

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ВПЗ-25 ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

А.В. Копылов<sup>1</sup>, А.В. Коваленко<sup>1</sup>, Н.К. Сидельников<sup>1</sup>, А.О. Курносков<sup>1</sup>, А.В. Славин<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.** Приведены результаты исследования характеристик и микроструктуры образцов полимерного синтактного наполнителя холодного отверждения марки ВПЗ-25. По результатам испытаний образцов выполнены сравнительный анализ характеристик наполнителя ВПЗ-25 с характеристиками зарубежного аналога полимерного наполнителя холодного отверждения, а также отработка технологии заполнения сотовых панелей полимерным наполнителем ВПЗ-25. Выбраны оптимальные режимы отверждения.

**Ключевые слова:** авиационная техника, полимерный наполнитель ВПЗ-25, сферопластик, стеклянные микросферы, эпоксидное связующее, сотовые панели, полимерные композиционные материалы

**Для цитирования:** Копылов А.В., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Курносков А.О., Славин А.В. Исследование характеристик полимерного наполнителя холодного отверждения ВПЗ-25 для заполнения сотовых панелей элементов авиационной техники // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52.

Scientific article

## STUDYING THE CHARACTERISTICS OF VPZ-25 COLD-CURING POLYMER FILLER AND DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR FILLING HONEYCOMB PANELS FOR AIRCRAFT COMPONENTS

A.V. Kopylov<sup>1</sup>, A.V. Kovalenko<sup>1</sup>, N.K. Sidelnikov<sup>1</sup>, A.O. Kurnosov<sup>1</sup>, A.V. Slavin<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.** This paper presents the results of a study of the characteristics and microstructure of samples of cold-curing polymer syntactic filler grade VPZ-25. Based on the results of testing the samples, a comparative analysis of the characteristics of VPZ-25 with the characteristics of a foreign analogue of cold-curing polymer filler was performed. Based on the results of preliminary testing of VPZ-25, a technology for filling honeycomb panels with VPZ-25 polymer filler for aircraft components was developed under various conditions.

**Keywords:** aviation technique, VPZ-25 polymer filler, spheroplastic, glass microspheres, epoxy binder, honeycomb panels, polymer composite materials

**For citation:** Kopylov A.V., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Studying the characteristics of VPZ-25 cold-curing polymer filler and developing a technology for filling honeycomb panels for aircraft components. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52.

### Введение

В авиационной промышленности первостепенное значение при создании новой авиационной техники придается облегчению конструкций, которые применяются как для планера, так и для интерьера, т. е. снижению массы одновременно с увеличением их прочности и жесткости. Один из путей достижения этих целей – активное использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях воздушных судов [1–10].

В элементах авиационной техники для местного упрочнения панелей сотовых конструкций необходимо применять полимерный наполнитель-сферопластик. Несущие слои трехслойных сотовых конструкций (как и любые однородные пластины) в основном рассчитаны на распределенные по поверхности нагрузки, а при воздействии сосредоточенных нагрузок требуется соответствующее усиление (упрочнение). Существует также определенный класс трехслойных сотовых панелей с полимерным наполнителем, на которые в различных точках действуют сосредоточенные нагрузки [11–16], с помощью которых осуществляется воздействие, в том числе ударное [1]:

– на элементы трехслойных сотовых конструкций интерьера воздушного судна (элементы отделки фюзеляжа, бытовые блоки и т. д.), применяющиеся в качестве несилочных элементов [10];

– на трехслойные сотовые панели пола, используемые в качестве силовых элементов [1, 10–12].

К элементам трехслойных сотовых конструкций авиационного интерьера и панелей пола современных воздушных судов предъявляются достаточно жесткие требования:

– элементы сотовых конструкций должны иметь минимальную массу при соблюдении достаточно высоких требований к физико-механическим характеристикам и соответствовать нормам огнестойкости по АП-25.853 и т. д. [17];

– сотовые панели пола должны быть легкими, долговечными (с ресурсом не менее 10 тыс. летных часов), выдерживать достаточно высокие нагрузки с минимально допустимым прогибом, соответствовать нормам летной годности по горючести и т. д. [18].

В трехслойных сотовых конструкциях в качестве наполнителей используют различные материалы, обеспечивающие высоту разнесения обшивок. Широкое применение находят наполнители в виде сотовых структур (рис. 1), которые изготавливают из полимерных материалов: сотопласты на основе терморезистивных и термопластичных связующих; стекло-, угле- и органосотопласты; полимерные сотопласты на основе бумаги из ароматического полиамида и т. д. Свойства наполнителей в виде сотовых структур определяются их плотностью, формой и размером ячеек, толщиной сотовых блоков.

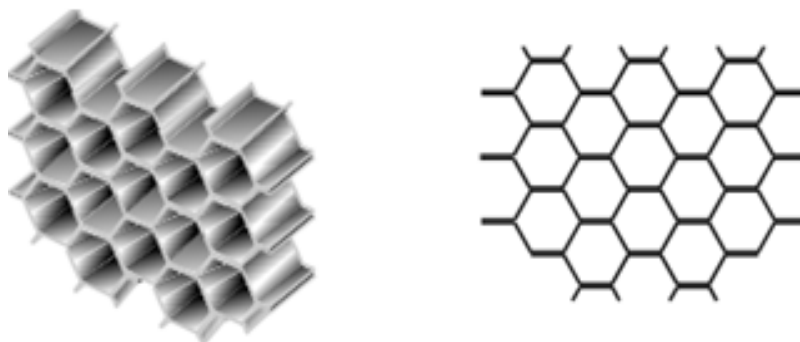


Рис. 1. Заполнитель в виде сотовых структур с гексагональной ячейкой

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для повышения прочности сотовых конструкций авиационной техники разработан полимерный наполнитель холодного отверждения марки ВПЗ-25 (сферопластик), состоящий из полимерного связующего и дисперсного наполнителя. В качестве полимерного связующего применяют эпоксидную смолу и аминный отвердитель, в качестве дисперсного наполнителя – стеклянные полые микросферы [19].

Интегральные значения параметров, свойств и характеристик неметаллических наполнителей в виде сотовых структур с гексагональной ячейкой, которые планируется упрочнить полимерным наполнителем ВПЗ-25, следующие:

Размер стороны шестигранной ячейки, мм	2,5÷4,2
Плотность, г/м <sup>3</sup>	25÷100
Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	0,26÷3,4
Модуль сдвига, МПа, в плоскости:	
xz	46,6
yz	30

### Материалы и методы

#### *Актуальность, цель и задачи исследования*

Требования к сферопластику ВПЗ-25 при его применении в составе ячеистой структуры трехслойных сотовых конструкций авиационной техники, определяющие актуальность исследования, следующие:

- воспринимать поперечное сжатие (рис. 2);
- предохранять тонкие несущие слои обшивок от местной и общей потери устойчивости, обеспечивая в то же время их совместную работу и высокую жесткость при сдвиге;
- позволять несущим слоям обшивок воспринимать продольное растяжение, сжатие и т. д.;
- обеспечивать большую жесткость и высокую несущую способность при сравнительно малой массе данных трехслойных сотовых конструкций авиационной техники при сочетании и взаимодействии составных элементов конструкций со сферопластиком.

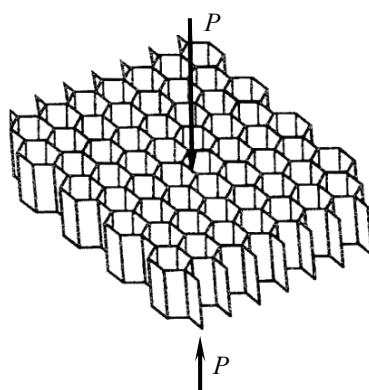
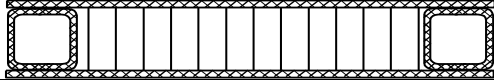
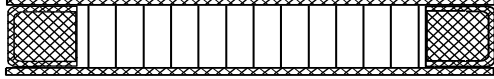





Рис. 2. Схема воздействия поперечного сжатия на наполнители в виде сотовых структур

Варианты типовых сечений и зоны установки в конструкции авиационной техники трехслойных сотовых панелей с регулируемыми высотами ( $t$ ,  $2t$  и  $4t$ ), в сотах которых с целью их упрочнения планируется применить сферопластик ВПЗ-25, приведены в табл. 1 и на рис. 3. Обшивки данных сотовых панелей изготовлены из ПКМ (стеклопластики и др.), а форма их поверхности может быть различной (одинарная и двойная кривизна и т. д.).

Типовые варианты сечений и зоны установки в конструкции авиационной техники трехслойных сотовых панелей, в сотах которых планируется применить сферопластик ВПЗ-25

Форма поверхности обшивок	Эскизы типовых сечений	Зоны установки
Плоская		Панели пола
Плоская, одинарной кривизны		Панели пола, силовые откидные панели
Плоская, двойной или одинарной кривизны		Панели пола, крышки люковых проемов
Плоская с линейчатыми перегибами, одинарной кривизны		Перегородки в салонах, сиденья и спинки сидений диванов в салонах
Плоская		Панели полов в кабинах пилотов и пассажирских отсеках

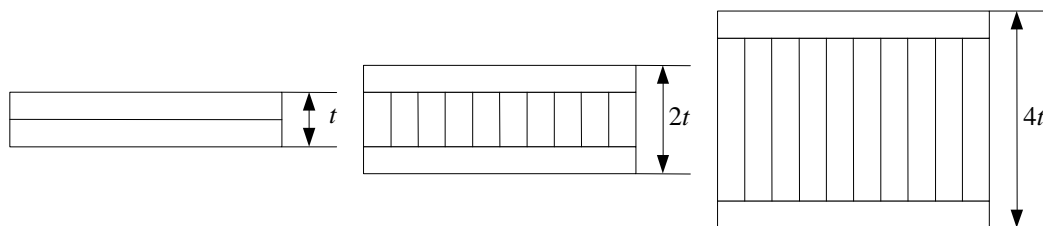


Рис. 3. Типовые варианты сечений сотовых панелей с регулируемыми высотами за счет применения сферопластика ВПЗ-25

В процессе эксплуатации авиационной техники к данным типовым вариантам сечений сотовых панелей с регулируемыми высотами при их упрочнении сферопластиком ВПЗ-25 предъявляются следующие требования:

- сохранение заданного контура при восприятии определенного уровня силовых нагрузок;
- сохранение несущей способности при их использовании в панелях пола кабин пилотов и пассажирских отсеков, в элементах конструкций авиационного интерьера.

Цель исследования – необходимость подтверждения характеристик композиции ВПЗ-25, зафиксированной на уровне состава, процессов ее изготовления, свойств и др. [19].

Для достижения данной цели необходимо провести:

- микроструктурные исследования скола сферопластика ВПЗ-25;
- исследования характеристик (плотность и прочность при сжатии при различных температурах) на образцах сферопластика ВПЗ-25;
- сравнительный анализ значений характеристик сферопластика ВПЗ-25 со значениями характеристик зарубежного аналога при различных температурах;
- отработку технологии заполнения сферопластиком ВПЗ-25 сотовых панелей с целью их упрочнения для элементов авиационной техники.

**Объекты и методы исследования**

Для исследований характеристик сферопластика ВПЗ-25 и отработки технологии изготовления сотовых панелей для элементов авиационной техники при упрочнении сот полимерным наполнителем ВПЗ-25 изготовлены:

- элементарные образцы сферопластика ВПЗ-25 в форме прямоугольного параллелепипеда для испытаний по определению плотности и прочности при сжатии;
- образцы сотовых панелей в форме прямоугольного параллелепипеда (рис. 4), заполненные полимерным наполнителем ВПЗ-25, для отработки технологии изготовления сотовых панелей.

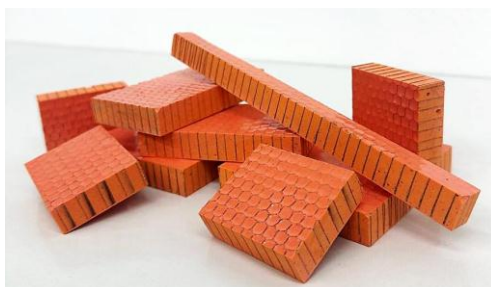


Рис. 4. Образцы сотовых панелей, заполненные сферопластиком марки ВПЗ-25

До исследования характеристик сферопластика ВПЗ-25 и отработки технологии изготовления сотовых панелей, заполненных сферопластиком, проведены исследования микроструктуры образцов ВПЗ-25 методами световой и электронной сканирующей микроскопии при увеличениях от  $\times 40$  до  $\times 10000$ .

Исследование характеристик сферопластика ВПЗ-25 проводили на элементарных образцах, которые отличались друг от друга линейными размерами. Для образцов полимерного наполнителя ВПЗ-25 проведены испытания по определению плотности и прочности при сжатии. Перечень видов испытаний образцов полимерного наполнителя ВПЗ-25, наименования характеристик и нормативные документы приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики и нормативные документы по испытаниям образцов  
полимерного наполнителя ВПЗ-25**

Характеристики (вид испытаний)	Единица измерения	Нормативная документация
Плотность	г/см <sup>3</sup>	ГОСТ 15139–69
Прочность при сжатии при температурах –60, 20, 80 и 100 °С	МПа	ГОСТ 4651–2014
Температура стеклования	°С	ГОСТ Р 56753–2015

Испытания проводили в соответствии с нормативной документацией по соответствующим методикам.

Определение плотности проводили по ГОСТ 15139–69. Метод заключается в определении плотности вещества по отношению массы образца к его объему непосредственно взвешиванием и обмером. Объем образцов правильной геометрической формы (прямоугольный параллелепипед) определен путем вычисления по результатам его линейных замеров. Метод применяется для определения плотности (объемной массы) изделий и полуфабрикатов (стержни, бруски, трубы) и обеспечивает точность измерения плотности до 0,5 % при точности измерения объема 0,3 % и массы 0,2 %. Определение плотности сферопластика ВПЗ-25 проводили на образцах в количестве 10 шт. (без кондиционирования) при температуре  $23,0 \pm 0,1$  °С.

Плотность вычисляли по формуле

$$\rho_t = \frac{M}{V},$$

где  $M$  – масса образца, г;  $V$  – объем образца при температуре измерения, см<sup>3</sup>.

Определение прочности при сжатии сферопластика ВПЗ-25 при температурах испытаний –60, 23±2, 80 и 100 °С проводили по ГОСТ 4651–2014. Образец помещали между опорными площадками универсальной испытательной машины так, чтобы его центральная вертикальная ось совпадала с центральной осью поверхностей опорных площадок. Перед испытаниями по определению прочности при сжатии выполнена проверка параллельности торцов образцов относительно поверхностей опорных площадок, а затем осуществлена настройка универсальной испытательной машины таким образом, чтобы поверхности торцов испытуемых образцов касались опорных площадок. В процессе испытания на сжатие образцов сферопластика ВПЗ-25 скорость их нагружения, равная скорости сближения опорных площадок универсальной испытательной машины, составила 5 мм/мин. Образец нагружали до разрушения и фиксировали максимальное значение нагрузки до разрушения.

Прочность при сжатии вычисляли по формуле

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

где  $F$  – нагрузка при сжатии, Н;  $A$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Испытания по определению температуры стеклования образца ВПЗ-25 проводили по ГОСТ 56723–2015 методом термомеханического анализа при определенных значениях постоянной скорости нагрева и статической нагрузки. Температуру стеклования образца полимерного наполнителя ВПЗ-25 определяли как точку пересечения касательных к кривой термомеханического анализа. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение результатов всех измерений.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### **Результаты и обсуждение**

Результаты микроструктурных исследований, проведенных до испытаний на прочность при сжатии, скола сферопластика ВПЗ-25 методами световой и электронной сканирующей микроскопии при увеличениях от ×40 до ×10000 показали (рис. 5), что:

– в объеме образца хаотично распределены полые стеклянные микросферы, представляющие собой дисперсные сыпучие порошки, состоящие из отдельных тонкостенных сферических частиц. Размеры диаметра тонкостенных сферических частиц, получаемых при высокотемпературном нагреве измельченного стекла, находятся в диапазоне от 20 до 120 мкм (основная масса частиц имеет диаметр от 30 до 60 мкм). Поверхность микросфер гладкая, структура материала характеризуется высокой плотностью упаковки наполнителей;

– в объеме сферопластика ВПЗ-25 встречается небольшое количество разрушенных микросфер, а также хорошо заметны частицы неправильной формы – порошкообразные наполнители;

– при изготовлении скола образца на границе кристаллической частицы и матрицы образуется микротрещина;

– дисперсные наполнители в объеме сферопластика ВПЗ-25 распределены равномерно и одновременно с высоким уровнем адгезии к полимерной основе;

– следует отметить высокий уровень адгезионной прочности полимерной основы (матрицы) к поверхности микросфер, что характеризуется монолитной границей раздела между ними.

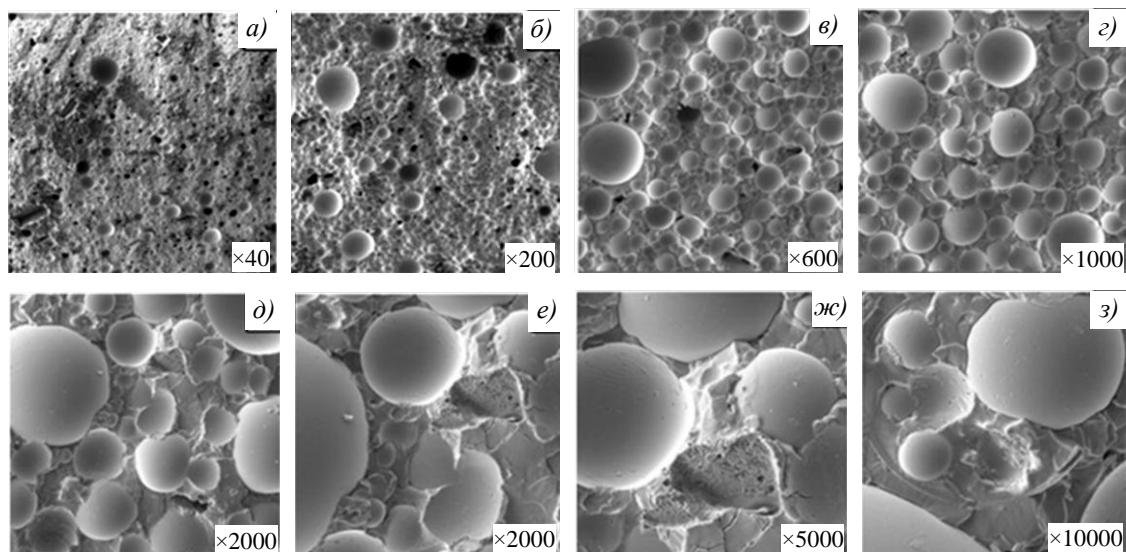


Рис. 5. Микроструктуры скола сферопластика ВПЗ-25

Результаты испытаний по определению плотности и прочности при сжатии элементарных образцов сферопластика ВПЗ-25 при температурах от  $-60$  до  $+80$  °С, а также до  $+100$  °С, соответствующих диапазону температур на этапе эксплуатации сотовых конструкций авиационной техники, а также результаты сравнительного анализа значений характеристик сферопластика ВПЗ-25 со значениями характеристик зарубежного аналога [20] представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Определение плотности образцов сферопластика ВПЗ-25**

Условный номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,63	0,62	0,62	0,63	0,63	0,64	0,65	0,65	0,64	0,63	0,63

Таблица 4

**Сравнение значений показателей образцов сферопластика ВПЗ-25 со значениями показателей зарубежного аналога при различных температурах испытаний**

Показатель	Значения показателей сферопластика	
	ВПЗ-25*	Ерораст 1618-D/B (США)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,62–0,65 0,63	0,70
Прочность при сжатии, МПа, при температуре, °С:		
–60	60–74 69	–
23±2	41–53 49	35
80	5,2–8,6 7,2	3
100	3,8–4,6 4,1	–

\* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

Видно, что значение плотности сферопластика ВПЗ-25 меньше значения плотности зарубежного материала-аналога Erocast 1618-D/B фирмы Huntsman (США), но в то же время значения прочности при сжатии при температурах 23±2 и 80 °С превосходят аналогичные значения прочности при сжатии представленного материала-аналога Erocast 1618-D/B.

С целью оценки разброса результатов испытаний для совокупности образцов сферопластика ВПЗ-25 производили статистическую обработку значений плотности и прочности при сжатии, полученных при различных температурах испытаний: –60, 23±2, 80 и 100 °С.

Расчет разброса значений результатов испытаний для совокупности образцов сферопластика ВПЗ-25 осуществляли по следующим формулам:

- среднее арифметическое (математическое ожидание)

$$\bar{X}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где  $\sum_{i=1}^n X_i$  – сумма измерений значений плотности;  $n$  – количество образцов;

- среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}};$$

- коэффициент вариации

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%.$$

Значения параметров статистической обработки плотности и прочности при сжатии, характеризующие разброс измерений, для образцов сферопластика ВПЗ-25 при различных температурах испытаний – коэффициент вариации (относительное стандартное отклонение), приведены в табл. 5 и 6 соответственно.

Значения физико-механических характеристик сферопластика ВПЗ-25 при различных температурах испытаний представлены на рис. 6 и 7.

Таблица 5

**Значения параметров статистической обработки значений плотности образцов сферопластика ВПЗ-25 в количестве 10 шт. при температуре воздуха в помещении 23±2 °С**

Математическое ожидание значений плотности, г/см <sup>3</sup>	Среднеквадратическое отклонение значений плотности, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент вариации (относительное стандартное отклонение), %	Оценка меры разброса данных по пороговым значениям коэффициента вариации 10, 20 и 33 %
0,634	0,01	1,609	При <10 % изменчивость вариационного ряда данных значений считается незначительной; при <33 % – совокупность данных значений считается однородной

Таблица 6

**Значения параметров статистической обработки значений прочности при сжатии образцов сферопластика ВПЗ-25 в количестве 5 шт. при различных температурах испытаний**

Температура испытания, °С	Математическое ожидание значений прочности при сжатии, МПа	Среднеквадратическое отклонение значений прочности при сжатии, МПа	Коэффициент вариации (относительное стандартное отклонение), %	Оценка меры разброса данных по пороговым значениям коэффициента вариации 10, 20 и 33 %
23±2	48,6	4,27	8,78	При <10 % изменчивость вариационного ряда данных значений считается незначительной; при <33 % – совокупность данных значений считается однородной
-60	68,6	4,67	6,81	
80	7,22	1,27	17,68	При >10 %, но <20 % – изменчивость вариационного ряда данных значений относится к средней; при <33 % – совокупность данных значений считается однородной
100	4,08	0,33	8,11	При <10 % изменчивость вариационного ряда данных значений считается незначительной; при <33 % – совокупность данных значений считается однородной

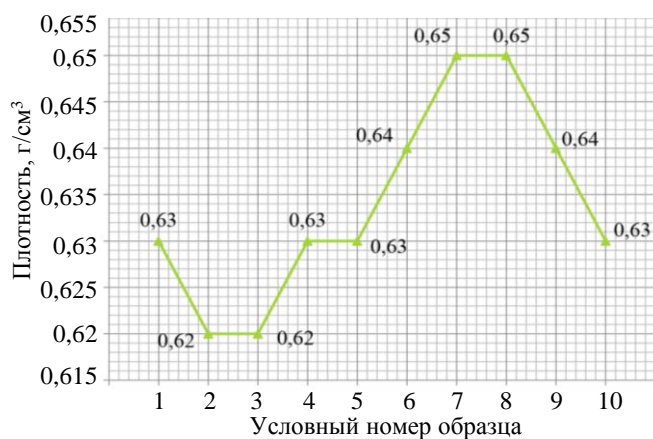


Рис. 6. Значения плотности образцов сферопластика ВПЗ-25 при температуре воздуха в помещении 23±2 °С

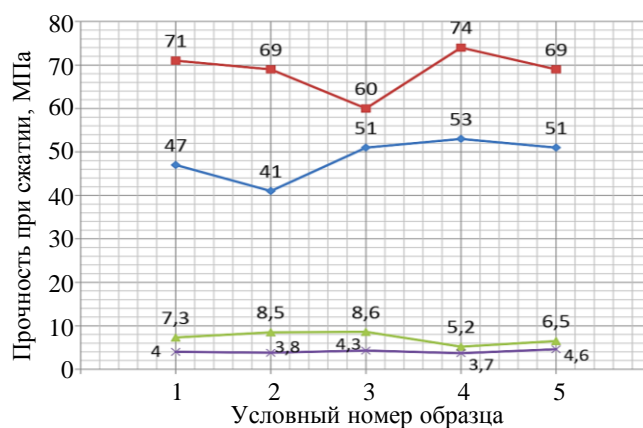


Рис. 7. Значения прочности при сжатии образцов сферопластика ВПЗ-25 при температурах -60 (■), 23 (◆), 80 (▲) и 100 °С (×)

Сравнительный анализ динамики изменения прочности при сжатии по средним значениям для сферопластиков ВПЗ-25 и Erocacst 1618-D/B (США) в зависимости от роста температуры испытаний без учета временного фактора приведен на рис. 8. Температурная зависимость скорости снижения прочности при сжатии по средним значениям носит линейный характер. При росте температуры испытания значение скорости снижения прочности при сжатии для сферопластика ВПЗ-25 на 31 % меньше значения аналогичной характеристики для сферопластика Erocacst 1618-D/B, что свидетельствует об остаточной прочности сферопластика ВПЗ-25 (по сравнению со сферопластиком Erocacst 1618-D/B) при повышенных температурах 80–100 °С. Значения скоростей снижения прочности при сжатии сферопластиков ВПЗ-25 и Erocacst 1618-D/B при росте температуры испытания определяли по коэффициентам наклона (угловым коэффициентам) линий регрессии, аппроксимирующих экспериментальные данные.

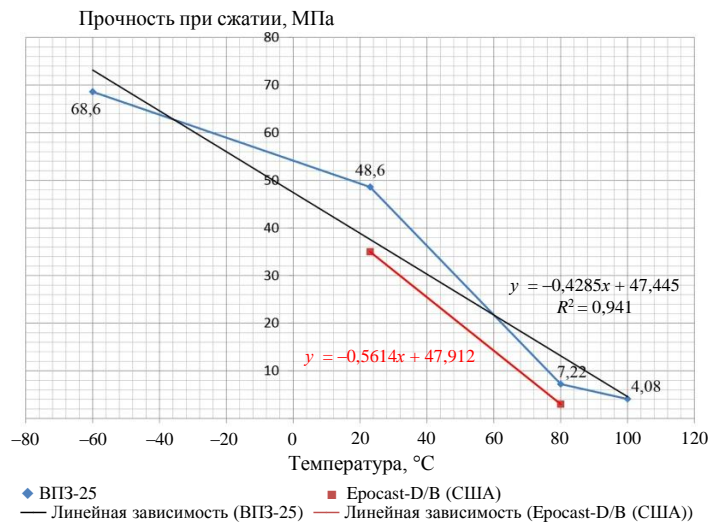


Рис. 8. Сравнительная динамика (по среднему значению) прочности при сжатии образцов из сферопластиков ВПЗ-25 и Erocacst 1618-D/B (США) от воздействия температуры испытаний

С целью отработки технологии заполнения сотовых панелей изготовлены образцы сотовой панели, заполненные сферопластиком ВПЗ-25 (рис. 4).

Заполнение сотовых панелей проводили путем введения композиции сферопластика ВПЗ-25 в участки сотовой конструкции с помощью шприца с винтовой подачей, состоящего из пуансона, корпуса и шпателя (с широкой и узкой стороной для различных участков). Перемешивание компонентов композиции, представляющей собой пастообразную и вязкотекучую массу, проводили до образования однородной массы и цвета (готовая композиция пригодна к применению в течение не более 2 ч). Однородность цвета композиции служит индикатором равномерности совмещения компонентов, что гарантирует полное протекание реакции отверждения без образования подтеков на заполненной сотовой панели после 24 ч отверждения. Полимерные соты, заполненные композицией сферопластика ВПЗ-25 до его отверждения, представлены на рис. 9.

Результаты визуального исследования показали, что образцы сотовых панелей, заполненные сферопластиком ВПЗ-25, имеют однородную структуру заполнения. В композиции сферопластика ВПЗ-25 отсутствуют включения и непромесы в виде несмоченных полимерной основой дисперсных наполнителей. Ячейки сотового заполнителя заполнены равномерно без образования пустот и расслоений, что подтверждается отсутствием таковых на поперечных срезах сотовой панели.

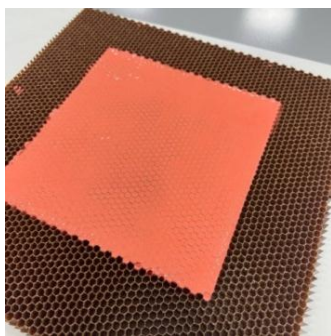


Рис. 9. Полимерные соты, заполненные композицией сферопластика ВПЗ-25 до его отверждения

Для выбора оптимальных технологических режимов заполнения и возможности совместного формования с другими ПКМ, применяемыми в панелях интерьера авиационной техники, а также для сокращения продолжительности отверждения полимерного заполнителя ВПЗ-25 проведены исследования по подбору режимов отверждения как при комнатной температуре, так и при температурах ступенчатого нагрева до 100 °С и больше (табл. 7).

Таблица 7

**Результаты исследований образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденного по различным режимам**

Свойства	Значения свойств для режимов отверждения					
	1	2	3	4	5	6
Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\frac{0,69-0,71}{0,70}$	$\frac{0,55-0,56}{0,56}$	$\frac{0,55-0,56}{0,56}$	$\frac{0,29-0,50}{0,39}$	$\frac{0,54-0,56}{0,55}$	$\frac{0,60-0,62}{0,61}$
Прочность при сжатии, МПа, при температуре, °С:						
	23±2	$\frac{29,0-34,5}{32,1}$	$\frac{56,0-59,0}{57,7}$	$\frac{37,5-44,0}{38,6}$	$\frac{12,0-28,0}{18,0}$	$\frac{32,0-37,5}{34,0}$
80	$\frac{18,5-21,5}{20,2}$	$\frac{13,0-17,5}{15,0}$	$\frac{13,0-19,5}{16,5}$	$\frac{10,0-19,0}{13,5}$	$\frac{16,5-22,0}{19,0}$	$\frac{18,0-30,0}{25,5}$
Температура стеклования, °С	76	68	74	71	71	67
Примечание. В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – среднее арифметическое.						

По результатам исследований выбрано три оптимальных режима отверждения (2, 3, 6) сферопластика ВПЗ-25.

Сравнительный анализ физико-механических характеристик образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по различным режимам, приведен на рис. 10–12.

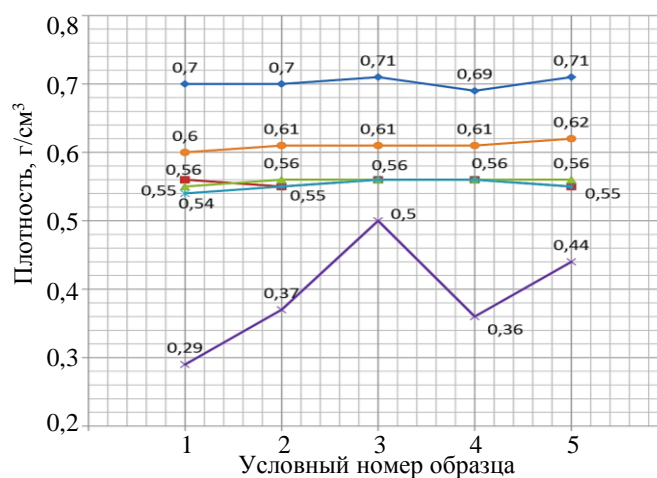


Рис. 10. Сравнительный анализ значений плотности образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по режимам 1 (◆), 2 (■), 3 (▲), 4 (×), 5 (●) и 6 (●)

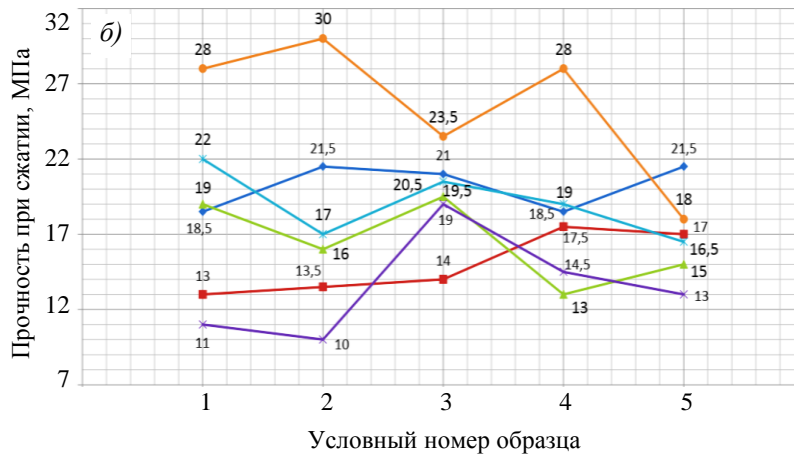
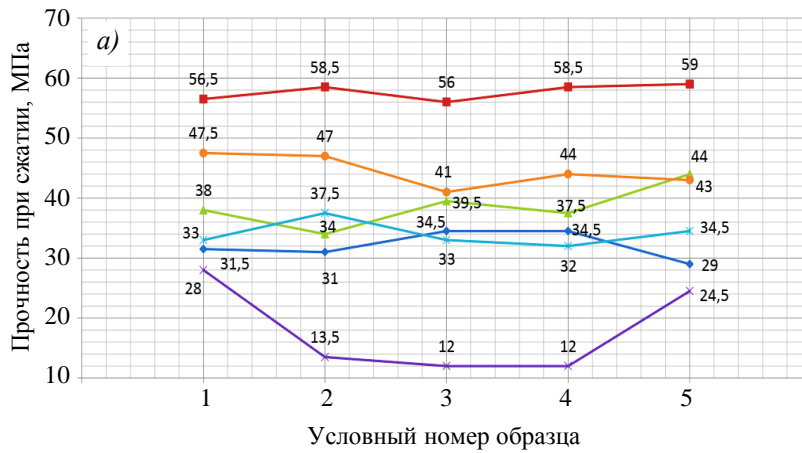


Рис. 11. Сравнительный анализ значений прочности при сжатии при температурах 23±2 (а) и 80 °С (б) образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по режимам 1 (◆), 2 (■), 3 (▲), 4 (×), 5 (✱) и 6 (●)

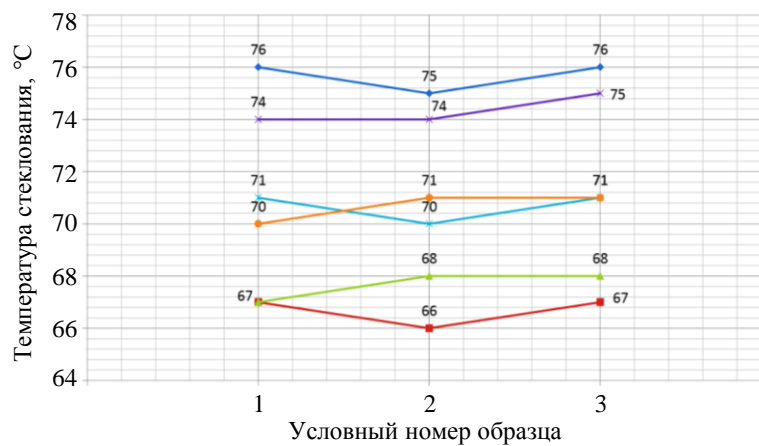


Рис. 12. Сравнительный анализ значений температуры стеклования образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по режимам 1 (◆), 2 (■), 3 (▲), 4 (×), 5 (✱) и 6 (●)

С учетом применения оптимальных режимов отверждения сферопластика ВПЗ-25 образец трехслойной сотовой панели с обшивками из стеклопластика для элементов авиационной техники, полученный в процессе совместного формования сферопластика ВПЗ-25 и препрега стеклопластика, представлен на рис. 13.

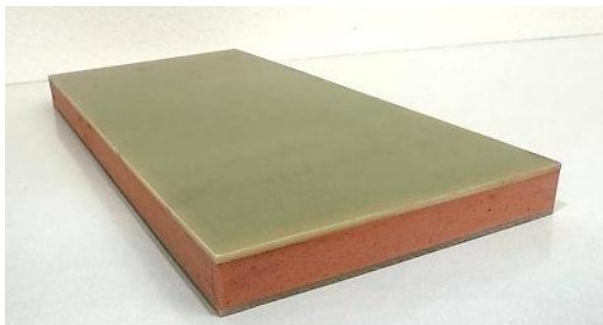


Рис. 13. Образец трехслойной сотовой панели со сферопластиком ВПЗ-25

### Заключения

Исследованы образцы сферопластика ВПЗ-25 и получены следующие результаты:

- определены характеристики плотности и прочности при сжатии образцов сферопластика ВПЗ-25;
- в ходе статистической обработки и оценки меры разброса результатов испытаний установлено, что изменчивость вариационного ряда данных значений плотности и прочности при сжатии считается незначительной, а совокупность данных значений считается однородной;
- результаты исследования микроструктуры образцов сферопластика ВПЗ-25 показали высокий уровень адгезионной прочности полимерной основы (матрицы) к поверхности наполнителя в виде микросфер, что приводит к образованию монолитной границы раздела между ними.

Сравнительный анализ значений физико-механических характеристик сферопластика ВПЗ-25 со значениями характеристик зарубежного материала-аналога Erocast 1618-D/B фирмы Huntsman (США) при различных температурах показал, что значение плотности сферопластика ВПЗ-25 меньше значения плотности сферопластика Erocast 1618-D/B, но в то же время значения прочности при сжатии сферопластика ВПЗ-25 при температурах  $23 \pm 2$  и  $80$  °С превосходят значения прочности при сжатии материала Erocast 1618-D/B в аналогичных условиях.

По результатам исследований выполнена отработка технологии заполнения сотовых панелей сферопластиком ВПЗ-25 и выбраны оптимальные режимы для сокращения времени отверждения сферопластика и возможности проведения формования элементов панелей авиационной техники за один технологический цикл совместно с обшивками из ПКМ.

*Результаты исследования получены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (по соглашению № 075-11-2025-013 от 27.02.2025 г.) в рамках реализации комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла (катализаторы и композиты).*

### Список источников

1. Шершак П.В. Рациональный выбор проектных решений при разработке конструкции пола из полимерных композиционных материалов для воздушных судов: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2017. 20 с.
2. Сливинский В.И., Ткаченко Г.В., Сливинский М.В. Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 3. С. 169–173.

3. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
4. Шершак П.В., Косарев В.А., Куриленко Н.В. Влияние высоты полимерного сотового заполнителя на жесткость трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // *Авиационная промышленность*. 2016. № 2. С. 49–52.
5. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
6. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
7. Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Цыкун Р.Г., Донецкий К.И. Конструкционная многослойная тканая преформа для изготовления фрагмента интегральной панели летательного аппарата // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
8. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
9. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
10. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
11. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
12. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М.: Машиностроение, 1982. 152 с.
13. Михайлин Ю.М. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 715 с.
14. Минаков В.Т., Постнов В.И., Швец Н.И., Застрогина О.Б., Петухов В.И., Макрушин К.В. Особенности изготовления трехслойных сотовых панелей с полимерным заполнителем горячего отверждения // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 3. С. 6–9.
15. 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.
16. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 35-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 23.10.2015. 5-е изд. с поправками 1–8. М.: Авиаиздат, 2015. 290 с.
17. Ильюшенков С.Ф., Цветков В.Е., Середута П.И., Цветкова Н.Н. Современные конструкторско-технологические разработки элементов интерьера ЛА // *Полимерные материалы*. 2024. № 12. С. 36–42.
18. Ильюшенков 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.
19. Капустянская М.А., Любимова А.С., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Ткачук А.И., Славин А.В. Разработка полимерного синтактного заполнителя холодного отверждения с улучшенными физико-механическими характеристиками // *Труды ВИАМ*. 2024. № 11 (141). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.

20. Epocast 1618-D/B. Сайт компании Freeman Manufacturing & Supply. URL: <https://freemansupply.com/products/liquid-tooling-materials/epoxy-aerospace-syntactics/epocast-1618-epoxy-syntactic> (дата обращения: 05.11.2025).

### References

1. Shershak P.V. *Rational Selection of Design Solutions in Developing Aircraft Floor Structures from Polymer Composite Materials*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2017, 20 p.
2. Slivinsky V.I., Tkachenko G.V., Slivinsky M.V. Efficiency of Using Honeycomb Structures in Aircraft. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2005, no. 3, pp. 169–173.
3. Alfutov N.A., Zinoviev P.A., Popov B.G. *Calculation of Multilayer Plates and Shells from Composite Materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 264 p.
4. Shershak P.V., Kosarev V.A., Kurilenko N.V. The influence of the height of the polymer honeycomb core on the rigidity of three-layer honeycomb floor panels of aircraft. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2016, no. 2, pp. 49–52.
5. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new-generation materials for complex technical systems. *Report of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
6. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 28.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
7. Belinis P.G., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Tsykun R.G., Donetskii K.I. Design research on a structural multilayer woven preform of an integral panel fragment for aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 29, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
8. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
9. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
10. Panin V.F., Gladkov Yu.A. *Structures with Filler*: Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 272 p.
11. Endogur A.I., Weinberg M.V., Ierusalimsky K.M. *Honeycomb Structures. Selection of Parameters and Design*. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 200 p.
12. Panin V.F. *Structures with Honeycomb Filler*. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 152 p.
13. Mikhailin Yu.M. *Fibrous Polymer Composite Materials in Engineering*. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2013, 715 p.
14. Minakov V.T., Postnov V.I., Shvets N.I., Zastrogina O.B., Petukhov V.I., Makrushin K.V. Features of the manufacture of three-layer honeycomb panels with a hot-curing polymer filler. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 6–9.
15. 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.
16. *Airworthiness standards for air-planes of the transport category: AP-25*: utv. Postanovleniyem 35-y sessii Soveta po aviatsii i ispolzovaniyu vozdušnogo prostranstva 23.10.2015. 5-ye izd. s popravkami 1–8. M.: Aviaizdat, 2015, 290 p.

17. Ilyushenkov S.F., Tsvetkov V.E., Sereduta P.I., Tsvetkova N.N. Modern design and technological developments of aircraft interior elements. *Polimernye materialy*, 2024, no. 12, pp. 36–42.
18. 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.
19. Kapustianskaia M.A., Lyubimova A.S., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Tkachuk A.I., Slavin A.V. Development of a cold-curing polymer syntactic filler with enhanced physico-mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.
20. Epocast 1618-D/B. Available at: <https://freemansupply.com/products/liquid-tooling-materials/epoxy-aerospace-syntactics/epocast-1618-epoxy-syntactic> (accessed: November 05, 2025).

*Информация об авторах*

**Копылов Алексей Васильевич**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Коваленко Антон Владимирович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Сидельников Николай Константинович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Курносков Артем Олегович**, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Славин Андрей Вячеславович**, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Aleksey V. Kopylov**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Anton V. Kovalenko**, Head of the Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nikolay K. Sidelnikov**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Artem O. Kurnosov**, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Andrey V. Slavin**, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 28.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.11.2025.  
The article was submitted 28.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.11.2025.