

УДК 620.17: 629.7.042

П.В. Шершак¹, Н.О. Яковлев¹, Г.И. Шокин²,
К.Е. Куцевич¹, Е.А. Попкова¹

МЕТОД ОЦЕНКИ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО СКЛЕИВАНИЯ ОБШИВКИ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ В КОНСТРУКЦИЯХ ПОЛА И ИНТЕРЬЕРА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88

Отсутствие в международных и национальных стандартах требований к методике проведения испытаний по определению усилия отслаивания обшивки от сотового заполнителя применительно к образцам панелей пола и интерьера воздушных судов приводит к ряду противоречий при проведении испытаний и интерпретации их результатов. В данной статье подробно описана методика проведения таких испытаний на основе устоявшейся международной практики. Показаны сущность метода, используемые приспособления, схема, основные аспекты и нюансы самого испытания, обработка полученных результатов и различия в используемых единицах измерений. Представлены основные факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым заполнителем. Даны пояснения о причинах и зависимостях их влияния с учетом специфики требований разработчиков воздушных судов, предъявляемых к панелям пола и интерьера.

Ключевые слова: «сэндвич»-конструкция, трехслойная сотовая панель, интерьер, панель пола, обшивка, сотовый заполнитель, отслаивание, барабан.

P.V. Shershak¹, N.O. Yakovlev¹, G.I. Shokin²,
K.E. Kutsevich¹, E.A. Popkova¹

EVALUATION METHOD AND FACTORS INFLUENCING THE BONDING QUALITY BETWEEN FACE AND HONEYCOMB CORES IN FLOOR AND INTERIOR AIRCRAFT PANELS

Absence in the international and national standards requirements for the test methodology for determining the peeling force of the facing (skin) from the honeycomb core for floor and interior panel samples leads to a number of contradictions during testing and interpretation of test results. The article describes in detail the procedure of such tests based on international practice.

The essence of the method, the devices used, the test scheme, the main aspects and nuances of the test, processing of the results and differences in the units used are covered in the article.

The main factors affecting the quality of bonding facing (skin) with honeycomb core are presented. Explanations are given about the reasons and dependencies of their influence on the quality of bonding, taking into account the specific requirements of aircraft developers, imposed on the floor and interior panels.

Keywords: sandwich construction, three-layer honeycomb panel, interior, floor panel, facing, honeycomb core, peeling, climbing drum peel.

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

²Общество с ограниченной ответственностью «Техно Композит» [Limited Liability Company «Techno Composite»]; e-mail: sales@larchfield.ru

Введение

Внедрение в конструкцию воздушного судна (ВС) полимерных композиционных материалов (ПКМ) связано прежде всего с решением основных задач по развитию современной авиационной техники, таких как снижение массы, повышение прочности, жесткости и технологичности конструкции ВС [1–3].

С точки зрения весовой эффективности наиболее рационально уделять внимание снижению массы тех элементов конструкции, которые составляют значительную часть ВС. Одним из таких элементов является интерьер. У современных пассажирских магистральных самолетов площадь панелей, применяемых в конструкции интерьера и пола, составляет несколько сотен квадратных

метров, притом что масса 1 м^2 – от 1,5 до 4 кг в зависимости от назначения панели [4].

Благодаря существенному прогрессу в решении проблемы весового совершенства конструкции интерьера и пола ВС широкое применение нашли трехслойные сотовые панели («сэндвич»-конструкции) из ПКМ, состоящие из двух обшивок, приклеенных к легкому сотовому заполнителю [5].

Следует подчеркнуть, что к интерьеру и полу воздушных судов предъявляются специальные требования по пожаробезопасности [6, 7]; качеству склеивания обшивки с сотовым заполнителем; стойкости к ударным, сосредоточенным, циклическим нагрузкам и пр. [8]. Как и в других областях науки и техники, здесь также применяются «законы сохранения»: невозможно одновременно достичь наилучших результатов по всем показателям и характеристикам панелей интерьера и пола – повышение значений одних показателей неизбежно влечет за собой снижение других.

Одним из наиболее важных показателей физико-механических характеристик панелей интерьера и пола ВС является усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя, характеризующее качество склеивания обшивки с заполнителем. Усилие отслаивания устанавливается путем равномерного накручивания обшивки трехслойного образца на специальный барабан, в отличие от равномерного отрыва (на так называемых «грибках» (по ОСТ 1 90069–72)), при котором определяют величину разрушающей нагрузки при растяжении образца клеевого соединения заполнителя с обшивкой, обусловленную усилиями, направленными перпендикулярно плоскости склеивания.

Вопреки распространенному мнению, испытание на равномерный отрыв на «грибках» не используется в мировой практике для оценки характеристик панелей интерьера и пола: разработчики воздушных судов за рубежом не предъявляют требований к этому показателю, а производители материалов для интерьера не приводят его в своих спецификациях и информационных листах [9–13], в отличие от усилия отслаивания обшивки на барабане, которое является одной из ключевых характеристик материалов интерьера ВС.

В данной статье рассмотрены особенности проведения испытания по определению усилия отслаивания обшивки на барабане применительно к образцам панелей интерьера и пола воздушных судов, а также факторы, влияющие на этот показатель.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материа-

лы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3].

Сущность метода

Для испытаний трехслойных сотовых панелей используют образцы размером 305×76 мм, у которых удалена часть одной обшивки и сотового заполнителя так, чтобы у другой (испытываемой обшивки) оставались свободными концы размером по 25 мм (рис. 1).

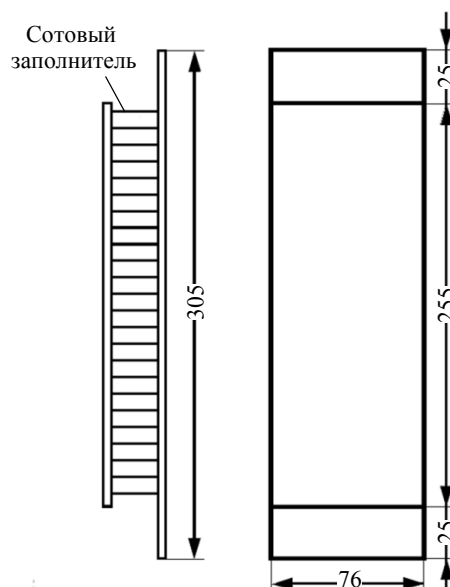


Рис. 1. Эскиз образца трехслойной сотовой панели для испытания на отслаивание обшивки

Длина одного из свободных концов обшивки может быть увеличена. Таким образом, общая длина образца составляет ≥ 305 мм. Размер основной части образца с сотовым заполнителем должен быть достаточным, чтобы отслаивание обшивки происходило на определенной длине (не менее 152 мм) для получения наиболее представительных данных о силе отслаивания.

Толщина сотового заполнителя и, соответственно, толщина образца существенной роли не играют, поскольку на барабан накручивается не сам образец, а только одна обшивка. Тем не менее толщина должна быть такой, чтобы образец не изгибался при отслаивании обшивки от него.

Суть данного метода испытаний для трехслойных сотовых панелей заключается в следующем. Один из свободных концов обшивки зажимают в приспособлении (рис. 2, а), установленном на верхней траверсе испытательной машины. Допускается зажимать обшивку в других захватах, при этом усилие

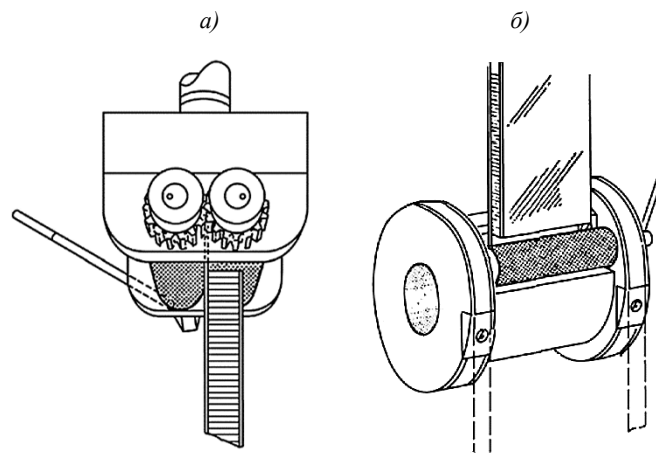


Рис. 2. Приспособление для испытаний: *а* – зажим машины; *б* – барабан

зажима должно быть достаточным, чтобы обшивка не выскользнула из захвата в процессе испытания. Другой свободный конец обшивки зажимают в специальном барабане (рис. 2, *б*). На фланцы барабана намотаны стальные ленты, свободные концы которых закреплены на нижней траверсе.

К установленному на испытательную машину приспособлению вместе с образцом (рис. 3, *а*) прикладывается растягивающая нагрузка со скоростью 25 мм/мин. Зажим поднимает образец, к нижней обшивке которого закреплен барабан. Таким образом, образец тянет за собой барабан, а ленты, закрепленные к нижней неподвижной траверсе и намотанные на фланцы барабана, заставляют его вращаться и накручивать на себя

конец свободной обшивки. Барабан, вращаясь, поднимается вдоль образца и отрывает обшивку от сотового заполнителя (отсюда и зарубежное название метода испытаний: Climbing Drum Peel – отслаивание поднимающимся барабаном). В процессе испытания записывается диаграмма «нагрузка–перемещение траверсы». По записанной диаграмме получают значение усилия отслаивания обшивки от сотового заполнителя. Схема испытания приведена на рис. 3, *б*.

Существует несколько стандартов, устанавливающих требования к проведению данного испытания. Наиболее известные из них: – ASTM D1781–98 (2012) «Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives»;

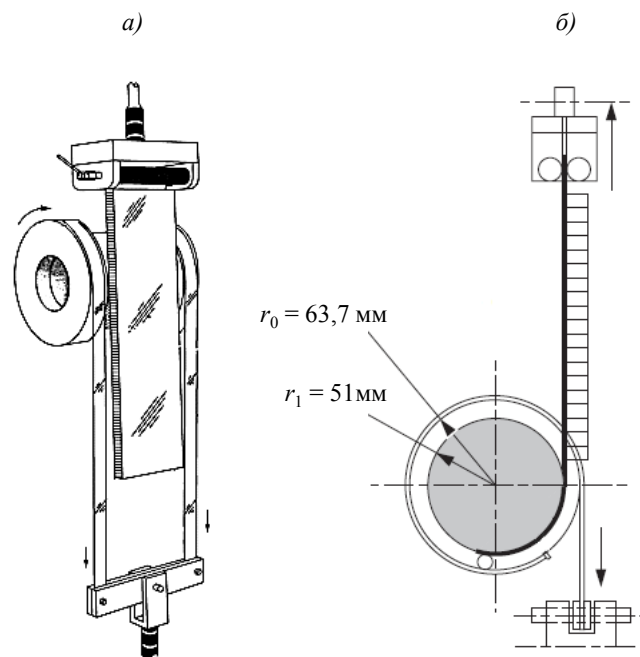


Рис. 3. Сущность метода: *а* – общий вид приспособления с образцом; *б* – схема испытаний

– ГОСТ Р 56792–2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на расслаивание с намоткой на барабан» (модифицированный по отношению к ASTM D1781);

– ОСТ1 90196–75 «Клеи. Метод испытания на прочность при отслаивании клеевого соединения сотового заполнителя с обшивкой».

В конце прошлого века разработчики воздушных судов устанавливали требование к проведению данного испытания на образцах панелей интерьера и пола из ПКМ по ОСТ1 90196–75. В настоящее время данный ОСТ является устаревшим, кроме того, он распространяется только на клеевые соединения сотового заполнителя с металлическими обшивками. Известен также еще один стандарт – EN 2243-3:2006-10 (Aerospace series – Non-metallic materials – Structural adhesives – Test method – Part 3: Peeling test metal-honeycomb core), который тоже распространяется на соединения заполнителя с металлическими обшивками. Таким образом, наиболее подходящими стандартами для испытаний соединения заполнителя с неметаллическими обшивками являются ASTM D1781–98 и ГОСТ Р 56792–2015.

По всем вышеупомянутым стандартам результатом испытаний является определение крутящего момента отслаивания обшивки (\bar{T}) по формуле

$$\bar{T} = \frac{(r_0 - r_1)(F_r - F_0)}{W}, \quad (1)$$

где r_0 – радиус фланца, включая половину толщины ленты барабана, мм; r_1 – радиус барабана, включая половину толщины отслаиваемой обшивки, мм; F_r – средняя нагрузка, необходимая для отслаивания обшивки, включая нагрузку, необходимую для преодоления сопротивления кручению, Н; F_0 – нагрузка, необходимая для преодоления сопротивления кручению, Н; W – ширина образца.

Однако данные стандарты нельзя отнести напрямую к испытаниям образцов панелей интерьера и пола воздушных судов. Очень важно отметить, что, согласно мировой практике, качество склеивания обшивки с сотовым заполнителем чаще всего определяется не крутящим моментом отслаивания, а усилием отслаивания [9, 10]. Кроме того, даже в информационных листах на препреги для производства панелей интерьера и пола ВС приводится показатель усилия отслаивания обшивки [11–13].

Обратим особое внимание на то, как определяется усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя (F). Наиболее наглядно это продемонстрировано на рис. 4 (рисунок взят из информационного проспекта фирмы Hexcel, США [14]).

Для определения усилия отслаивания необходимо на полученной диаграмме исключить из длины участка отслаивания начальные и конечные 25% участка. На оставшейся области записанной кривой определяют среднее значение пиков (F_r) и из полученного значения вычитают значение усилия, необходимое для преодоления сопротивления кручению (F_0). Последнее определяется горизонтальным участком до начала отслаивания обшивки от сотового заполнителя (участок, выделенный пунктирной областью на рис. 4).

Здесь важно отметить, что при испытании образцов данный горизонтальный участок наблюдается далеко не всегда – это зависит от материала и толщины обшивки. Есть два способа для определения значения усилия F_0 в подобной ситуации:

– увеличить нижний конец свободной от заполнителя обшивки (рис. 1) до 50 мм или более. В таком случае потребуются большее перемещение для накручивания обшивки

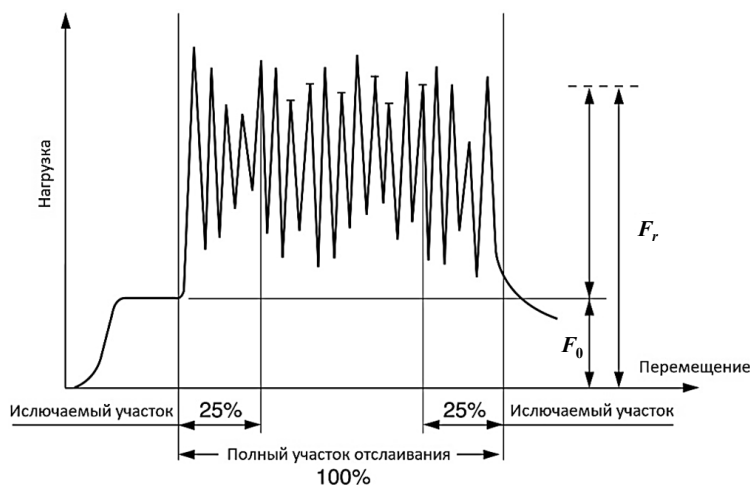


Рис. 4. Определение усилия отслаивания обшивки по диаграмме «нагрузка–перемещение траверсы»

на барабан и, как следствие, увеличение горизонтального участка;

– после проведения испытания вернуть траверсу испытательной машины в исходное положение, не вынимая образец, и повторно провести испытание на уже испытанном образце с оторванной от сотового заполнителя обшивкой. При этом новая кривая на диаграмме после начального подъема (преодоление сопротивления кручению) будет практически горизонтальной, что и будет соответствовать значению F_0 .

Таким образом, усилие отслаивания обшивки определяется по формуле

$$F = F_r - F_0. \quad (2)$$

Полученное значение выражается в специфических единицах измерения: Н/76 мм. Именно в таких единицах оно приводится в большинстве литературных источников и информационных проспектах фирм-производителей панелей интерьера и пола ВС. Данная размерность обусловлена формулой (1), где знаменатель содержит ширину образца, которая в нашем случае составляет 76 мм.

В научно-технической литературе наиболее часто встречаются следующие единицы измерения: N-m/76mm, N-m/m, lbf/3in, lbf-in/3in, lbf-in/in. В тех случаях, когда приводят крутящий момент отслаивания в единицах N-m/76mm при известных стандартных размерах барабана, его легко пересчитать в усилие отслаивания, выраженное в Н/76 мм. Так же и для других единиц измерения. Приведем таблицу с коэффициентами умножения для пересчета усилия отслаивания в разные еди-

ницы измерения (см. таблицу). Для удобства сравнения с зарубежной научно-технической литературой обозначение единиц измерений сохранено без перевода на русский язык.

Значения усилия отслаивания обшивки от сотового заполнителя для панелей интерьера в среднем находятся на уровне 150–250 Н/76 мм, для панелей пола: 200–300 Н/76 мм.

Российские разработчики воздушных судов зачастую используют данные зарубежных фирм-производителей панелей. Опираясь на материалы информационных проспектов и коммерческих предложений, они устанавливают требования к значениям усилия отслаивания обшивки, не всегда достижимые одновременно с заданным уровнем других характеристик панелей.

Усилие отслаивания является сложно регулируемой характеристикой, на значение которой влияет достаточно большое количество факторов [4]. Рассмотрим основные из них.

Направление склеек сотового заполнителя. Сотовый заполнитель является материалом анизотропным, что обусловлено технологией его изготовления. В направлении склеек (клеевых полос) сотовый заполнитель более жесткий, чем в направлении, перпендикулярном склейке. Однако на практике при испытаниях образцов панелей пола и интерьера однозначно установить зависимость усилия от расположения склеек не всегда возможно (что связано с уровнем значений жесткости сот). Тем не менее разработчики ВС, как правило, устанавливают требования к «худшему» из двух вариантов – более жесткому расположению сот: склейки сотового

Таблица коэффициентов для пересчета значения усилия отслаивания в разные единицы измерения

		Единица измерения имеющегося значения					
		N/76mm	N-m/76mm	N-m/m	lbf/3in	lbf-in/3in	lbf-in/in
Единица измерения требуемого значения	N/76mm	1	78,7	5,99	4,45	8,89	26,7
	N-m/76mm	0,0127	1	0,0760	0,0565	0,113	0,340
	N-m/m	0,167	13,1	1	0,743	1,48	4,47
	lbf/3in	0,225	17,7	1,35	1	2,00	6,01
	lbf-in/3in	0,112	8,86	0,674	0,501	1	3,01
	lbf-in/in	0,0374	2,94	0,224	0,166	0,332	1

Примечания:
 1. Для пересчета значения усилия отслаивания из одной единицы измерения в другую необходимо выбрать столбец с единицей измерения имеющегося значения и строку требуемой единицы. Пересечение выбранного столбца и строки укажет на ячейку с коэффициентом, на который необходимо умножить имеющееся значение.
 2. Значения коэффициентов округлены до третьей значащей цифры.

заполнителя должны быть параллельны длинной стороне образца для испытаний.

В стандарте ASTM D1781–98 и модифицированном по отношению к нему ГОСТ Р 56792–2015 приводится требование к испытанию половины образцов при одном направлении клеевых полос в сотах, а половины – при другом. Отсюда очевидно, почему по ASTM D1781–98 должны испытывать 6 образцов, при этом неясно, как поступать по ГОСТ Р 56792–2015, согласно которому допускается к испытанию минимальное количество образцов: 5. В этом и заключается одна из особенностей национальной стандартизации [15]: для панелей интерьера и пола ВС рекомендуется использовать по 5 образцов для каждого направления склеек (если это необходимо).

Жесткость сотового заполнителя. Жесткость сотового заполнителя обратно пропорциональна усилию отслаивания. Это объясняется тем, что более гибкие соты при наматывании обшивки на барабан изгибаются вместе с обшивкой и распределяют нагрузку по большей площади. Для жестких сот эта площадь меньше, что приводит к большей концентрации напряжений в области отслаивания и требует меньшей нагрузки для отслаивания.

Жесткость обшивки. Жесткость обшивки испытываемого образца обратно пропорциональна усилию отслаивания [4].

Схема укладки препрегов в обшивке. В случае, когда в обшивке используют однонаправленные препреги, необходимо учитывать направление укладки слоя, непосредственно прилегающего к сотовому заполнителю. Так, в данном слое при направлении волокон 90 градусов относительно приложения нагрузки к образцу наиболее вероятным видом разрушения будет расслоение между слоями обшивки. В таком случае невозможно оценить усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя, поскольку оно не будет происходить в принципе. Например, в стандарте фирмы Boeing (США) установлено требование, чтобы длинная сторона образца была параллельна направлению укладки внутреннего слоя препрега [16].

Прочность клеевого соединения обшивки с сотами. Данный фактор является одним из главных, так как его значимость вполне очевидна – чем больше прочность соединения, тем больше значения усилия отслаивания обшивки. Здесь стоит отметить, что значение данного параметра зависит также от зазора между обшивкой и торцом стенки ячейки сотового заполнителя. Зазор создает дополнительную связь между обшивкой и ячейкой сотового заполнителя, а его отсутствие образует «слабое место» при

отслаивании. При использовании клеевой пленки прочность соединения может регулироваться ее толщиной.

Высокая текучесть клея или связующего. При формировании панелей в гидравлическом прессе высокая текучесть связующего приводит к разному качеству склеивания верхней обшивки с сотовым заполнителем, по сравнению с нижней (относительно расположения панели в прессе). Производитель The Gill Corporation (США) для некоторых панелей указывает усилие отслаивания для обеих обшивок [9].

Способность связующего к галтелеобразованию. При выборе связующего для производства панелей пола особое внимание уделяют его способности образовывать галтели на стенках сотового заполнителя или углу смачивания с конкретным сотопластом. Существует модель для расчета размера галтели при склеивании обшивок с ультралегкими сотовыми заполнителями [17].

Качество поверхности сотового заполнителя. Качество поверхности сот у разных производителей и разных типов сотовых заполнителей (полимерных, на основе стекла, кевлара и т. п.) отличается друг от друга. Например, ворсистость («пушистость») поверхности сотового заполнителя (степень которой определяется типом сотового заполнителя и качеством механической обработки) может существенно повлиять на значение усилия отслаивания. Особо ворсистые поверхности препятствуют протеканию связующего, а волокна ворсинок создают концентраторы напряжений в галтелях (рис. 5.) Наиболее подробно этот аспект рассмотрен в феноменологической модели – граница «обшивка/сотовый заполнитель» [18]. Для обеспечения наибольшего качества склеивания торец стенки сотовой ячейки должен быть прямым и острым.

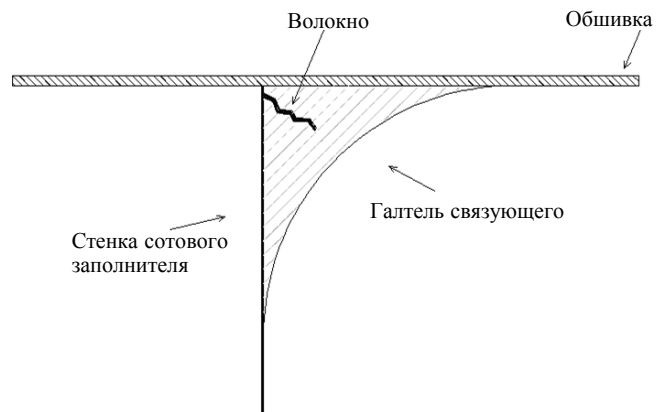


Рис. 5. Схематичное изображение места соединения обшивки со стенкой ячейки сотового заполнителя

Сюда также следует отнести вопросы, связанные с качеством подготовки поверхности. Подготовка поверхности сотового заполнителя, его очистка, в частности обработка сильными растворителями, могут существенно повлиять на качество склеивания. Так, органические соты рекомендуют чистить мылом и водой [18].

Приведем основные формы разрушения образца при испытании на отслаивание:

- по связи между слоями в обшивке (случай, приведенный ранее, о схеме армирования обшивки однонаправленными препрегами);
- по границе между связующим и обшивкой;
- по слою связующего между обшивкой и сотовым заполнителем;
- по границе между связующим и сотовым заполнителем;
- по сотовому заполнителю.

Значение усилия отслаивания обшивки на барабане тесно связано и с результатами испытаний на четырехточечный изгиб. Поскольку одной из форм разрушения образца при испытаниях на четырехточечный изгиб является местная потеря устойчивости обшивки, приводящая к локальному отслаиванию от сотового заполнителя (в зарубежной научно-технической литературе – это так называемый *wrinkling* [19]), то высокое значение усилия отслаивания может исключить такую форму разрушения.

В завершении отметим один из возможных перспективных путей решения вопроса повышения качества склеивания обшивки с сотовым заполнителем. Этот путь используется зарубежными фирмами (например, Airbus, Boeing, Alenia) и заключается в применении так называемых «дуплексных» обшивок, состоящих из внутреннего слоя самоклеящегося эпоксидного препрега и наружного слоя фенольного негорючего препрега. Производители препрегов разрабатывают специальные пары соответствующих эпоксидных и фенольных связующих для производства

панелей пола с «дуплексными» обшивками, обладающими пониженными дымовыделением и токсичностью. В настоящее время отечественные фенольные смолы и катализаторы отверждения для создания таких связующих не производятся, что является также одной из задач в вопросах импортозамещения.

Заключения

Качество склеивания обшивки с сотовым заполнителем – одна из важнейших характеристик панелей интерьера и пола воздушных судов. Методом его оценки является испытание по определению усилия отслаивания обшивки на барабане. Существующие в настоящее время международные и национальные стандарты не регламентируют требования именно к испытанию образцов панелей интерьера и пола. Однако в мировой практике разработчики воздушных судов используют методику, незначительно отличающуюся от требований существующих стандартов: ASTM D1781–98 и ГОСТ Р 56792–2015.

Приведен подробный анализ основных параметров (факторов), влияющих на значение усилия отслаивания обшивки. К основным факторам отнесены: направление клеевых полос сотового заполнителя и его жесткость, схема укладки препрегов в обшивке, жесткость обшивки, прочность клеевого соединения обшивки с сотами, высокая текучесть клея или связующего, способность связующего к галтелеобразованию, качество поверхности сотового заполнителя.

Однозначные рекомендации по управлению каждым из этих факторов не могут быть даны, поскольку они оказывают влияние на другие параметры панелей, которые устанавливаются в зависимости от их конструкционного назначения, используемых материалов, технологии производства и пр. Тем не менее совокупность представленных данных может быть мощным инструментом при решении задач проектирования и производства панелей интерьера и пола воздушных судов.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. Каблов Е.Н. Что такое инновации // Наука и жизнь. 2011. №5. С. 2–6.
4. Шершак П.В., Косарев В.А., Рябовол Д.Ю. Гибридные обшивки в сэндвич-конструкциях панелей пола летательных аппаратов // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3. С. 35–41. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-35-41.
5. Михайлин Ю.М. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 715 с.
6. Курносов А.О., Соколов И.И., Мельников Д.А., Топунова Т.Э. Пожаробезопасные стеклопластики для интерьера пассажирских самолетов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №11. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-7-7.

7. Серкова Е.А., Застрогина О.Б., Барботько С.Л. Исследование возможности использования новых экологически безопасных фосфорорганических антипиренов в составе связующих для пожаробезопасных материалов интерьера // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №2 (74). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-24-34.
8. 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.
9. Полный каталог продукции компании The Gill Corporation // The Gill Corporation: офиц. сайт. URL: https://www.thegillcorp.com/full_catalog.php (дата обращения: 07.12.2019).
10. Технический информационный лист на сэндвич-панели авиационного назначения компании Euro-Composites // Euro-Composites: офиц. сайт. URL: <https://www.euro-composites.com/wp-content/uploads/2014/07/535-173.pdf> (дата обращения: 07.12.2019).
11. Технический информационный лист на эпоксидную систему Суcom 919 компании Solvay // Solvay: офиц. сайт. URL: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-919#product-identity> (дата обращения: 07.12.2019).
12. Информационный лист на эпоксидный препрег LC-E322 компании Lincoln Composite Materials // Lincoln Composite Materials: офиц. сайт. URL: <http://www.lcmaterials.com/wp-content/uploads/2017/09/LC-E322DS-Rev-170912.pdf> (дата обращения: 07.12.2019).
13. Информационный лист на эпоксидный препрег с пониженным дымовыделением EP 137 компании Gurit // Gurit: офиц. сайт. URL: <https://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials/Prepregs/Aerospace/EP-137> (дата обращения: 07.12.2019).
14. Информационный проспект «Препреговые технологии» // Hexcel: офиц. сайт. URL: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf (дата обращения: 07.12.2019).
15. Шершак П.В. Особенности национальной стандартизации методов испытаний полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №2 (74). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-77-88.
16. BMS 4-17M Unidirectional fiberglass faced nomex honeycomb core floor panel stock // Boeing material specification: Boeing standard. Cage code 81205. Revision 13.01.1993.
17. Rion J., Leterrier Y., Manson J.-A.E. Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra-light sandwich structures // Composites: Part A. 2008. No. 39. P. 1547–1555.
18. Khan S. Bonding of sandwich structures – The facesheet/honeycomb interface – a phenomenological study // DuPont de Nemours, Advanced Fibers System. 2007. 9 p.
19. Yusuff S. Theory of Wrinkling in Sandwich Construction // Journal of the Royal Aeronautical Society. 1955. Vol. 59. P. 30–36.