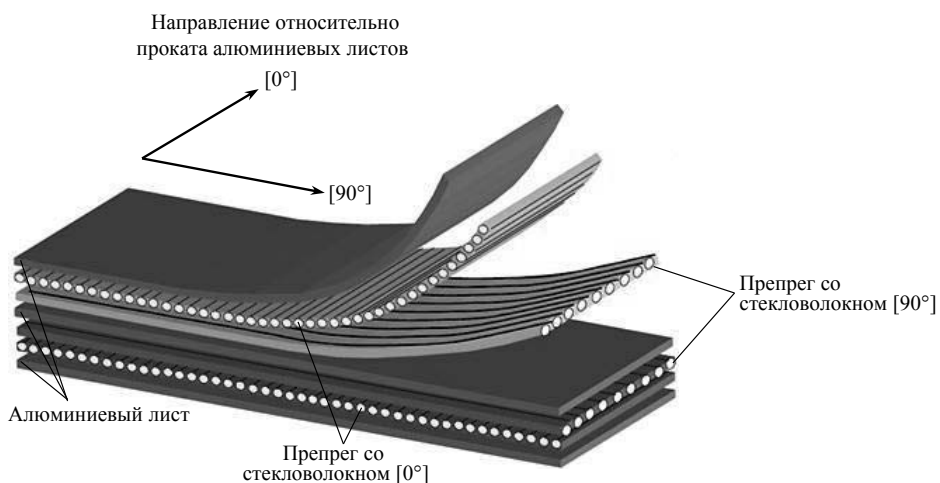


Рис. 1. Структура пятислойного равнопрочного алюмокомпозита

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработан алюмокомпозит на базе алюминий-литиевого высокотехнологичного сплава марки 1441 пониженной плотности ($d=2,59 \text{ г/см}^3$) [6, 7]. Для повышения прочностных характеристик также разработан новый алюмокомпозит на базе листов из сплава В-1469, обладающий более высокими удельной прочностью и пределом текучести по сравнению со сплавом 1441. Эта композиция обеспечила повышение предела текучести алюмокомпозита при сохранении характеристик выносливости и трещиностойкости на высоком уровне [8, 9].

Применение листов из высокомодульных алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности 1441 и В-1469 в составе слоистого алюмокомпозита обосновывается следующими преимуществами:

- исследования и испытания листов из сплава марки 1441 показали, что по комплексу прочностных и ресурсных характеристик они не уступают листам из сплава типа дуралюмин марки 1163-Т (зарубежный аналог – сплав марки 2524-Т3) в естественно состаренном состоянии, которые считаются во всем мире наиболее ресурсными и применяются до настоящего времени в качестве обшивок фюзеляжа современных самолетов;

- сплав В-1469 по удельной прочности превосходит существующие алюминиевые деформируемые сплавы и при этом обладает высокими характеристиками трещиностойкости и усталостной долговечности;

- сплав марки 1441 обладает наилучшей технологичностью при холодной прокатке среди алюминий-литиевых сплавов – из него можно изготавливать рулонным методом тонкие (толщина 0,3–0,5 мм) листы с различным состоянием поверхности;

– правильно подобранные допустимая степень деформации и режим промежуточного смягчающего отжига позволили получить листы толщиной до 0,5 мм из сплава В-1469 без применения дополнительных промежуточных отжигов и технологической плакировки;

– помимо низкой плотности и повышенного модуля упругости листы из сплавов В-1469-Т1 и 1441-Т11 обладают повышенными теплостойкостью и температурой эксплуатации до 120 вместо 80°С для сплавов типа дуралюмин.

Зарубежный алюмокомпозит GLARE применен для верхних обшивок, горизонтального и вертикального хвостового оперения и соединительных лент отсеков фюзеляжа самолета А-380 (~470 м² материала), что привело к снижению массы элементов конструкции более чем на 500 кг [9]. Максимальный размер панелей фюзеляжа из материала GLARE составляет 10,5×3,5 м (табл. 1).

Таблица 1

Разработанные типы материала СИАЛ (зарубежный аналог – GLARE)

СИАЛ		GLARE		Направление армирующих монослоев в пластике
Марка	А1 лист	Марка**	А1 лист	
СИАЛ-1*	В95о.ч.-Т2	GLARE 1	7475-Т76	Однонаправленное [0°/0°]
СИАЛ-1-1*, СИАЛ-1-1Р**	1441-Т11	GLARE 2 (GLARE 2А, GLARE 2В)	2024-Т3	То же
СИАЛ-1-4Р**	В-1469-Т1			
СИАЛ-3-1*, СИАЛ-3-1Р**	1441-Т11	GLARE 3	2024-Т3	Перекрестное [0°/90°]
СИАЛ-2*	Д16ч.-Т, 1441-Т11	GLARE 4 (GLARE 4А, GLARE 4В)	2024-Т3	Перекрестное [0°/90°/0°]
–	–	GLARE 5	2024-Т3	Перекрестное [0°/90°/90°/0°]
СИАЛ-3-2Р**	1441-Т11, В-1469-Т1	–	–	Перекрестное [0°/90°]
СИАЛ-3-6Т*	АВТ1, 1441-Т11	–	–	То же

* Армирование стеклотканью.

** Армирование стеклоровингом.

Слоистые материалы обладают уникальным комплексом свойств по сравнению с монолитными алюминиевыми листами: высокой трещиностойкостью – на порядок выше значения сопротивления роста трещины усталости (СРТУ: $dI/dN < 0,3$ мм/цикл при $\Delta K = 31$ МПа $\sqrt{м}$), пониженной плотностью – на 10–15%, высокой прочностью ($\sigma_b > 600$ МПа), а также повышенными жаростойкостью, ударостойкостью и достаточной коррозионной стойкостью (табл. 2).

Таблица 2

Основные свойства равнопрочного СИАЛа на базе листов сплавов марок 1441-T11 и 1163-AT

Материал	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	E , ГПа	МЦУ: N , кцикл (при $\sigma_{\text{max}}=157$ МПа; $f=5$ Гц; $K_f=2,5$)	dl/dN , мм/кцикл (при $\Delta K=31$ МПа $\sqrt{\text{м}}$)	K_c^y , МПа $\sqrt{\text{м}}$	d , кг/м ³
СИАЛ-3-1Р (на базе сплава 1441)	635	64	160	0,15	85	2370
СИАЛ-3 (на базе сплава 1163)	600	55	110	0,15	66	2470
Сплав 1441-РДТ11	450	79	140	1,4	90	2600
Сплав 1163-АТ	430	70	110	1,8	66	2700

Сопrotивление распространению пламени особенно важно для больших широкофюзеляжных самолетов, пассажиры которых по правилам должны покинуть самолет в течение 90 с в случае пожароопасной ситуации.

Как показывает анализ, СИАЛы способны существенно повысить сопротивление распространению пламени при пожаре (по сравнению с монолитными листами из алюминиевых сплавов) ввиду особенностей своей слоистой структуры и состава.

Для оценки пожаростойкости СИАЛов проведены две серии испытаний горизонтально расположенных листовых образцов на лабораторных установках при одностороннем воздействии открытого пламени газовой горелки и в закрытой камере.

Процедуру проведения испытаний и критерии оценки работоспособности материалов выполняли с учетом требований Авиационных правил. Сквозное прогорание образцов регистрировали визуально, кроме того, фиксировали температуру над поверхностью образца, расслоения, дымо-выделение и искривление.

У всех типов структур СИАЛов отсутствовало сквозное прогорание при воздействии пламени с температурой 950°С в течение 15 мин, однако наблюдалось прогорание первого алюминиевого листа и двух монослоев первого слоя стеклопластика со стороны пламени.

Сквозное прогорание отсутствовало также при температуре 1100°С при увеличении многослойности материала со структурой 4/3 (до семи слоев) и количества монослоев (до четырех) в слое стеклопластика.

Как показали исследования, листы алюмостеклопластиков обладают высокими теплозащитными свойствами: со стороны, противоположной пламени, на расстоянии 100 мм температура воздуха остается сравнительно низкой (не выше 120°С) в течение 5 мин.

На основании анализа характера разрушения установлен следующий механизм противодействия разрушению СИАЛов. Тонкие алюминиевые

листы (толщиной 0,3–0,5 мм) в составе материала (независимо от алюминиевого сплава) прогорают через ~15 с. Расположенные за алюминиевыми листами слои пластика, в состав которых входят армирующие стеклянные (жаропрочные) волокна с температурой плавления ~1700°С, что выше температуры пламени, создают барьер огню. При этом эпоксидная матрица слоя пластика подвергается термодеструкции (температура коксования 300–350°С), вызывая образование газообразных продуктов и расслоение материала, что позволяет проходить воздуху через промежуточные слои и действовать как дополнительный изолирующий эффект от потока пламени. Поэтому сквозного прогорания СИАЛа не происходит, так как распространению пламени противодействуют два фактора – наличие стекловолокон и расслоение материала.

Таким образом, слоистые СИАЛы, в том числе на базе листов алюминий-литиевого сплава марки 1441, обладают повышенной пожаростойкостью по сравнению с монолитными алюминиевыми листами и позволяют увеличить продолжительность проникновения пламени, сохранить структурную жесткость конструкции и тем самым увеличить время эвакуации пассажиров из самолета.

Квалификационные испытания на способность ограничивать распространение пламени материала СИАЛ были проведены в 2011 г. в специализированной лаборатории АСЦ ГосНИИ ГА. Результатами огневых стендовых испытаний установлено отсутствие сквозного прогорания образцов слоистого материала СИАЛ.

Изучение стойкости к ударным нагрузкам перспективного конструкционного слоистого алюмопластика имеет два важных аспекта. С одной стороны, это изыскание принципов создания специальных ударостойких композиций для применения в качестве внутренних обшивок, подвергающихся постоянным ударным воздействиям (панели пола, грузовые отсеки), взамен полимерных композиционных материалов и алюминиевых листов. С другой стороны, необходимо оценить стойкость к удару разрабатываемой композиции алюмопластика при применении в качестве внешних обшивок фюзеляжа.

Ударные повреждения – одни из самых характерных видов эксплуатационных повреждений самолетов после усталостных и коррозионных. Листы из традиционных алюминиевых сплавов устойчивы к удару и ремонтируются, когда возникает трещина или глубина вмятины достигает критической величины. Полимерные композиты типа углепластиков существенно теряют свойства после удара, часто без образования видимых повреждений.

Для сравнительных исследований выбрали относительно доступную и простую методику испытаний падающим грузом со средней скоростью соударения 5 м/с. Низкоскоростной удар (<10 м/с) часто наблюдается

при падениях инструмента, при столкновениях с грузовыми контейнерами, тележками в процессе технического обслуживания самолетов. В результате проведенных испытаний выявлено, что ударостойкость алюмо-стеклопластиков возрастает с увеличением толщины металлических слоев и применением перекрестного армирования слоя пластика, с увеличением общего количества слоев в композите.

Исследования образцов после испытаний показали, что слоистый алюмо-стеклопластик имеет специфические особенности ударной деформации. В месте удара сферическим наконечником формируется лунка не сферической (как у монолитных алюминиевых сплавов), а эллиптической формы. Большая ось эллипса ориентирована в направлении основного армирования. По мере увеличения энергии удара, остаточная деформация и размеры отпечатка растут.

Разрушение носит локальный характер. При этом направление трещины во всех случаях совпадает с большой осью эллипса зоны деформации. Трещина во всех случаях образуется на выпуклой поверхности, т. е. стороне противоположной нанесению удара. Анализ микроструктуры показал, что в образцах, деформированных с энергией меньше критической (когда в металлических листах трещина еще отсутствует), в зоне ударной деформации возможно возникновение тонких трещин в связующем. При ударах с большей энергией наступает другой вид повреждения – отслаивание стеклопластика от алюминиевых слоев, а затем разрыв стекловолокон в слое пластика.

Измерение толщины слоев образцов алюмо-стеклопластика с трещиной до и после удара показало, что толщина первого (вогнутого) металлического слоя не изменяется, а противоположный (выпуклый) металлический лист становится тоньше на 15–20%.

Установлено, что стойкость к низкоскоростным ударным нагрузкам, оцененная по удельной энергии удара, у пятислойного (3/2) равнопрочного слоистого алюмо-стеклопластика выше в 1,5 раза, чем у монолитных листов алюминиевых сплавов толщиной 1,5 мм.

Анализ схем соединений алюмо-стеклопластиков, используемых в зарубежных и отечественных конструкциях (изделия А-380, А-400 и Бе-103) при изготовлении крупногабаритных обшивочных панелей фюзеляжа, показал, что применяются в основном два типа соединения: соединение клепкой (как это делается для соединения монолитных алюминиевых листов планера) и сращивание слоев, что позволяет увеличить размеры обшивочного листа и осуществлять плавный переход толщин обшивки для усиления различных мест – например, вырезов под иллюминаторы.

Клепанные соединения из СИАЛов могут быть выполнены внахлест, встык или по стрингерному типу. Соединение внахлест – это соединение, в

котором элементы конструкции накладываются один на другой. Стрингерное соединение – это соединение, при котором обшивку крепят к стрингеру, шпангоуту или нервюре. Соединение встык – это соединение двух элементов при помощи одной или двух накладок, расположенных сверху или снизу стыка. Это особенно распространенный вид соединения при клепке обшивки фюзеляжа, крыла и других агрегатов к каркасу.

По результатам проведенных исследований установлено, что все рассматриваемые ранее варианты соединений алюмокомпозитов могут быть использованы в конструкции в зависимости от конкретного назначения и условий эксплуатации.

Материал СИАЛ на базе листов сплава марки 1441 используется для молниезащитных элементов обшивки крыла самолета Бе-103 (рис. 2). Он рекомендован в качестве обшивок, противопожарных перегородок, соединительных лент, поясов безопасности (стопперов), обеспечивающих повышенный ресурс и весовую эффективность перспективных российских конструкций авиационной техники.



Рис. 2. Самолет-амфибия Бе-103

Уникальный комплекс характеристик слоистых алюмокомпозитов по сравнению с монолитными алюминиевыми листами делает этот материал перспективным для будущих поколений авиационных конструкций.

Во ФГУП «ВИАМ» продолжаются работы по разработке слоистых гибридных материалов для применения в обшивках крыла самолета взамен используемых традиционных монолитных обшивок из плит (листов, пресованных панелей) из алюминиевых сплавов. Новые слоистые материалы обеспечат снижение массы, существенное повышение значений сопротивления СРТУ и увеличение несущей способности элементов конструкции при сжатии [10].

Материалы (СИАЛ и GLARE) используются в виде относительно тонких обшивок фюзеляжа толщиной до 2,5 мм с максимальной структурой 6/5 (где 6 – количество алюминиевых листов; 5 – количество прослоек стеклопластика). Для обшивок крыла самолетов средних размеров (Ту-204, А-320, В-737) толщина полотна панелей составляет 5–7 мм. Для получения указанных толщин панелей крыла требуется большая многослойность тонких алюминиевых листов и стеклопластиков, что ведет к повышению трудоемкости при изготовлении многослойных панелей (увеличивается количество анодированных листов и операций ручной выкладки клеевых стеклоармированных препрегов). Поэтому целесообразно использовать не целиком многослойную композицию материалов типа СИАЛ/GLARE, а только выборочно, применяя в конструкции слоистой обшивки крыла монолитные алюминий-литиевые листы толщиной 1,5–2,0 мм наряду с прослойками СИАЛа на базе тонких алюминий-литиевых листов толщиной 0,3–0,5 мм.

Обшивка крыла должна быть достаточно жесткой, чтобы она не теряла устойчивость. Это можно осуществить правильной расстановкой ребер жесткости с определенным шагом, в качестве которых применяют стрингеры, изготовленные из прессованных или гнутых листовых профилей (рис. 3). Для соединения внешних монолитных листов и листов СИАЛ используют клеевые препреги, которые подбирают в зависимости от схемы расположения и толщины алюминиевых листов в структуре гибридного материала – с разным объемным содержанием клеевого связующего и стеклонаполнителя [11].

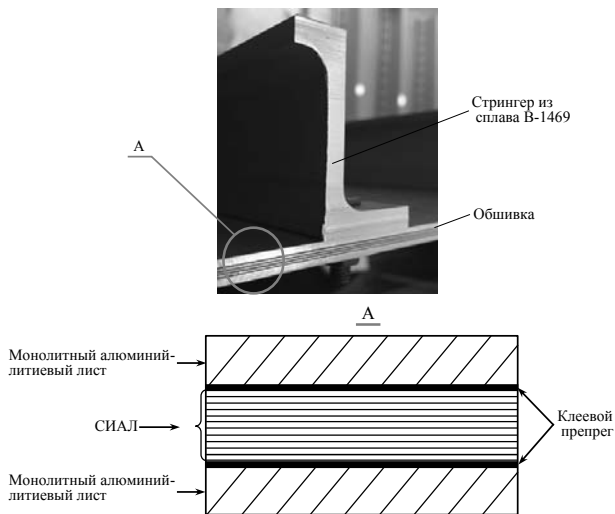


Рис. 3. Строение слоистой гибридной панели крыла

С учетом того, что толщина внешних листов (1,5–2,0 мм) приблизительно в 5 раз больше, чем внутренних тонких листов (0,3–0,5 мм) в составе СИАЛа, для их приклеивания использовали клеевой препрег с пониженным содержанием армирующего наполнителя, который обеспечивает максимальный уровень прочности клеевых соединений.

Сотрудники ФГУП «ВИАМ» совместно с ПАО «Туполев», ПАО «ВАСО» и ФГУП «ЦАГИ» разработали, изготовили и провели всесторонние исследования фрагмента прототипа гибридной панели крыла самолета Ту-204 [12–15]. Благодаря своей многослойной структуре, строению и характеристикам исходных компонентов слоистые гибридные панели для обшивок крыла на базе листов разной толщины из алюминий-литиевых сплавов обладают высокими свойствами (табл. 3).

Таблица 3

Свойства материалов толщиной ~5,0 мм для обшивок крыла (направление D)

Свойства	Значения свойств	
	слоистой гибридной панели	монокристаллической панели из плиты (листа) сплава В95о.ч.-Т2
Плотность d , кг/м ³	2450	2850
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	710–730	510–520
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	450–460	435–440
Относительное удлинение δ_5 , %	4,0–4,5	11,0–11,5
Модуль упругости E , ГПа	68–70	70–72
Удельная прочность σ_b/d , км (усл. ед.)	29,3	18,0
СРТУ: d/dN , мм/цикл (при $\Delta K=31$ МПа $\sqrt{м}$)	0,15–0,20	2,6–3,0
K_c^y , МПа $\sqrt{м}$ (при $B=140$ мм)	95–105	90–95
МЦУ: $N_{ср}$, кцикл (при $\sigma_{max}=157$ МПа; $f=5$ Гц)	200	180
Нагрузка потери устойчивости P_{max} , кН	1860–1880*	1570**

* Экспериментальные значения, полученные при испытаниях двух конструктивно-подобных четырехстрингерных образцов размером 445×600 мм.

** Расчетное значение для четырехстрингерного образца размером 445×600 мм из монокристаллической панели сплава В95о.ч.-Т2.

Оценку свойств, помимо стандартных образцов на растяжение, сжатие, СРТУ и усталость, проводили на четырехстрингерных конструктивно-подобных образцах – определяли несущую способность при сжатии (рис. 4). Конструктивно-подобные образцы состояли из слоистой гибридной обшивки на базе листов (толщиной 1,5 мм) из алюминий-литиевого сплава В-1469-Т1 и СИАЛа на тонких листах (толщиной 0,35 мм) алюминий-литиевого сплава 1441-Т11 и слоев стеклопластика с разным объемным содержанием армирующего наполнителя, а также стрингеров в виде прессованных профилей из алюминий-литиевого сплава В-1469-Т1. Четырехстрингерные конструктивно-подобные образцы торцевыми плоскостями устанавливали на опорную плиту испытательной машины таким образом, чтобы центр жесткости сечения совпадал с

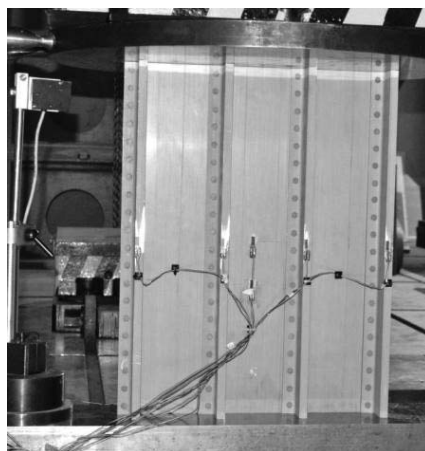
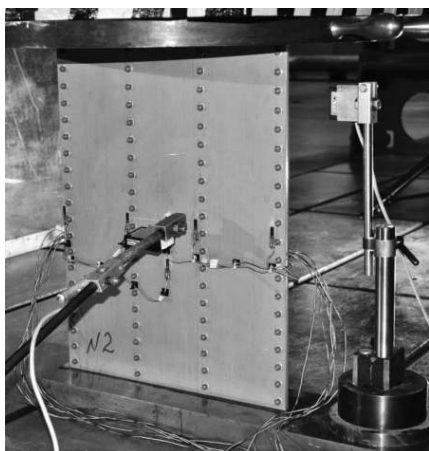


Рис. 4. Четырехстрингерный конструктивно-подобный образец на испытательном стенде

центральной силовой линией нагружающих плит испытательной машины. Тензорезисторы и датчики линейных перемещений фиксировали начало искривления (местную потерю устойчивости) обшивки, ее развитие и потерю несущей способности гибридной панели в целом.

Деформирование панели происходило с постоянной скоростью 1,25 мм/мин от действия непрерывно увеличивающейся, равномерно распределенной по их торцам, сжимающей нагрузки (согласно разработанной программе испытаний, в несколько этапов: 300; 1000; 1500 кН; с последующей разгрузкой до 0 после каждого этапа нагружения). Проводили непрерывную регистрацию измерения относительной деформации и визуальный контроль за поведением деформируемой панели. Видимых нарушений целостности и остаточных деформаций в процессе нагружения обнаружено не было. Относительные деформации при разгрузке возвращались практически к нулю. Нагружение панели осуществляли до исчерпания ее несущей способности.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что местная потеря устойчивости слоистой гибридной обшивки провоцирует искривление стрингеров и вызывает потерю несущей способности всей панели при $\sigma_{кр} = 430$ МПа (при нагрузке $P_{max} = 1880$ кН).

Применение перспективного слоистого гибридного композиционного материала для изготовления верхних и нижних панелей крыла взамен используемых монолитных панелей из плит высокопрочного алюминиевого сплава В95о.ч.-Т2 позволит повысить весовую эффективность – до 15%, сопротивление СРТУ (более чем в 10 раз) за счет строения и компонентов слоистого материала, а также увеличить несущую способность элементов конструкции при сжатии (до 20%).

Слоистые гибридные алюмополимерные материалы на базе листов из алюминий-литиевых сплавов разной толщины и слоев алюмопластика могут быть использованы в обшивках крыла взамен монолитных плит (листов, прессованных панелей) из алюминиевых сплавов. Толщина обшивки может быть изготовлена переменной, в соответствии с условиями эксплуатации крыла: тонкой – в концевой части крыла, и максимальной толщины – в корневых сечениях при соединении с фюзеляжем.

Необходимая сложная конфигурация обшивки может быть создана с помощью автоклавного формования. Применение метода сращивания дает возможность изготавливать панели крыльев требуемой длины и ширины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестаков В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 226–230.
3. Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Новый класс гибридных конструкционных материалов // Металлы Евразии. 2015. №2. С. 54–55.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: Продолжение пути // Наука в России. 2012. №11. С. 16–21.
5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Конструкционные слоистые материалы СИАЛ // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №6. С. 13–17.
6. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Конструкционные слоистые алюмопластики 1441-СИАЛ // МиТОМ. 2013. №9. С. 28–32.
7. Антипов В.В., Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Сенаторова О.Г. Опыт применения Al–Li сплава 1441 и слоистого материала на его основе в гидросамолетах // Цветные металлы. 2013. №8. С. 46–50.
8. Vlot Ad. GLARE history of the development of a new aircraft material. Kluwer Academic Publishers, 2001. 222 p.
9. Шестов В.В., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н. Высокопрочный слоистый материал на основе листов из алюминий-литиевого сплава // Технология легких сплавов. 2016. №1. С. 119–123.
10. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Сенаторова О.Г., Морозова Л.В., Лукина Н.Ф., Нефедова Ю.Н. Гибридные слоистые материалы

- с небольшой скоростью развития усталостной трещины // Вестник машиностроения. 2016. №12. С. 45–49.
11. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Шестов В.В. Использование клеевых препрегов в слоистых гибридных конструкциях на основе алюминий-литиевых сплавов и СИАЛа // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №3. Ст. 03. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 24.11.2016).
 12. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
 13. Антипов В.В., Орешко Е.И., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю. Гибридные материалы для применения в условиях Севера // Механика композитных материалов. 2016. №5. С. 1–18.
 14. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмостеклопластики на их основе // Цветные металлы. 2016. №8. С. 86–91.
 15. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю., Абдуллин М.Р., Лимонин М.В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. №10. С. 5–19.