

УДК 678.8

П.В. Шершак¹, В.А. Косарев², Д.Ю. Рябовол³**ГИБРИДНЫЕ ОБШИВКИ В СЭНДВИЧ-КОНСТРУКЦИЯХ ПАНЕЛЕЙ ПОЛА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-35-41

Рассматривается возможность использования внутрислойной гибридизации стекловолокна и углеродного волокна в качестве армирующего наполнителя в обшивках трехслойных сотовых панелей пола летательных аппаратов.

Приводятся результаты расчетов характеристик панелей при разном процентном соотношении угле- и стекловолокон в обшивках и результаты испытаний образцов, подтверждающие корректность полученных расчетных данных.

Панели пола с гибридными обшивками имеют лучшие показатели, чем аналогичные панели со стеклопластиковыми обшивками, а также позволяют избежать влияния некоторых недостатков, присущих панелям с углепластиковыми обшивками.

Варьирование соотношения угле- и стекловолокон в гибридной обшивке позволяет более гибко управлять процессом проектирования панелей пола, подбирая наиболее компромиссные решения, удовлетворяющие различным индивидуальным требованиям разработчиков воздушных судов.

Ключевые слова: сэндвич-конструкция, трехслойная сотовая панель, панель пола, стекловолокно, углеродное волокно, стеклоуглеродная ткань, гибридный материал, армирующий наполнитель, обшивка.

P.V. Shershak¹, V.A. Kosarev², D.Yu. Ryabovol³**HYBRID FACINGS IN SANDWICH-CONSTRUCTION OF AVIATION FLOOR PANELS**

The possible usage of intra-layer hybridization of glass fiber and carbon fiber as reinforcement in facings of three-layered honeycomb of aircraft floor panels is considered in this article.

Calculation data of panel characteristics at different percent ratio of carbon fibers and glass fibers in the facings and test results that confirm data accuracy are presented.

Floor panels with hybrid facings have better parameters than similar panels with glass fiber facings, and allow avoiding the influence of some negative features that are common to panels with carbon fiber facing.

The possibility to change proportions between carbon and glass fibers in the hybrid facing allows making the process of floor panels designing more flexible, sorting out the alternative solutions that meet the various peculiar requirements of aircraft designers.

Keywords: sandwich-construction, three-layer honeycomb panel, floor panel, glass fiber, carbon fiber, glass-carbon fabric, hybrid material, reinforcement, facing.

¹Федеральное 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

²Акционерное общество «АэроКомпозит» [Joint Stock Company «AeroComposit»]; e-mail: info@aerocomposit.ru

³Открытое акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» [Joint Stock Company «National institute of aviation technologies»]; e-mail: info@niat.ru

Введение

Развитие современной авиационной техники тесно связано с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях воздушных судов. Использование ПКМ позволяет решать приоритетные задачи при конструировании новой авиационной техники, такие как снижение массы, повышение прочности, жесткости, а также технологичности конструкций планера [1–4].

Решение подобных задач наиболее актуально для конструкций, составляющих значительную часть летательного аппарата. Это относится в том числе и к интерьерным конструкциям воздушных судов. Например, площадь панелей пола в современных пассажирских самолетах составляет значительную величину: от 80 м² – у региональных самолетов и от 200 м² и более – у магистральных, а общая масса панелей пола на один самолет

составляет от 250 до 500 кг. Внедрение ПКМ в панели пола воздушных судов позволило снизить их массу, существенно повысить долговечность при сохранении прочности и жесткости [5].

Проблема производства панелей пола из ПКМ известна более четырех десятилетий, однако проводимые обзоры в области разработки панелей пола, к сожалению, не в полной мере отражают современное состояние данного вопроса. Так, авторами работы [6] приводится подробный обзор отечественного и зарубежного опыта производства панелей пола начиная с 1970-х годов, однако не упоминается сделанный за последние 10 лет огромный вклад ОАО НИАТ в разработку импортозамещающих материалов и технологий для производства заготовок панелей пола, которые были квалифицированы как материалы авиационного назначения [7, 8].

Несмотря на необъективность обзора, представленного авторами работы [6], ими все же отмечены некоторые ключевые особенности производства панелей пола. Например, при сравнении армирующих наполнителей в обшивках панелей, справедливо отмечено, что наполнитель на основе углеродного волокна (УВ) по показателю цены существенно проигрывает наполнителю на основе стекловолокна (СВ), хотя и имеет преимущество по прочностным показателям перед последним.

К этому следует также добавить особенности использования различных наполнителей в панелях пола, а именно: обшивки на основе УВ хуже (по сравнению с обшивками на основе СВ) сопротивляются местным ударным и сосредоточенным нагрузкам – например, при таком испытании панелей пола, как продавливание обшивки индентором (имитация каблука дамских туфель). Кроме того, из-за высокого значения модуля упругости, обшивки с наполнителем на основе УВ обладают высокой жесткостью, и поэтому такой важной для панелей пола показатель, как усилие отслаивания обшивки на барабане, будет иметь меньшее значение для обшивок на основе УВ, чем на основе СВ [9].

В данной работе исследуется возможность применения в панелях пола гибридных обшивок, сочетающих особенности различных наполнителей. Причем из соображений получения наибольшего эффекта от сочетания наполнителей различной природы рассматривается внутрислойная гибридная (совмещение УВ и СВ в объеме одного монослоя), что позволит получить панели пола с характеристиками, недостижимыми при использовании обшивок на основе СВ, и снизить влияние недостатков панелей с обшивками на основе УВ.

В отличие от поиска оптимальной структуры гибридных материалов с чередующимися слоями различной природы [10], основной задачей данной работы является определение оптимальных соотношений УВ и СВ в монослое для достиже-

ния индивидуальных требований к характеристикам панелей пола.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Внутрислойная гибридная обшивка обеспечивается при использовании армирующего наполнителя с различным относительным содержанием УВ и СВ. Необходимая прочность клеевого соединения обшивки с сотовым наполнителем достигается благодаря использованию эпоксидных клеевых связующих, которые в процессе отверждения в составе клеевого препрега образуют галтели на торцах сотового наполнителя, тем самым увеличивая площадь склеивания [11].

Типовые значения некоторых характеристик панелей пола толщиной $10,16 \pm 0,25$ мм с обшивками на основе СВ и УВ и сотовым наполнителем типа Nomex, по данным мировых фирм-производителей Aim Composites (дистрибьютер панелей марки Fiberlam фирмы Hexcel), The Gill Corporation и Rockwell Collins, приведены в табл. 1 [12–14]. Значения показателей при изгибе в данной работе приводятся для так называемого «слабого направления» (ribbon direction) – изгиб в направлении склейки сотового наполнителя.

В табл. 1 также представлены значения показателей панелей пола, потенциально достижимые при использовании гибридных обшивок. Приведенные значения являются условно средними между соответствующими значениями для обшивок на основе СВ и УВ или близкими к УВ и даны как пример возможности получения панелей с заданными характеристиками. Следует отметить, что в качестве требований могут быть выбраны другие значения, в таком случае решение задачи также может быть найдено для гибридных обшивок, но уже с другим процентным соотношением СВ и УВ. Характеристики панелей пола багажного отсека (IV тип) не приводятся, поскольку данные панели пола традиционно изготавливаются с обшивками на основе СВ и их гибридная нецелесообразна.

Для расчетного определения физико-механических характеристик гибридных обшивок в качестве исходных значений по компонентам обшивки взяты данные по армирующим наполнителям и связующему, используемому в современных панелях пола в России и за рубежом [3, 8]. Исходя из требований к пределу прочности при сжатии, в качестве данных для материалов сотового наполнителя использованы данные спецификаций на сотовые наполнители марок HRH-10-3.2-80 и HRH-10-3.2-144 фирмы Hexcel. В работе рассматриваются только те материалы, использование которых позволит получать панели,

Таблица 1

Типовые характеристики панелей пола с обшивками на основе различных армирующих наполнителей

Свойства	Тип панели*	Значения свойств панели с обшивками		
		стеклопластиковыми	гибридными**	углепластиковыми
Масса 1 м ² , кг	I	2,5	2,2	2,1
	II	3,1	2,6	2,5
	III	3,8	3,6	3,5
Предел прочности при сжатии, МПа	I	5,0	5,0	5,0
	II	13	13	13
	III	12	12	12
Максимальный прогиб (445 Н) при четырехточечном изгибе, мм	I	20	15	11
	II	20	15	11
	III	14	7	6
Разрушающая нагрузка при четырехточечном изгибе, Н	I	1200	1200	1200
	II	1300	1300	1500
	III	2400	2400	2500
Разрушающая нагрузка при трехточечном изгибе, Н	I	1600	1600	2200
	II	2500	2500	3000
	III	2500	2500	3000
Усилие отслаивания обшивки на барабане, Н/76 мм	I	290	250	200
	II	320	250	200
	III	280	250	200

* I тип – подкресельные панели; II – панели зоны проходов; III – панели зон входов/выходов и буфетов.

** Пример возможных характеристик панелей пола с гибридными обшивками.

полностью удовлетворяющие требованиям по пожаробезопасности к интерьеру воздушного судна [15].

Расчеты проводили для трех типов панелей пола, различающихся по количеству слоев препрега в обшивках и плотностью сотового наполнителя [16]. По результатам расчетов определены физико-механические характеристики гибридного монослоя (ГМ) обшивки. В качестве наполнителя ГМ рассматривается двунаправленная равновесная ткань с одинаковым процентным содержанием армирующих волокон в направлении основы и утка.

Толщина ГМ определяется по формуле

$$t = \frac{m_{ГМ}}{\rho_{ГМ}}, \quad (1)$$

где $m_{ГМ}$ – поверхностная плотность ГМ; $\rho_{ГМ}$ – объемная плотность ГМ.

Поверхностная плотность ГМ определяется по формуле

$$m_{ГМ} = \frac{m_{СВ}V_{СВ} + m_{УВ}V_{УВ}}{W_{СВ} + W_{УВ}}, \quad (2)$$

где $m_{СВ}$ и $m_{УВ}$ – поверхностная плотность СВ и УВ соответственно; $V_{СВ}$ и $V_{УВ}$ – объемное процентное содержание СВ и УВ в ГМ соответственно; $W_{СВ}$ и $W_{УВ}$ – массовое процентное содержание СВ и УВ в ГМ соответственно.

В свою очередь, объемная плотность ГМ определяется по формуле

$$\rho_{ГМ} = \rho_M V_M + \rho_{СВ} V_{СВ} + \rho_{УВ} V_{УВ}, \quad (3)$$

где ρ_M , $\rho_{СВ}$, $\rho_{УВ}$ – объемная плотность связующего, СВ и УВ соответственно; V_M – объемное процентное содержание связующего в ГМ.

Для определения упругих характеристик гибридного ГМ использовалась микромеханическая модель Halpin-Tsai. Формула для определения модуля упругости ГМ в направлении основы следующая:

$$E_{ГМ} = E_M V_M + E_{1СВ} V_{СВ} f_{1СВ} + E_{1УВ} V_{УВ} f_{1УВ} + E'_1, \quad (4)$$

где E_M – модуль упругости связующего при растяжении; $E_{1СВ}$, $E_{1УВ}$ – модули упругости при растяжении СВ и УВ соответственно; $f_{1СВ}$, $f_{1УВ}$ – соответственно процентные части СВ и УВ от общего объема в направлении основы; слагаемое E'_1 присутствует из-за двунаправленности армирующего наполнителя в ГМ и определяется, в свою очередь, по формуле

$$E'_1 = E_M \frac{1 + \xi(\eta_{СВ} V_{СВ} + \eta_{УВ} V_{УВ})}{1 - (\eta_{СВ} V_{СВ} + \eta_{УВ} V_{УВ})}, \quad (5)$$

в которой ξ – эмпирический коэффициент, принятый равным 1,165, для определения компоненты модуля E'_1 , а параметры $\eta_{СВ}$ и $\eta_{УВ}$ вычисляются исходя из отношения жесткостей соответствующих армирующих волокон и связующего.

Расчетные характеристики гибридных монослоев с различным соотношением стекло- и углеволокон

Условное обозначение гибридного монослоя	Объемное соотношение стекло- и углеволокон в монослое, %		Объемная плотность $\rho_{ГМ}$, кг/м ³	Модуль упругости $E_{1ГМ}=E_{2ГМ}$	Модуль сдвига $G_{1ГМ}$
	$V_{св}$	$V_{ув}$			
Г-100/0	100	0	2031	36,02 (35,82*)	5,43 (5,43*)
Г-95/5	95	5	2009	38,47	5,45
Г-90/10	90	10	1986	40,91	5,47
Г-85/15	85	15	1963	43,36	5,49
Г-80/20	80	20	1940	45,81	5,51
Г-75/25	75	25	1918	48,26	5,53
Г-70/30	70	30	1895	50,70	5,54
Г-65/35	65	35	1872	53,15	5,56
Г-60/40	60	40	1850	55,60	5,58
Г-55/45	55	45	1827	58,05	5,60
Г-50/50	50	50	1804	60,50	5,62
Г-45/55	45	55	1782	62,95	5,64
Г-40/60	40	60	1759	65,40	5,66
Г-35/65	35	65	1736	67,85	5,68
Г-30/70	30	70	1714	70,30	5,70
Г-25/75	25	75	1691	72,75	5,72
Г-20/80	20	80	1668	75,20	5,74
Г-15/85	15	85	1646	77,66	5,76
Г-10/90	10	90	1623	80,11	5,78
Г-5/95	5	95	1600	82,56	5,80
Г-0/100	0	100	1578	85,01 (83,74*)	5,83 (5,83*)

* Значения для слоев, содержащих только стекло- или углеволокна, получены с помощью программы ESAComp 4.4.1 и приводятся с целью сравнения с значениями, полученными по формулам. Погрешность в вычислении модулей упругости составляет 0,5–1,5%. В то же время с помощью коммерческого продукта ESAComp 4.4.1 невозможно определить упругие характеристики монослоя, состоящего из двух и более материалов.

С учетом того, что $E_{1ГМ}=E_{2ГМ}$, модуль сдвига в плоскости слоя вычисляется по формуле

$$G_{12ГМ} = G_m \frac{1 + \xi(\eta_{св}V_{св} + \eta_{ув}V_{ув})}{1 - (\eta_{св}V_{св} + \eta_{ув}V_{ув})}, \quad (6)$$

где эмпирический коэффициент ξ в случае определения модуля сдвига принято считать равным 1,01, а параметры $\eta_{св}$ и $\eta_{ув}$ вычисляются исходя из отношения сдвиговых жесткостей волокон и связующего.

Расчеты характеристик ГМ проведены с различным процентным пропорциональным соотношением УВ и СВ с шагом 5%. Вычисленные значения плотности, модуля упругости и модуля сдвига сведены в табл. 2.

Решая обратную задачу определения требуемой жесткости сотовой панели и исходя из уровня известного максимально допустимого прогиба при действии заданного значения усилия, оказывается возможным определить минимально необходимое процентное содержание УВ в составе ГМ.

На рис. 1 показана упрощенная схема четырехточечного изгиба (длинная балка), согласно требованиям к испытаниям панелей пола.

Параметры схемы данного вида изгиба следующие:

$L_0=508$ мм – расстояние между опорами балки;
 $l_2=127$ мм – расстояние от опоры балки до места приложения нагрузки;

$P=445$ Н – нагрузка при измерении прогиба.

Формула для оценочного определения величины максимального прогиба балки, соответствующая принятой расчетной схеме [17]:

$$\delta = \frac{Pl_2}{48E_n J} (3L_0^2 - 4l_2^2), \quad (7)$$

где E_n – модуль упругости панели вдоль направления балки при изгибе; J – момент инерции сечения балки.

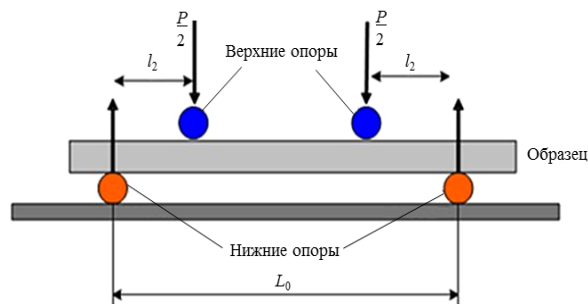


Рис. 1. Схема испытаний образца панели пола при четырехточечном изгибе

Формула для определения жесткости $E_{иr}J$:

$$E_{иr}J = E_{об}bh_{об} \left(\frac{h^2}{2} - hh_{об} + \frac{2h_{об}^2}{3} \right), \quad (8)$$

где $E_{об}$ – модуль упругости при растяжении обшивки; $b=75$ мм – ширина образца; h – толщина панели; $h_{об}$ – толщина обшивки.

С учетом известного предельного значения прогиба панели, получим выражение для определения минимально допустимого модуля упругости обшивки – для этого подставим выражение (8) в уравнение (7) и выразим $E_{об}$ через максимальный прогиб балки δ :

$$E_{об} = \frac{Pl_2(3L_0^2 - 4l_2^2)}{48\delta bh_{об} \left(\frac{h^2}{2} - hh_{об} + \frac{2h_{об}^2}{3} \right)}. \quad (9)$$

При заданной толщине сотового заполнителя и на основании существующих весовых ограничений для каждого типа панели толщина одной обшивки может быть определена согласно формуле

$$h_{об} = \frac{1}{2} \frac{m_{об}}{\rho_{об}} = \frac{1}{2} \frac{m - \gamma h_c A}{\rho_m V_m + \rho_b (1 - V_m)}, \quad (10)$$

где $m_{об}$ – масса обшивки панели; $\rho_{об}$ – плотность обшивки; γ – плотность сотового заполнителя; h_c – высота сотового заполнителя; m – предельно допустимая масса 1 м² панели; A – площадь панели пола, равная 1 м²; ρ_m – объемная плотность связующего; ρ_b – объемная плотность армирующего наполнителя.

Полученное в результате расчета значение модуля упругости для обшивки панели пола является минимально необходимым значением и выступает в качестве критерия для выбора гибридного монослоя как материала обшивок на основании сопоставления расчетного значения $E_{об}$ с значениями $E_{1ГМ}$, приведенными в табл. 2, т. е. $E_{1ГМ} > E_{об}$.

С учетом конкретного выбранного гибридного монослоя для обшивок определяется весовая характеристика панели пола и проводится аналитический расчет прогиба при изгибе и разрушающих нагрузок при трехточечном и четырехточечном изгибах. Расчет предела прочности при сжатии панелей не приводится, поскольку он определяется пределом прочности при сжатии сотового заполнителя, а усилие отслаивания обшивки на барабане является достаточно сложно регулируемой и не всегда предсказуемой характеристикой, на значение которой влияет порядка десяти различных факторов.

Значение прогиба при четырехточечном изгибе определяется по уточненной формуле прогиба образца панели [18].

Значение разрушающей нагрузки при четырехточечном изгибе ($P_{4п}$) вычисляется как минимальное значение нагрузки, при которой происходит разрушение обшивки ($P_{об\max}$) или сотового запол-

нителя ($P_{с\max}$) – в зависимости от того, какое из этих событий произойдет раньше. Дополнительно учитывается нагрузка, приводящая к местной потере устойчивости обшивок (*wrinkling*) – P_{wr} . Таким образом:

$$P_{4п} = \min(P_{об\max}, P_{с\max}, P_{wr}). \quad (11)$$

Нагрузка $P_{об\max}$ определяется по минимально допустимому значению деформации среди структурных компонентов обшивки (волокно, матрица), а также с учетом предельного напряжения в обшивках, рассчитываемого через максимальный изгибающий момент согласно плоской задаче изгиба статически определенной шарнирно опертой балки.

Нагрузка, при которой происходит разрушение сотового заполнителя $P_{с\max}$, находится как предельное сдвиговое напряжение в сотовом заполнителе через максимальное перерезывающее усилие.

Нагрузка P_{wr} вычисляется по аналогии с параметром $P_{об\max}$ с использованием формулы для местной потери устойчивости трехслойных стержней с тонким заполнителем [19]:

$$\sigma_{wr} = 0,82 \sqrt{E_{мс} E_{об} \frac{h_{об}}{h_c}}, \quad (12)$$

где $E_{мс}$ – модуль упругости при сжатии сотового заполнителя.

Разрушающая нагрузка при трехточечном изгибе находится аналогичным образом, за исключением учета местной потери устойчивости обшивок, которая не происходит при таком изгибе, а также с учетом другого изгибающего момента, соответствующего схеме испытаний на трехточечный изгиб.

Для проведения испытаний образцов панелей с гибридными обшивками в качестве материалов использованы препреги, полученные по расплавленной технологии [20] на основе сделанной под заказ экспериментальной гибридной стеклоуглеродной ткани фирмы «Аспро» (рис. 2) и эпоксидного клевого связующего, разработанного для панелей пола [8].

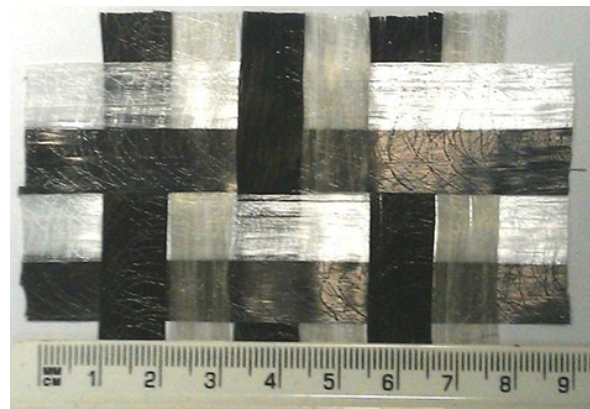


Рис. 2. Экспериментальная стеклоуглеродная ткань фирмы «Аспро»

Таблица 3

Результаты аналитического расчета характеристик панелей пола с гибридными обшивками

Тип панели	Выбранный гибридный материал	Масса 1 м ² , кг	Четырехточечный изгиб		Разрушающая нагрузка при трехточечном изгибе, Н
			Прогиб при нагрузке 445 Н, мм	Разрушающая нагрузка, Н	
I	ГМ-60/40	2,1	14,1	1420	1810
II	ГМ-55/45	2,4	13,5	1580	2950
III	ГМ-25/75	3,6	6,8	3030	3030

Таблица 4

Результаты испытаний панели пола типа I с гибридными обшивками

Масса 1 м ² , кг	Четырехточечный изгиб		Разрушающая нагрузка при трехточечном изгибе, Н	Усилие отслаивания обшивки на барабане, Н/76 мм
	Прогиб при нагрузке 445 Н, мм	Разрушающая нагрузка, Н		
2,1	14,5	1180	2230	270

Испытания проводили на универсальной электромеханической разрывной машине Tinius Olsen H100KU в соответствии с требованиями разработчиков воздушных судов к проведению физико-механических испытаний образцов панелей пола.

Результаты

По результатам расчетов для панели пола I типа (с сотовым наполнителем плотностью 80 кг/м³, высотой 9,3 мм и двумя обшивками из двух слоев препрега каждая) с целью обеспечения требования жесткости по прогибу (табл. 1) минимально необходимое значение модуля упругости обшивки равно 53,7 ГПа.

Согласно данным (табл. 2) для упругих характеристик гибридного монослоя, в качестве материала для обшивок панелей пола I типа подходит материал Г-60/40 с расчетным значением модуля упругости, равным $E_{1ГМ}=55,6$ ГПа. При этом расчетная масса 1 м² сотовой панели с обшивками, выполненными из материала Г-60/40, составляет 2,1 кг, что удовлетворяет требованию к данному типу панелей по массе.

Расчетное значение величины максимального прогиба панели при испытании на четырехточечный

изгиб (при нагрузке 445 Н) составляет 14,1 мм, что удовлетворяет требованию жесткости.

Результаты расчетов всех типов панелей пола сведены в табл. 3.

Как видно из данных табл. 3, выбранные ГМ позволяют получить панели пола с характеристиками, удовлетворяющими установленным в качестве примера требованиям к панелям пола с гибридными обшивками (табл. 1). С целью подтверждения расчетов и практической возможности применения гибридных обшивок в панелях изготовили и испытали образцы панелей пола I типа. Фотографии образцов для испытаний представлены на рис. 3, результаты испытаний приведены в табл. 4.

Обсуждение и заключения

Помимо того, что полученные результаты с хорошей точностью совпадают с результатами аналитического расчета, они также подтверждают сделанное предположение о возможном сохранении высокого значения усилия отслаивания обшивки на барабане при переходе от обшивок на основе СВ к гибридным обшивкам. Данный факт демонстрируется на рис. 4. На оторванной в процессе испытания обшивке кусочки ячеек сотового наполнителя

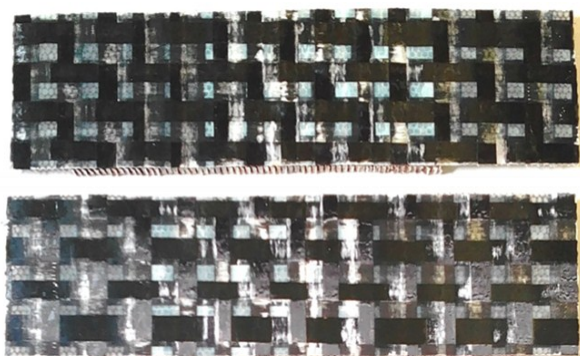


Рис. 3. Фотографии образцов панелей пола с гибридными обшивками



Рис. 4. Фотография испытанного образца на усилие отслаивания обшивки на барабане

присутствуют только на стеклянных волокнах, что свидетельствует о лучшей адгезии стекловолокна к сотовому наполнителю, в отличие от углеродного волокна. Поэтому полученное значение усилия отслаивания для гибридных обшивок выше соответствующего значения для обшивок на основе УВ.

В результате проведенного исследования можно сделать заключение о возможности применения гибридных материалов в составе обшивок сотовых панелей пола различных типов.

Сформулированные в качестве примера требования к панелям пола с гибридными обшивками были достигнуты и подтверждены результатами проведенных испытаний. Важно, что в работе описывается методика расчета, которая может быть использована для решения задачи проектирования панелей пола с гибридными обшивками на основе других исходных

требований. Следует отметить, что использование гибридации с превалирующим по соотношению одним видом волокна над другим на практике трудноосуществимо и нецелесообразно.

Возможность варьирования соотношения углеродных и стекловолокон в составе гибридной обшивки позволяет более гибко подбирать необходимые характеристики панелей, удовлетворяющие различным индивидуальным требованиям разработчиков воздушных судов.

Использование в панелях пола гибридных обшивок с внутрислойной гибридацией позволит повысить показатели панелей по сравнению с применением стеклопластиковых обшивок (по жесткости и массе) и снизить влияние некоторых недостатков углепластиковых обшивок – таких как стоимость и усилие отслаивание обшивки на барабане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл. в 5 т.* Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
3. Михайлин Ю.М. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 715 с.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
5. Душин М.И., Ермолаев А.М., Катырев И.Я. и др. Углепластики в панелях пола трехслойной конструкции // *Авиационная промышленность*. 1978. №6. С. 8–12.
6. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2017. Т. 19. №4 (2). С. 198–213.
7. Шокин Г.И., Шершак П.В., Андриянина М.А. Опыт разработки и освоения производства сотовых панелей пола ЛА из отечественных материалов // *Авиационная промышленность*. 2017. №1. С. 32–39.
8. Шокин Г.И., Шершак П.В., Андриянина М.А. Связующее, препрег, клеевая пленка и авиационные сотовые панели пола на их основе // *Материалы науч.-технич. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения»*. М.: ВИАМ, 2016. Доклад 10.
9. Khan S. Bonding of sandwich structures – The facesheet/honeycomb interface – a phenomenological study // *DuPont de Nemours, Advanced Fibers System*. 2007. 9 p.
10. Лавров А.В., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Автаев В.В. Оптимизация структуры гибридных композиционных материалов авиационного назначения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №11 (47). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7.
11. Петрова А.П., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Чурсова Л.В. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле- и стеклонаполнителях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-11-11.
12. Distribution information of Hexcel production. Aim Composites. URL: <http://www.aimaltitude.com/> (дата обращения: 07.06.2018).
13. Gillfloor product data sheets. The Gill Corporation. URL: <https://www.thegillcorp.com/> (дата обращения: 07.06.2018).
14. AeroBASE technical data sheets. Rockwell Collins. URL: <https://www.rockwellcollins.com/> (дата обращения: 07.06.2018).
15. Курносов А.О., Соколов И.И., Мельников Д.А., Топунова Т.Э. Пожаробезопасные стеклопластики для интерьера пассажирских самолетов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №11. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-7-7.
16. Шершак П.В., Шокин Г.И., Егоров В.Н. Технологические особенности производства трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // *Авиационная промышленность*. 2014. №3. С. 34–42.
17. Тимошенко С.П. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1965. Т. 1. 364 с.
18. Шершак П.В., Косарев В.А., Куриленко Н.В. Влияние высоты полимерного сотового наполнителя на жесткость трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // *Авиационная промышленность*. 2016. №2. С. 49–52.
19. Сухинин С.Н. Прикладные задачи устойчивости многослойных композитных оболочек. М.: Физматлит, 2010. 248 с.
20. Тимошков П.Н., Хрульков А.В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавленным связующим // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4.