

---

Научная статья

УДК 620.17:629.7.042

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-159-173

## ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ПОЛА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

П.В. Шершак<sup>1</sup>, Н.О. Яковлев<sup>1</sup>, А.А. Баранников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрены требования к проведению испытаний на изгиб образцов трехслойных сотовых панелей пола и наиболее часто возникающие ошибки в интерпретации методик проведения испытаний. Проанализированы требования разработчиков воздушных судов к показателям свойств при испытании на изгиб, а также данные производителей панелей пола для воздушных судов. Ввиду отсутствия стандартов, устанавливающих требования к проведению испытаний на изгиб именно панелей пола, приведены обоснования применения методик, отличных от ГОСТов, устанавливающих требования к испытаниям трехслойных сэндвич-конструкций.

**Ключевые слова:** трехслойные сотовые панели, панели пола, сэндвич-конструкции, изгиб, трехточечный изгиб, четырехточечный изгиб, прогиб

**Для цитирования:** Шершак П.В., Яковлев Н.О., Баранников А.А. Испытания на изгиб образцов трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 159–173. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-159-173.

Scientific article

## BENDING TESTS OF AIRCRAFT FLOOR SANDWICH HONEYCOMB PANEL SAMPLES

P.V. Shershak<sup>1</sup>, N.O. Yakovlev<sup>1</sup>, A.A. Barannikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The work examines the requirements for conducting bending tests of aircraft floor sandwich honeycomb panel samples and the most common errors in the interpretation of test methods. An analysis of the requirements of aircraft developers for property indicators during bending tests is conducted, along with data from manufacturers of aircraft floor panels. Due to the lack of standards establishing requirements specifically for the bending tests of floor panels, the work provides justifications for applying methodologies that differ from GOST standards, which set requirements for testing sandwich structures.

**Keywords:** sandwich honeycomb panels, floor panels, sandwich structures, bending, three-point bending, four-point bending, deflection

**For citation:** Shershak P.V., Yakovlev N.O., Barannikov A.A. Bending tests of aircraft floor sandwich honeycomb panel samples. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 159–173. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-159-173.

## Введение

В настоящее время преимущества применения полимерных композиционных материалов в конструкциях интерьера (в частности, в панелях пола) воздушных судов (ВС) очевидны [1, 2]. Мировая практика гражданского авиастроения показывает, что применение полимерных композиционных материалов в панелях пола обусловлено комплексом факторов, выходящих за рамки простого облегчения конструкции. Такие конструкции должны не только быть легкими, но и удовлетворять ряду других требований по механическим нагрузкам и пожаробезопасности. Поэтому трудно сразу распознать сложную интеграцию материаловедческих и технологических решений, которая стоит за кажущейся простотой конструкции панелей пола ВС.

Оценка качества панелей пола и их соответствия требованиям по механическим свойствам проводится путем испытаний образцов панелей пола. Однако речь идет об определении свойств не материала, а самой конструкции или ее элемента. Таким образом, требования к большинству испытаний образцов панелей пола отличны от требований к испытаниям трехслойных сотовых конструкций (сэндвич-конструкций) в целом. Именно поэтому существующие ГОСТы, ASTM и другие стандарты, устанавливающие требования к испытаниям образцов сэндвич-конструкций, не подходят для некоторых видов испытаний панелей пола.

Для таких испытаний существуют специальные требования, установленные в зарубежных спецификациях или российских технических заданиях разработчиков самолетов, которые затем включают в технические условия на заготовки панелей пола.

Несмотря на узкую специфику и конкретику в назначении панелей пола, встречается ряд ошибок при реализации требований к проведению испытаний образцов. Например, определение значения усилия отрыва обшивки на барабане имеет особенности для образцов панелей пола, наиболее полно данное испытание с методической точки зрения описано в работе [3]. Существуют также особенности при проведении испытаний на изгиб образцов панелей пола.

Данная работа посвящена анализу требований, показателям свойств, данным производителей и методике проведения испытаний панелей пола на изгиб.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4].

### Требования к испытаниям панелей пола

В части требований к панелям пола разработчики ВС устанавливают два вида испытаний на изгиб (рис. 1): трехточечный изгиб (в контексте панелей пола также встречается под названием «3-точечный изгиб», «короткая балка», «short beam», «shear») и четырехточечный изгиб («4-точечный изгиб», «длинная балка», «long beam»).

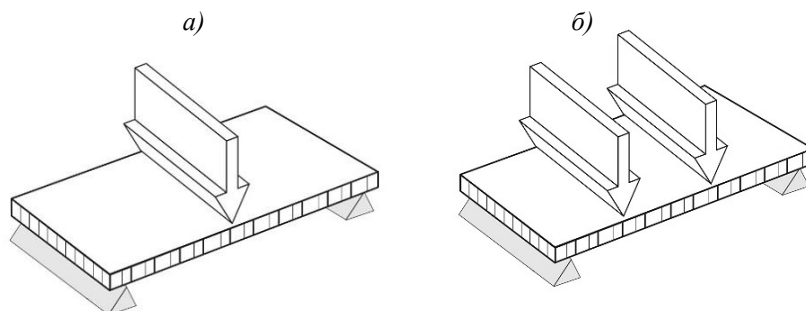


Рис. 1. Трехточечный (а) и четырехточечный (б) изгибы образцов панелей пола

Часто в требованиях к проведению испытаний на изгиб образцов панелей пола в качестве методик указывают ASTM C393/C393M (ГОСТ Р 56791–2023) и ASTM D7249/D7249M (ГОСТ Р 56680–2015), однако использовать эти стандарты напрямую, без учета специально оговоренных отклонений в данном случае **ошибочно**. Это связано с тем, что данные стандарты устанавливают требования к определению характеристик материалов внутреннего (в данном случае сотового заполнителя) и внешнего (обшивок) слоев сэндвич-конструкций соответственно, т. е. непосредственно материалов, входящих в состав трехслойной сотовой панели.

Панели пола имеют изначально заданную (практически всеми разработчиками ВС в РФ и за рубежом) конкретную толщину, составляющую 10,16 мм, а их расположение в самолете ограничивается типовыми размерами конструкции каркаса пола (рис. 2). Панели пола лежат на «ячейках» определенного размера [5]. Данное инженерное решение учитывает нагрузки, приходящиеся на панели пола не только от пассажиров, но и от нагруженных едой тележек бортпроводников.



Рис. 2. Места для установки панелей пола в самолете (фотография ООО «ЦАТИ») [6]

Поэтому разработчики ВС устанавливают определенные требования к панелям пола как к конструкции. Исторически сложилось так, что для панелей пола требуют и определяют не относительные значения показателей при изгибе (такие как прочность и модуль упругости), а абсолютные значения нагрузки (в ньютонах) и прогиба (в миллиметрах) для образцов конкретных размеров при строго заданных расстояниях между опорами испытательной машины.

В данных требованиях разработчики ВС в РФ ориентировались на зарубежные спецификации на материалы для авиационной техники. В частности, для панелей пола используются требования из спецификаций фирмы Boeing, например из документа Boeing Material Specification BMS 4-17M. На рис. 3 приведена выдержка из данной спецификации. Поэтому требования к методикам испытаний разработчиков ВС в РФ такие же, как и в общемировой практике испытаний образцов панелей пола.

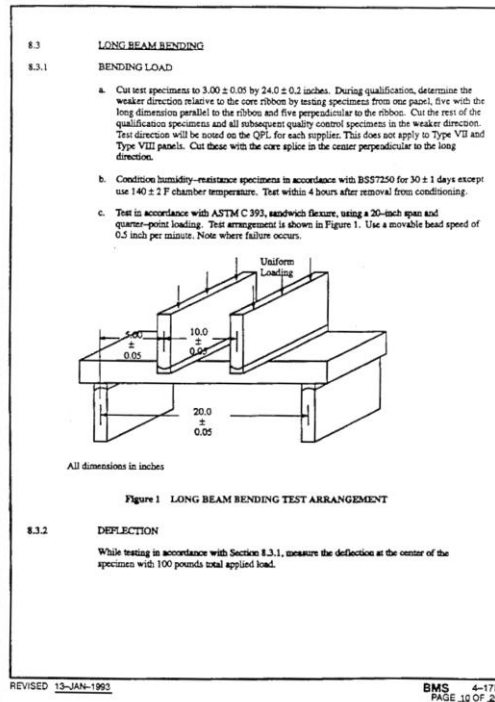


Рис. 3. Выдержка из документа Boeing Material Specification BMS 4-17M на панели пола

### Направление склеек сотового заполнителя

Одним из важнейших факторов при испытании образцов трехслойных сотовых панелей пола является расположение сотового заполнителя в образце. Сотовый заполнитель обладает ортотропными свойствами (имеет разные значения показателей свойств во взаимно перпендикулярных направлениях). Это связано с особенностями производства сотового заполнителя. Чаще всего в мировой практике для панелей пола используют полимерные сотовые заполнители на основе фенилоновой бумаги [7]. В России ввиду санкционной политики применяют также сотовые заполнители на основе других материалов, как правило стеклопластиковые. Различают несколько технологий производства полимерных сотовых заполнителей [8], но неотъемлемой частью всех процессов является использование так называемых клеевых полос. При изготовлении полимерных сот методом растяжения на полотно, используемое для изготовления сот материала, наносят клеевые полосы, после склеивания полотен в пакет и последующей его растяжки получают блоки, которые пропитывают связующим. Далее полученный сотоблок просушивают и нарезают на листы требуемой толщины (рис. 4).

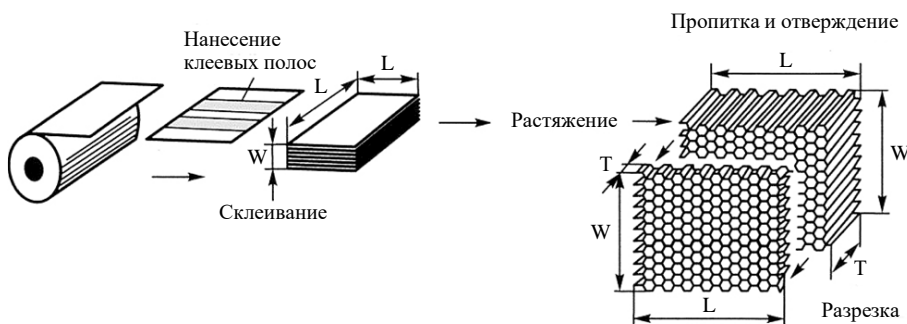


Рис. 4. Краткая схема процесса производства полимерного сотового заполнителя методом растяжения [9]

Таким образом, в используемых листах сотового заполнителя есть два основных направления – направление клеевых полос (Ribbon direction, L-direction) и направление, перпендикулярное клеевым полосам (W-direction, Transverse ribbon direction, реже – T-direction) (рис. 5).

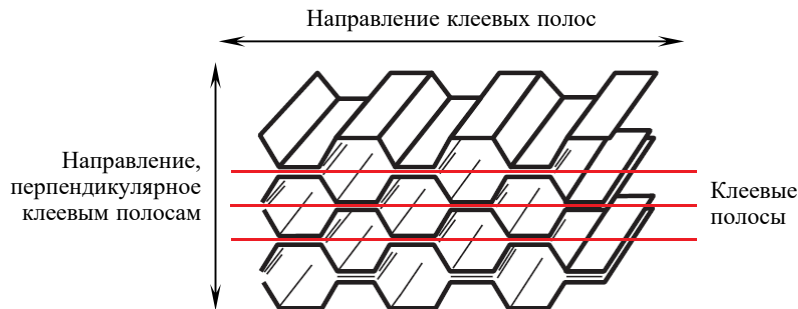


Рис. 5. Направление клеевых полос в сотовом заполнителе

Производители сотовых заполнителей всегда указывают свойства заполнителя в обоих направлениях (рис. 6).



#### Typical Mechanical Properties

| Honeycomb Designation | Stabilised Compression |               | Plate Shear                  |                             |                              |                             |
|-----------------------|------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                       | Strength (MPa)         | Modulus (MPa) | Strength "L" Direction (MPa) | Modulus "L" Direction (MPa) | Strength "W" Direction (MPa) | Modulus "W" Direction (MPa) |
| A1-23-19              | 0.60                   | 38            | 0.50                         | 16                          | 0.25                         | 11                          |
| A1-24-6               | 0.70                   | 41            | 0.50                         | 20                          | 0.26                         | 14                          |
| A1-29-3               | 0.90                   | 60            | 0.50                         | 25                          | 0.35                         | 17                          |

Рис. 6. Пример свойств сотовых заполнителей по данным производителя [10]

В этой связи характеристики, получаемые при испытании образцов панелей пола на изгиб, будут зависеть от расположения заполнителя в образце. Разработчики ВС, понимая данную особенность, при формулировании требований к панелям пола указывают, как должен быть расположен сотовый заполнитель в образцах для испытаний. При этом разработчик ВС выбирает одно расположение – самое «худшее», т. е. то, при котором значения определяемого показателя будет ниже. Данное требование логично, поскольку при удовлетворении ему характеристики панелей пола при другом расположении сотового заполнителя будут однозначно выше. Кроме того, предъявляют требования к уровню свойств в обоих направлениях, но реже.

Важно, что в требованиях может встречаться формулировка: «нагрузку прикладывают в направлении клеевых полос». Возможно, такое требование появляется в связи с неточным переводом зарубежных спецификаций на русский язык. В таких случаях требуется уточнение, поскольку при испытаниях на изгиб нагрузка к образцу прикладывается в плоскости, перпендикулярной к плоскости сотового заполнителя, при любом направлении клеевых полос. Наиболее корректно требование к испытанию, когда

указывается направление клеевых полос относительно самого образца, – например, «направление клеевых полос сотового заполнителя параллельно ширине образца» («параллельно короткому размеру образца» – в зарубежной интерпретации).

Таким образом, существуют следующие варианты указаний направления клеевых полос в сотовом заполнителе:

- направление клеевых полос с наименьшими значениями показателей свойств при изгибе (рис. 7, а):
  - клеевые полосы параллельны ширине образца;
  - клеевые полосы перпендикулярны длине образца;
  - Transverse ribbon direction;
  - W-direction (редко – T-direction);
- направление клеевых полос с наибольшими значениями показателей свойств при изгибе (рис. 7, б):
  - клеевые полосы перпендикулярны ширине образца;
  - клеевые полосы параллельны длине образца;
  - Ribbon direction;
  - L-direction.

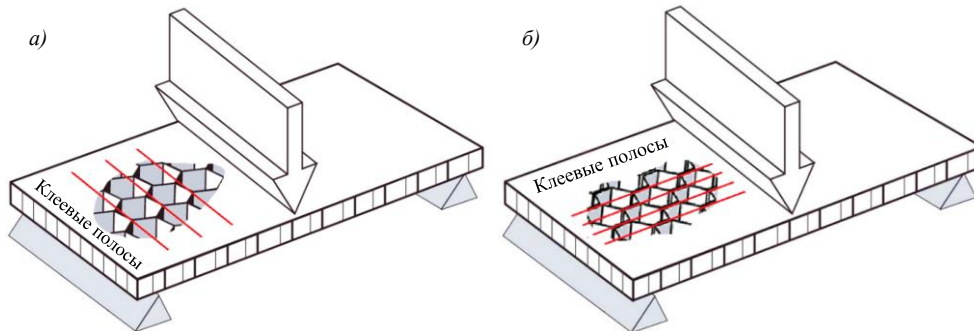


Рис. 7. Расположение клеевых полос заполнителя в образце при испытании на изгиб: а – меньшее значение разрушающей нагрузки (клеевые полосы параллельны ширине образца); б – большее значение разрушающей нагрузки (клеевые полосы перпендикулярны ширине образца)

Известны случаи, когда производитель панелей пола трактует направления иначе. Например, американский производитель Collins Aerospace (до 2018 г. компания Rockwell Collins) [11] в информационных материалах Ribbon direction называет слабым направлением, что противоречит данным производителя сотовых заполнителей. В таких случаях нужно всегда обращать внимание на интерпретацию направлений.

### Трехточечный изгиб (короткая балка)

Приведена методика испытаний образцов панелей пола на трехточечный изгиб в соответствии с требованиями разработчиков ВС. Схема испытаний на трехточечный изгиб представлена на рис. 8.

Размеры, показанные на рис. 8, продиктованы требованиями зарубежных спецификаций, где изначально они выражены в дюймах (например, расстояние между опорами в зарубежных требованиях составляет 4 дюйма). Это объясняет такие значения в метрической системе. Позже разработчики ВС стали предъявлять более конкретные требования к оснастке для проведения испытаний, заимствованные по большей части из ГОСТов на испытания сэндвич-конструкций, в том числе представленные далее.

Металлические опоры и нагружающий элемент шириной 75 мм должны иметь радиус от 3 до 15 мм, высота опор должна составлять 150 мм. При этом на опоры и под нагружающий элемент в местах контакта с испытуемым образцом устанавливают прокладки из штампованной резины шириной 25 мм, толщиной 3 мм и твердостью по Шору А ~60 усл. ед.

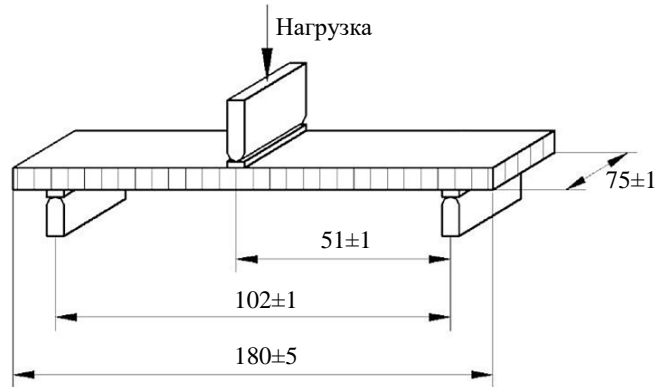


Рис. 8. Схема испытаний на трехточечный изгиб образцов панелей пола (размеры указаны в миллиметрах)

Образец нагружают равномерно до разрушения со скоростью перемещения траверсы 6 мм/мин (в спецификации BMS 4-17M: 0,1 дюйм/мин).

Некоторые разработчики ВС устанавливают требования к допустимым видам разрушения. Так, в данном случае может быть указан единственно допустимый вид разрушения – разрушение сотового заполнителя при сдвиге (другие виды разрушений, такие как разрушение обшивки, не допускаются). При недопустимых видах разрушения используют новые образцы.

За результат испытаний принимается значение нагрузки в ньютонах, при которой образец разрушился. Расчет прочности при изгибе (в данном случае прочности при сдвиге сотового заполнителя) не требуется.

Типовые значения разрушающей нагрузки образцов с клеевыми полосами, расположенными параллельно ширине образца, составляют от 2000 до 5000 Н в зависимости от типа панели пола пассажирского салона, а следовательно, в зависимости от типа используемого сотового заполнителя. При испытании образцов с направлением клеевых полос перпендикулярно ширине образца соответствующие значения разрушающей нагрузки могут быть больше в 1,5–2 раза [12].

Результаты данного испытания практически полностью определяются характеристиками сотового заполнителя, а конкретно его прочностью при сдвиге в двух направлениях (по направлению клеевых полос и перпендикулярно ему). Трехточечный изгиб еще называют испытанием на сдвиг (shear), не путать со сдвигом в плоскости листа (in-plane shear). Поэтому для обеспечения необходимых требований к данному виду испытаний необходимо правильно выбрать сотовый заполнитель. В совокупности с требованиями к панелям пола по прочности при сжатии, где результат также зависит только от характеристик сотового заполнителя, подобрать необходимые материалы для обеспечения требований к трехточечному изгибу, как правило, не составляет труда. В практике производства панелей пола как в России, так и за рубежом проблем с данным видом испытаний и обеспечением требуемых при этом показателей не возникало, в отличие от четырехточечного изгиба.

### Четырехточечный изгиб (длинная балка)

Схема испытаний на четырехточечный изгиб представлена на рис. 9.

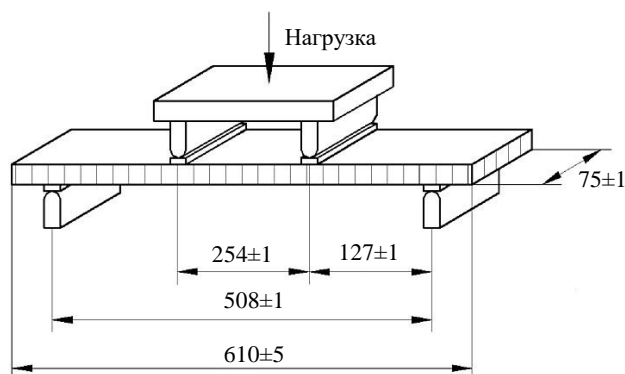


Рис. 9. Схема испытаний на четырехточечный изгиб образцов панелей пола (размеры указаны в миллиметрах)

Приведенные размеры также соответствуют исходным зарубежным нормативным документам по испытаниям образцов панелей пола: расстояние между опорами 20 дюймов, между верхними нагружающими элементами 10 дюймов. Требования разработчиков ВС к оснастке (опорам, нагружающим элементам, прокладкам) такие же, как при испытаниях на трехточечный изгиб.

Требования к скорости нагружения могут различаться у разных разработчиков ВС в РФ, но, как правило, это два варианта: 6 или 12 мм/мин. В спецификации BMS 4-17M указано 0,5 дюйм/мин.

При четырехточечном изгибе определяют два показателя:

- разрушающая нагрузка в ньютонах;
- прогиб образца при нагрузке 445 Н в миллиметрах (100 фунтов, согласно спецификации BMS 4-17M).

В табл. 1 представлены требования разработчиков ВС к значениям разрушающей нагрузки и прогиба при четырехточечном изгибе. Приведенные значения относятся к образцам с обшивками из стеклопластика (кроме отмеченных символом «\*») с «худшим» расположением клеевых полос сотового заполнителя – параллельно ширине образца. Бывает так, что разработчик ВС все же предъявляет требования к значениям свойств в обоих направлениях клеевых полос сотового заполнителя в образце – например, в требованиях к панелям пола самолета МС-21.

Таблица 1

#### Требования разработчиков воздушных судов к проведению испытаний на четырехточечный изгиб образцов панелей пола

| Разработчик<br>воздушного судна (марка)   | Разрушающая нагрузка, Н (не менее) |       |      | Прогиб, мм (не более) |       |      |
|---|------------------------------------|-------|------|-----------------------|-------|------|
|   | для панелей пола типа              |       |      |                       |       |      |
|   | I                                  | II    | III  | I                     | II    | III  |
| ПАО «Яковлев» <sup>1</sup> (SSJ-NEW) [13] | 1100                               | 1400  | 2450 | 14,0                  | 15,2  | 14,0 |
| ПАО «Яковлев» <sup>2</sup> (МС-21) [14]   | 1530*                              | 1650* | 1850 | 10,9*                 | 8,51* | 15,4 |
| ПАО «Ил» (Ил-96-600) [15]                 | 1020                               | 1422  | 1422 | 30                    | 20    | 20   |
| ПАО «Туполев» (Ту-204/214) [6]            | 1020                               | 1324  | 1520 | 25                    | 22    | 21   |

<sup>1</sup> На момент формирования требований – АО «Гражданские самолеты Сухого».

<sup>2</sup> На момент формирования требований – ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут».

\* Приведены требования к панелям пола с обшивками из углепластика. В остальных случаях указаны значения для обшивок из стеклопластика.

Примечание. Типы панелей пола: I – зона под креслами пассажирского салона, II – зона проходов (между креслами), III – сервисная зона (входов/выходов).

Как видно из данных табл. 1, требования разработчиков ВС существенно различаются, особенно в части прогиба образцов. Необходимо отметить, что ранее некоторые разработчики ВС ориентировались на информацию зарубежных производителей панелей пола, в том числе рекламного характера. Кроме того, различие в требованиях также связано с различными материалами, используемыми при производстве панелей пола. В требованиях к самолету МС-21 разработчиком ВС указаны разные материалы в обшивках (углепластик для панелей I и II типа и стеклопластик для панелей III типа).

Существуют также проблемы при формировании требований к панелям пола, когда разработчик ВС использует данные зарубежных производителей и комбинирует их друг с другом. Поскольку практически все показатели свойств панелей пола взаимосвязаны, не всегда возможно получить наилучшие результаты по всем характеристикам одновременно. Например, при поисках оптимального решения с учетом необходимости удовлетворения требований к наименьшей возможной массе панелей производителю придется использовать сотовый наполнитель более низкой плотности (при условии использования тех же негорючих препрегов). Как следствие, становится невозможным выполнить повышенные требования к прочности при сжатии и малому значению прогиба панелей при изгибе или необходимо выбрать длительный путь разработки новых материалов, где приходится сталкиваться с проблемами, возникающими при создании новых связующих и препрегов [16–19]. Существуют и другие примеры противоречивости исходных требований, связанные с тем, что зарубежные производители не всегда могут подтвердить заявленные характеристики выпускаемых панелей результатами испытаний.

Свойства панелей пола (толщиной 10,16 мм) при четырехточечном изгибе по данным производителей приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Свойства панелей пола при четырехточечном изгибе по данным производителей**

| Производитель   | Марка панели                                      | Разрушающая нагрузка, Н |       |      | Прогиб, мм |      |      |
|---|---|-------------------------|-------|------|------------|------|------|
|   |   | для панелей пола типа   |       |      |            |      |      |
|   |   | I                       | II    | III  | I          | II   | III  |
| С обшивками из стеклопластика   |   |                         |       |      |            |      |      |
| The Gill Corporation [20]   | Gillfloor 4417<br>Ty I, II, III                   | 1206                    | 1282  | 1727 | 20         | 19   | 14   |
| AIM Altitude UK Ltd [21]  | UNS 2,<br>UNS 4                                   | 1330*                   | 1555* | –    | 18*        | 20*  | –    |
| Collins Aerospace [11]  | NE1G26-33-400,<br>NE1G25-25-400,<br>NE1G27-34-400 | 1303                    | 1708  | 2797 | 20,4       | 14,4 | 9,3  |
| Euro-Composites group [22]  | 133E  | 870                     | –     | –    | 20,1       | –    | –    |
| Showa Aircraft Industry [23]  | AeroRigid 4155                                    | –                       | –     | 3015 | –          | –    | 8,1  |
| С обшивками из углепластика   |   |                         |       |      |            |      |      |
| The Gill Corporation [20]   | Gillfloor 4709<br>Type V, III, II                 | 1610                    | 1610  | 1735 | 10,4       | 10,4 | 10,2 |
| * Данные приведены для «лучшего» расположения склеек сотового наполнителя (перпендикулярно ширине образца).<br>Примечание. Типы панелей пола: I – зона под креслами пассажирского салона, II – зона проходов (между креслами), III – сервисная зона (входов/выходов). |   |                         |       |      |            |      |      |

Производители не всегда указывают статистический характер приводимых данных (типовые, средние или минимальные). Производитель AIM Altitude UK Ltd указывает, что представлены базисные значения, а компания Showa Aircraft Industry приводит типовые значения с пометкой, что они не должны использоваться в конструкторских спецификациях. Остальные производители, представленные в табл. 2, в информационных проспектах данную информацию не приводят. При этом разработчики ВС предъявляют требования к минимальным значениям, ниже которых не допустимы результаты

испытаний ни по одному образцу. Поэтому при анализе потенциала производителей панелей пола необходимо уточнять характер приводимых ими данных.

Следует обращать внимание на величину нагрузки, при которой указывается прогиб. Известны случаи, когда производитель указывает прогиб при нагрузке в 2 раза меньше требуемой, т. е. при 222 Н, при этом значение прогиба в ~2 раза меньше, чем при требуемой нагрузке 445 Н. Возможно, эти данные указываются для соответствия каким-то иным требованиям, однако в рамках спецификации на материалы панелей пола такое требование отсутствует. Например, компания Hexcel таким образом указывала данные для панелей марки Fiberlam 2100 (когда производила панели пола).

Сравнивая данные табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что требования к самолету SSJ-NEW по значению прогиба при изгибе трудновыполнимы с применением обшивок из стеклопластика, что указано в требованиях разработчика ВС. Обеспечение невысоких значений прогиба при заданных толщине, массе и других механических показателях панелей с указанием используемых материалов – трудная, а иногда невыполнимая задача.

Как следствие, при разработке панелей пола возникает необходимость подбора исходных материалов для достижения заданных требований, хотя уже давно устоялась практика использования сотовых заполнителей определенной плотности и высоты, так же как и специально разработанных препрегов (удовлетворяющих требованиям по горючести). Тем не менее для достижения специальных требований возможно использовать заполнители другой плотности, как и различное сочетание марок препрегов в обшивках и их количества, если это удовлетворяет требованиям к массе 1 м<sup>2</sup> панели пола, которая, как правило, имеет определенное значение для каждого типа панелей. При этом ошибочным будет решение снижать толщину обшивки с целью уменьшения массы панели [24].

Изменение плотности сотового заполнителя практически не влияет на значение прогиба при изгибе, в отличие от высоты сотового заполнителя [25], так же как использование более жестких обшивок из углепластика (вместо стеклопластика) [26].

Рассчитать значение прогиба панели можно заранее по формуле [25]

$$\delta = \frac{11PL^3}{64E_{\text{об}}(h^3 - h_c^3)b} + \frac{PLh_c}{2G(h + h_c)^2b}, \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка, прикладываемая к образцу, Н;  $L$  – расстояние между опорами, мм;  $E_{\text{об}}$  – модуль упругости обшивки, МПа;  $h$  – высота образца для испытаний, мм;  $h_c$  – высота сотового заполнителя, мм;  $b$  – ширина образца для испытаний, мм;  $G$  – модуль сдвига сотового заполнителя в направлении  $W$  (при расположении клеевых полос параллельно ширине образца), МПа.

Формула (1) выведена из формулы расчета прогиба, приводимой в ранних редакциях стандарта ASTM C393 (в действующей редакции стандарта она отсутствует), и учитывает схему испытаний, представленную на рис. 9 (Quarter Point Loading), поэтому в ней фигурирует только расстояние между нижними опорами. Первое слагаемое учитывает основной вклад, вносимый в прогиб трехслойной балкой, второе – вклад характеристик сдвига сотового заполнителя.

Данная формула применима при допущениях, что материалы обшивок и сотового заполнителя подчиняются закону Гука в пределах заданной нагрузки, не нарушается связь между обшивкой и сотовым заполнителем, а напряжения в зонах контакта опор и нагружающих элементов не учитываются. Применимость формулы ограничивается трехслойными сотовыми панелями с тонкими обшивками и относительно легким сотовым заполнителем. Для панелей с тяжелым или высокомодульным заполнителем (в том

числе в случаях, когда модули сдвига и изгиба заполнителя сопоставимы) формула не применима. Поэтому она позволяет эффективно оценивать величину прогиба образцов именно трехслойных сотовых панелей пола трех рассмотренных типов.

При известных значениях нагрузки при измерении прогиба (445 Н), расстояния между опорами (508 мм) и ширине образца (75 мм) для расчета прогиба достаточно знать высоту сотового заполнителя, его модуль при сдвиге и модуль упругости обшивки. При известных марках материалов эти данные легко получить в качестве справочных.

Следует отдельно упомянуть о требованиях к испытаниям на четырехточечный изгиб образцов после влагонасыщения, такие требования встречаются за рубежом и приводятся производителями панелей пола в соответствии со спецификацией BMS 4-20 с целью оценки влияния климатических факторов [27]. Влагонасыщение проводится в течение 30 дней при комнатной температуре и влажности 97 %. При этом измеряют только разрушающую нагрузку. При сравнении результатов испытаний до и после влагонасыщения потеря свойств по показателю разрушающей нагрузки составит:

- от 8 до 12 % в зависимости от типа панелей пола с обшивками из углепластика и сотового заполнителя марки Кевлар (данные для марки панелей Gillfloor 4809);
- от 16 до 17 % для панелей пола I и II типа с обшивками из стеклопластика и полимерного сотового заполнителя марки Кевлар (данные для марки панелей Gillfloor 4709).

### **Особенности методики испытаний на четырехточечный изгиб**

Основная ошибка при проведении испытаний на четырехточечный изгиб возникает при измерении прогиба. Очевидно, что прогиб необходимо измерять в самой нижней точке образца при достижении заданной нагрузки (445 Н). Однако иногда можно встретить неправильную интерпретацию методики проведения испытаний, что приводит к некорректному определению значения прогиба. В частности, прогиб получают с учетом не абсолютного значения перемещения центральной точки образца, а перемещения траверсы испытательной машины в миллиметрах. Несмотря на очевидность такой ошибки, возникает необходимость подтвердить корректный вид измерений требованиями методики.

Как отмечено ранее, исходные требования к испытаниям представлены в спецификации BMS 4-17M (рис. 3), в п. 8.3.2 которой указано, что прогиб измеряют в центре образца. Кроме того, в п. 8.3.1 отмечено, что испытания проводятся в соответствии со стандартом ASTM C393, согласно п. 7.4 которого прогиб образца должен измеряться в центре между нижними опорами специально откалиброванным прибором с точностью  $\pm 1$  % или лучше. В примечании данного пункта четко указано (по-видимому, для рассмотренных случаев), что измерение прогиба с учетом перемещения траверсы испытательной машины или перемещения верхних нагружающих элементов приводит к некорректным результатам, особенно при испытании на четырехточечный изгиб. Так, например, для панелей пола I типа разница между значениями прогиба, полученными с использованием высотомера (штангенрейсмаса) и с учетом перемещения траверсы, может составлять  $\sim(3-4)$  мм. В связи с этим необходимо обращать особое внимание на правильность соблюдения методики проведения испытаний.

Дополнительно следует отметить, что высота опор также имеет особое значение при испытании на изгиб. Несмотря на то что разработчики ВС устанавливают требования к высоте опор (150 мм), она может быть недостаточной для получения разрушающей нагрузки для некоторых типов материала обшивки и сотового заполнителя, так как известны случаи, когда прогиб образцов превышал это значение. Таким образом, образцы при испытании могут упираться в нижнюю часть испытательной машины, на которой расположены опоры, не достигнув при этом разрушения.

### Заключения

Рассмотрены требования к испытаниям образцов панелей пола на трех- и четырехточечный изгибы ввиду отсутствия стандартов, относящихся именно к испытаниям панелей пола как элемента конструкции. Приведены схемы испытаний и требования разработчиков ВС к методике их проведения. Рассмотрены особенности расположения сотового заполнителя в образцах для испытаний относительно направлений клеевых полос.

Приведены требования разных разработчиков ВС к значениям показателей свойств, определяемых при четырехточечном изгибе образцов панелей пола, а также данные производителей панелей пола. Проведен их сравнительный анализ. Указаны основные нюансы в представлении информации производителями.

Рассмотрены особенности методики определения прогиба при проведении испытаний на четырехточечный изгиб и основные ошибки ее интерпретации.

Данная работа обобщает накопленный опыт испытаний образцов панелей пола на изгиб и дает развернутое представление всех аспектов, возникающих с момента формирования требований к показателям свойств при изгибе до получения результатов механических испытаний.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
2. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (70). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Шокин Г.И., Куцевич К.Е., Попкова Е.А. Метод оценки и факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым заполнителем в конструкциях пола и интерьера воздушных судов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
4. 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.
5. Комаров В.А., Куцевич К.Е., Павлова С.А., Тюменева Т.Ю. Оптимизация трехслойных сотовых панелей пола из полимерных композиционных материалов пониженной горючести на основе высокопрочных углеродных и стеклянных волокон и клеевого связующего // Вестник Самарского университета. Сер.: Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19. № 3. С. 51–72. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-3-51-72.
6. Ильющенков С.Ф., Батизат Д.В., Середута П.И. Разработка трехслойных сотовых панелей пола пассажирских самолетов из полимерных композитов // Полимерные материалы. 2025. № 3 (310). С. 14–21.
7. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2023. 720 с.
8. Гиясов Б.И., Серегин Н.Г., Серегин Д.Н. Трехслойные панели из полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. М.: Издательство АСВ, 2015. 64 с.
9. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
10. Характеристики сотовых заполнителей фирмы Hexcel // Hexcel. Composite materials and structures. URL: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Honeycomb> (дата обращения: 08.11.2025).
11. Трехслойные сотовые панели пола фирмы Collins Aerospace // Collins Aerospace. URL: <https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/industries/business-aviation/cabin/structures/honeycomb-panels> (дата обращения: 08.11.2025).

12. 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.
13. Технические требования. Панели трехслойные сотовые для изготовления пола воздушного судна RRJ-95. URL: <https://rostender.info/region/moskva-gorod/32180045-tender-dopolnenie-perechnya-postavshchikov-trehslujnyh-sotovyyh-panelej-pola-dlya-vs-semejstva-rj?ysclid=mf5qwacqiy574752643> (дата обращения: 08.11.2025).
14. Технические требования, предъявляемые к композитным панелям пола пассажирского салона, пола БГО, боковым панелям, перегородкам и потолкам БГО самолета MC21. URL: <https://tenmon.ru/1/31806547983> (дата обращения: 08.11.2025).
15. 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.
16. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 61–81. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
17. Сарычев И.А., Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Термореактивные связующие для материалов панелей пола летательных аппаратов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). С. 26–33. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.
18. Стрельников С.В., Петухов В.И., Постнов В.И., Швец Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 498–507.
19. Старков А.И., Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Клеевые препреги пониженной горючести, предназначенные для изготовления интегральных и трехслойных сотовых конструкций авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). С. 41–52. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
20. Технические характеристики панелей пола фирмы The Gill Corporation // The Gill Corporation. URL: <https://www.thegillcorp.com/products/floor-panels/> (дата обращения: 08.11.2025).
21. Технические характеристики панелей пола фирмы AIM Altitude Ltd. URL: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/52337885/aim-composites-ltd-flitelam-uns2-technical-data-lindberg-lund-as> (дата обращения: 08.11.2025).
22. Технические характеристики панелей пола фирмы Euro-Composites group // Euro-Composites group. URL: <https://www.euro-composites.com/en/portfolio/aviation/> (дата обращения: 08.11.2025).
23. Технические характеристики панелей пола фирмы Showa Aircraft Industry // Showa Aircraft Industry. URL: <https://www.showaircraft.com/product-category/honeycomb-panel/> (дата обращения: 08.11.2025).
24. Ерасов В.С., Сибяев И.Г., Сутубалов А.И. Испытания образцов из трехслойных конструкций с сотовым наполнителем // *Труды ВИАМ*. 2025. № 10 (152). С. 133–155. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-133-155.
25. Шершак П.В., Куриленко Н.В., Косарев В.А. Влияние высоты полимерного сотового наполнителя на жесткость трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // *Авиационная промышленность*. 2016. № 2. С. 49–52.
26. Душин М.И., Ермолаев А.М., Катывев И.Я. и др. Углепластики в панелях пола трехслойной конструкции // *Авиационная промышленность*. 1978. № 6. С. 8–12.
27. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.

## References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
2. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Shokin G.I., Kutsevich K.E., Popkova E.A. Evaluation method and factors influencing the bonding quality between face and honey-comb cores in floor and interior aircraft panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
4. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
5. Komarov V.A., Kutsevich K.E., Pavlova S.A., Tyumeneva T.Yu. Optimization of three-layer honeycomb floor panels made of low-flammability polymer composite materials based on high-strength carbon and glass fibers and an adhesive binder. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ser.: Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2020, vol. 19, no. 3, pp. 51–72. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-3-51-72.
6. Ilyushenkov S.F., Batizat D.V., Sereduta P.I. Development of three-layer honeycomb floor panels for passenger aircraft made of polymer composites. *Polimernye materialy*, 2025, no. 3 (310), pp. 14–21.
7. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2023, 720 p.
8. Giyasov B.I., Seregin N.G., Seregin D.N. *Three-layer panels made of polymer composite materials: a tutorial*. Moscow: ASV Publishing House, 2015, 64 p.
9. Mikhailin Yu.A. *Special polymer composite materials*. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2008, 660 p.
10. *Characteristics of Hexcel honeycomb cores*. Available at: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Honeycomb> (accessed: November 08, 2025).
11. *Collins Aerospace's three-layer honeycomb floor panels*. Available at: <https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/industries/business-aviation/cabin/structures/honeycomb-panels> (accessed: November 08, 2025).
12. Shershak P.V., Shokin G.I., Egorov V.N. Technological Features of the Production of Three-Layer Honeycomb Aircraft Floor Panels. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 3, pp. 34–42.
13. *Technical Requirements. Three-Layer Honeycomb Panels for the Manufacture of the RRJ-95 Aircraft Floor*. Available at: <https://rostender.info/region/moskva-gorod/32180045-tender-dopolnenie-perechnya-postavshchikov-trehslojnyh-sotovyyh-panelej-pola-dlya-vs-emejstvarrj?ysclid=mf5qwacqiy574752643> (accessed: November 08, 2025).
14. *Technical requirements for composite panels of the passenger cabin floor, the floor of the flight deck, side panels, partitions and ceilings of the flight deck of the MC21 aircraft*. Available at: <https://tenmon.ru/1/31806547983> (accessed: November 08, 2025).
15. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. On the issue of production of floor panels from polymer composite materials for aircraft (review article). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 4 (2), pp. 198–213.
16. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 61–81. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
17. Sarychev I.A., Serkova E.A., Khmel'nitsky V.V., Zastrogina O.B. Thermosetting binders for aircraft floor panel materials (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), pp. 26–33. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 08, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.

18. Strelnikov S.V., Petukhov V.I., Postnov V.I., Shvets N.I. New solutions in the technology of manufacturing prepregs for interior panels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4 (2), pp. 498–507.
19. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Low-combustibility adhesive prepregs designed for the manufacture of integral and three-layer honeycomb structures aircraft technology. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), pp. 41–52. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
20. *Technical specifications of floor panels from The Gill Corporation*. Available at: <https://www.thegillcorp.com/products/floor-panels/> (accessed: November 08, 2025).
21. *Technical specifications for floor panels from AIM Altitude Ltd*. Available at: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/52337885/aim-composites-ltd-flitelam-uns2-technical-data-lindberg-lund-as> (accessed: November 08, 2025).
22. *Technical characteristics of floor panels from Euro-Composites group*. Available at: <https://www.euro-composites.com/en/portfolio/aviation/> (accessed: November 08, 2025).
23. *Showa Aircraft Industry Floor Panel Specifications*. Available at: <https://www.showaaircraft.com/product-category/honeycomb-panel/> (accessed: November 08, 2025).
24. Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I. Testing of samples from three-layer structures with honeycomb filler. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), pp. 133–155. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 08, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-133-155.
25. Shershak P.V., Kurilenko N.V., Kosarev V.A. Influence of the height of the polymer honeycomb filler on the stiffness of three-layer honeycomb aircraft floor panels. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2016, no. 2, pp. 49–52.
26. Dushin M.I., Ermolaev A.M., Katyrev I.Ya. et al. Carbon fiber reinforced plastics in floor panels of three-layer structure. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1978, no. 6, pp. 8–12.
27. Abramova M.G., Lutsenko A.N., Varchenko E.A. Concerning the aspects of validation of climate resistance of airborne materials at all life cycle stages (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.

#### Информация об авторах

**Шершак Павел Викторович**, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
**Яковлев Николай Олегович**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
**Баранников Александр Александрович**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Pavel V. Shershak**, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
**Nikolay O. Yakovlev**, Head of Laboratory, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
**Alexander A. Barannikov**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.12.2025.

The article was submitted 11.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 23.12.2025.