Научная статья

УДК 678.8
DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-99-109

ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РЕАКЦИИ ОТВЕРЖДЕНИЯ СФЕРОПЛАСТИКА ВПЗ-25 И ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛЕ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Д.Н. Шафиев[1], А.И. Ткачук[1], Е.С. Суворова[1], Г.Б. Эльдяева[1], А.В. Коваленко[1], Н.К. Сидельников[1]

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

Аннотация. *Статья посвящена обзору свойств разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ сферопластика марки ВПЗ-25, в частности климатическим испытаниям и кинетическим закономерностям. Приведены результаты исследования характеристик образцов полимерного синтактного заполнителя холодного отверждения марки ВПЗ-25 после климатических испытаний. Проведены кинетические исследования с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. По результатам исследований сделаны выводы о возможности использования сферопластика в условиях повышенной влажности и температуры и применении его в интерьере летательных аппаратов.*

Ключевые слова: *сферопластик, синтактный заполнитель, эпоксидное связующее, сотовые панели, холодное отверждение, стеклянные микросферы, авиация, судостроение, климатические испытания, тропикостойкость, пожарная безопасность*

Для цитирования: Шафиев Д.Н., Ткачук А.И., Суворова Е.С., Эльдяева Г.Б., Коваленко А.В., Сидельников Н.К. Исследования кинетических закономерностей реакции отверждения сферопластика ВПЗ-25 и изменения его физико-механических характеристик после тепловлажностного воздействия // Труды ВИАМ. 2026. № 11 (165). С. 99–109. URL: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-99-109.

Scientific article

STUDY OF THE KINETIC REGULARITIES OF THE CURING REACTION OF SPHEROPLASTIC VPZ-25 AND CHANGES IN ITS PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS AFTER HEAT AND HUMIDITY EXPOSURE

D.N. Shafiev[1], A.I. Tkachuk[1], E.S. Suvorova[1], G.B. Eldyaeva[1], A.V. Kovalenko[1], N.K. Sidelnikov[1]

[1]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 article provides the review of characteristics of the VPZ-25 syntactic polymer filler developed at the NRC «Kurchatov Institute» – VIAM considering climatic tests and kinetics patterns. The paper presents the results of a study of the characteristics of samples of VPZ-25 cold-curing syntactic polymer filler after climatic tests. Kinetic studies were conducted using the differential scanning calorimetry (DSC). Based on the research results, conclusions were drawn regarding the possibility of using this spheroplastic under conditions of elevated humidity and temperature, as well as its application in aircraft interiors.*

Keywords: *spheroplastic, syntactic filler, epoxy binder, honeycomb panels, cold curing, glass microspheres, aviation, shipbuilding, climatic tests, tropical resistance, fire safety*

For citation: Shafiev D.N., Tkachuk A.I., Suvorova E.S., Eldyaeva G.B., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K. Study of the kinetic regularities of the curing reaction of spheroplastic VPZ-25 and changes in its physical and mechanical characteristics after heat and humidity exposure. *Trudy VIAM*, 2026, no. 11 (165), pp. 99–109. Available at: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-99-109.

Введение

Статистика рынка синтактных заполнителей пенопластов показывает, что это динамично развивающийся, но достаточно узкоспециализированный рынок. Объем рынка в 2024 г. оценивается приблизительно в $175 млн, а к 2030–2032 гг. он может достичь $234 млн [1, 2].

Сферопластики или синтактные заполнители являются одной из разновидностей композиционных материалов. Они обладают уникальными техническими характеристиками (высокой прочностью, низкой плотностью, устойчивостью к воздействию окружающей среды) и находят применение в строительной, аэрокосмической, машиностроительной и судостроительной промышленности.

Благодаря своим упруго-прочностным характеристикам с помощью сферопластика можно создавать легковесные, но при этом достаточно прочные конструкции. Данная особенность очень востребована для морского и подводного применения – из сферопластика изготавливают блоки плавучести и высокопрочные элементы глубоководных аппаратов для защиты оборудования на больших глубинах [3, 4].

В авиационной промышленности для облегчения конструкции уже давно используют трехслойные сотовые конструкции, которые при распределении нагрузки по всей поверхности сохраняют свои прочностные свойства. В зонах повышенной нагрузки, таких как зона установки крепежа, в торцевых участках и отверстиях, в местах закрепления электротехнических кабелей, а также в пустотах трехслойных сотовых конструкций свободный объем заполняют легковесным материалом – синтактным заполнителем-сферопластиком. Синтактные заполнители – пенопласты или сферопластики предназначены для местного упрочнения панелей сотовых конструкций с целью повышения их прочности и жесткости, установки барьера для влаги и т. д. [5].

Помимо пониженной массы сферопластика, материал обладает и другими преимуществами: диэлектрческими свойствами, за счет чего в совокупности с прочностными свойствами появляется перспектива его применения в радиоэлектронике; сохраняется возможность нанесения защитных покрытий. Исследована технология изготовления деталей для антенных устройств, в частности «стаканов» для спиральных антенн. Материал заливается в формы, а затем на поверхность наносится лакокрасочное покрытие, которое не влияет на его диэлектрические показатели.

Разработана технология получения открытопористых синтактных пенопластов, которые затем подвергаются термической обработке (карбонизации и карбидизации). Из таких пенопластов получают пеноуглерод и карбидные материалы с равномерной ячеистой структурой. Они используются как теплоизоляционные материалы, устойчивые в окислительных средах при температурах >1000 °С, что критично для авиации и ракетостроения [6].

На западном рынке отдельное внимание уделяют модификации полимерной основы для достижения новых или улучшенных свойств. Так, в журнале European Polymer Journal вышла обзорная статья, посвященная свойствам, характеристикам синтактных пенопластов на основе эпоксидной матрицы и полых стеклянных микросфер [7]. В Трентском университете в 2021 г. создали многофункциональный материал, сочетая эпоксидную смолу, стеклянные микросферы и микрокапсулы с парафином, с целью придания материалу термоаккумулирующих свойств [8]. Ведутся также исследования в направлении создания биоосновных композиций [9, 10], которые в дальнейшем, в отличие от термореактивных материалов, можно перерабатывать.

На рынке представлен ряд отечественных синтактных заполнителей холодного типа отверждения (табл. 1), однако сфера их назначения не подходит для использования в составе материалов авиационного назначения.

Таблица 1

Отечественные материалы холодного отверждения

Характеристика	ВПЗ-25	СТЭП-ЗК4-Н	Компаунд ПК-34	СТЭП-ЗК2
Основное применение	Упрочнение авиаконструкций	Герметизация электроники (авиа/космос)	Пропитка трансформаторов	Заливка электроники общего назначения
Плотность, г/см³	0,6–0,65	≤0,6	≤0,62	1,2–1,4
Температура эксплуатации, °С	До 100	От –60 до +100	Нет данных	От –60 до +150
Производитель	НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ	НПК «СТЭП»	ООО «КАСВ ГРУПП»	НПК «СТЭП»

Сферопластик марки ВПЗ-25 разработан в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Полимерная матрица состоит из эпоксидных смол и аминных отвердителей, а в качестве дисперсного наполнителя применяют стеклянные полые микросферы [11, 12]. Отверждение материала происходит при комнатной температуре, но также возможно и в ускоренном режиме.

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

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

Данная статья посвящена обзору свойств разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ сферопластика марки ВПЗ-25 для повышения прочности сотовых конструкций авиационной техники.

Материалы и методы

Синтактный полимерный заполнитель марки ВПЗ-25 изготовлен с использованием эпоксидных смол, аминных отвердителей и специальных добавок, а именно: стеклянных микросфер, пигмента и антипирена. Исследованы теплофизические и физико-механические свойства полученного двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-25, его реологические показатели и жизнеспособность.

Испытания по определению плотности образцов, изготовленных на основе двух опытных партий полимерного синтактного заполнителя-сферопластика марки ВПЗ-25, проводили по ГОСТ 15139–69 «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)», где применялся метод обмера и взвешивания (по объему и массе), сущность которого заключается в определении плотности вещества по отношению массы образца к его объему, определяемым непосредственно взвешиванием и обмером. Объем образца правильной геометрической формы определен путем вычисления по результатам замера его линейных размеров.

Испытания по определению прочности при сжатии образцов, изготовленных на основе двух опытных партий полимерного синтактного заполнителя-сферопластика марки ВПЗ-25, проводили по ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» при различных температурах (23±2 и 80 °С).

Испытания по определению прочности при растяжении сферопластика ВПЗ-25 при различных температурах испытания (от –60 до +120 °С) проводили по ГОСТ 11262–2017, который устанавливает метод определения свойств жестких и полужестких термореактивных формовочных материалов при растяжении.

Исследование водопоглощения проводили по ГОСТ 4650–2014. Образцы размером 10×10×15 мм выдерживали в течение 24 ч при температуре 20±5 °С (табл. 2).

Таблица 2

Значения параметров регламентированного переменного тепловлажностного режима

Температура, °С	Относительная влажность, %	Продолжительность экспозиции, ч
50±5	98±2	8
20±5	98±2	12
20±5	50±10	4

Тепловой эффект реакции и степень доотверждения (конверсию) определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Метод, в котором разница в подводе энергии к образцу и эталонному материалу изменяется как функция температуры, в то время как образец и эталонный материал нагреваются по контролируемой температурной программе (ICTAC, ASTM E473-85, ISO 11357).

При определении теплопроводности и температуропроводности образцов сферопластика ВПЗ-25 применяли метод лазерной вспышки, основанный на измерении подъема температуры на задней поверхности образца сферопластика ВПЗ-25, происходящего под действием поглощения передней поверхностью образца короткого импульса энергии лазера, который является тепловым источником. Параметры короткого импульса при воздействии лазера: длина волны 1064 нм, длительность действия импульса энергии 0,3 мс.

Испытания по определению удельной теплоемкости образцов сферопластика ВПЗ-25 при различных температурах испытания (–60, –20, 20, 50, 100, 150 и 175 °С) проводили по ГОСТ Р 56754–2015 с помощью ДСК, измерения осуществляли методом непрерывного сканирования.

По ГОСТ 32618.2–2014 определяли температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Сущность метода по определению ТКЛР состояла в том, что изменение размера испытуемого образца сферопластика ВПЗ-25 определяют как функцию температуры с помощью оборудования (ТМА – термомеханический анализ), получая при этом ТМА-кривую, по которой определяют коэффициент линейного теплового расширения.

Испытания по определению горючести образцов сферопластика ВПЗ-25 проводили по ГОСТ 57924–2017 (метод 2). В данном методе испытаний воздействие источника воспламенения осуществлялось снизу на нижний торец вертикально расположенного образца в течение заданного времени экспозиции 60 с. Далее определяли способность к самостоятельному затуханию образца сферопластика ВПЗ-25 после удаления от него источника воспламенения. Способность к самостоятельному затуханию образца оценивали по длине прогорания, продолжительности остаточного (самостоятельного) горения (тления) образца и падающих капель (частиц).

По ГОСТ 24632–81 определяли дымообразование. Три образца размером 75×75 мм подвергали воздействию теплового потока заданной интенсивности – режим пиролиза, три других образца такого же размера испытывали при условии воздействия теплового потока и пламени пилотной горелки – режим горения. Дымообразование определяли по удельной оптической плотности образовавшегося в результате термического разложения образца дыма в объеме камеры.

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

Результаты и обсуждение

Для получения полимерных композитов с температурами эксплуатации до 100 °С широко применяются препреги на основе латентных отвердителей – дициандиамида или его смеси с производными имидазолов, мочевин и др. Их применение позволяет снизить температуру и сократить длительность отверждения эпоксидного пленочного клея и увеличить его жизнеспособность в процессе хранения при комнатной температуре [13–22].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для производства композитов по препреговой технологии, применяемых для создания изделий авиационной техники, разработана широкая линейка эпоксидных связующих, характеризующихся пониженными температурами доотверждения – до 140 °С.

В целях сокращения времени производства и производственных затрат на изготовление обшивок многослойных (сотовых) конструкций применяют совместное отверждение препрега, сферопластика и пленочного покрытия.

Технологические характеристики сферопластика позволяют использовать его для заполнения сот методом заливки при комнатной температуре в течение не менее 120 мин, что является достаточным для завершения технологических операций при изготовлении трехслойных панелей. Однако при совместном формовании сферопластиков холодного отверждения при повышенных температурах может наблюдаться значительный экзотермический эффект, который может вызвать деструкцию изделия из полимерного композита.

С этой целью исследована возможность совместного отверждения сферопластика марки ВПЗ-25 с препрегами, отверждающимися при температурах до 140 °С.

Для исследования кинетики реакции отверждения использовали метод ДСК – получили кривые (рис. 1) и рассчитали энергию активации E_a (рис. 2).

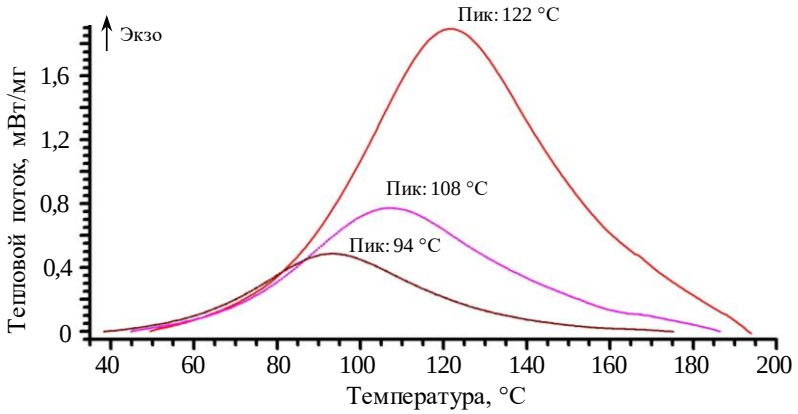


Рис. 1. Кривые, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии, для реакционной смеси с шагом нагрева 5, 10 и 20 К/мин

По результатам исследований (рис. 1) можно отметить, что пик экзотермической реакции приходится на ~100 °С. Поэтому использование для совместного формования с препрегами сферопластика холодного отверждения возможно при соблюдении температурного режима. Сферопластик марки ВПЗ-25 можно отвердить и в ускоренном режиме – ступенчатый нагрев с медленным увеличением температуры (рис. 3, *а*). При резком нагреве выше температуры 100 °С материал при автокаталитической реакции может деструктировать из-за неконтролируемого перегрева (рис. 3, *б*).

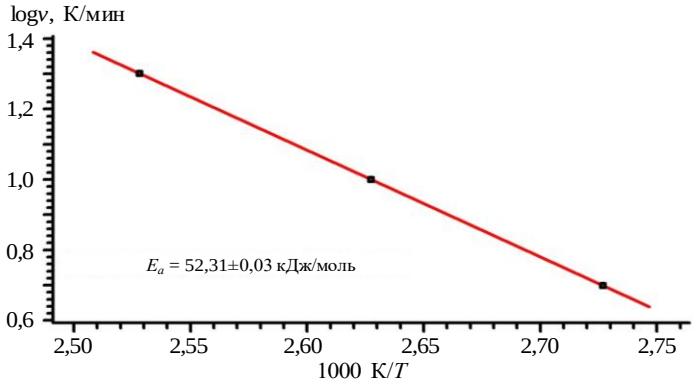


Рис. 2. Энергия активации (E_a) реакции отверждения при скорости нагрева *v*

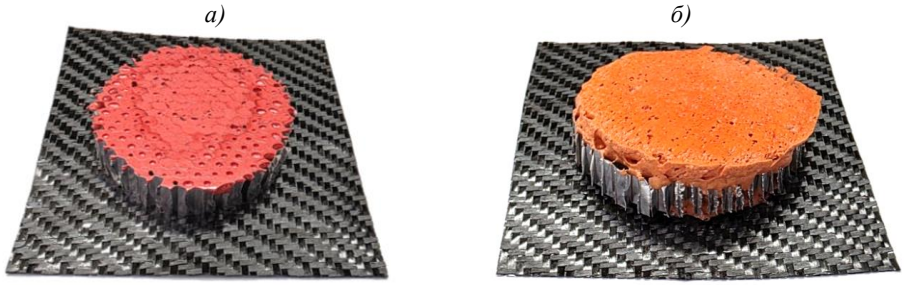


Рис. 3. Сферопластик, отвержденный в ускоренном режиме при медленном нагреве (*а*) и при резком нагреве (*б*)

Испытания образцов сферопластика марки ВПЗ-25 из опытной партии проводили по СТП 1-595-20-100–2002 в климатической камере при тепловлажностном воздействии, имитирующем тропический климат. Режим с параметрами из табл. 2 задавался циклично – при этом 1 сут в климатической камере эквивалентны 1 сут в тропиках. Общая продолжительность экспозиции образцов составляла 30, 60 и 90 сут, при этом по статистике максимум сорбции воды достигался в первые 10 сут.

В результате испытаний на прочность при сжатии после термического старения в течение разных периодов (табл. 3) отмечено сохранение или увеличение физико-механических характеристик и возможность использования данного сферопластика в разных условиях.

Таблица 3

Прочность при сжатии образцов полимерного синтактного заполнителя-сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-25 после термического старения в течение 50, 100, 500 и 1000 ч

Температура испытания, °С	Прочность при сжатии, МПа, после термического старения в течение, ч				
	в исходном состоянии	50	100	500	1000
–60	76,7	81,1	79,4	77,2	82,6
23±2	45,8	52,70	57,3	52,6	59,3
80	19,2	35,8	34,7	32,7	31,1

В результате испытаний на прочность при сжатии после выдержки в камере, имитирующей тропический климат, и тепловлажностного климатического старения в течение разных периодов (табл. 4 и 5) отмечено сохранение физико-механических характеристик, а где-то даже увеличение, что свидетельствует об эффекте пластификации полимерной матрицы за счет поглощенной воды и возможном доотверждении с течением времени. Поэтому возможно использование данного сферопластика в условиях повышенной влажности при разных температурах.

Таблица 4

Прочность при сжатии образцов полимерного синтактного заполнителя-сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-25 после испытания в камере, имитирующей тропический климат, в течение 1, 2 и 3 мес.

Температура испытания, °С	Прочность при сжатии, МПа, после старения в камере тропиков в течение, мес.			
	в исходном состоянии	1	2	3
–60	76,7	82,3	87,6	74,8
23±2	45,8	56,3	56,2	47,8
80	19,2	26,2	30,4	27

Исследование образцов сферопластика ВПЗ-25 при тепловлажностном климатическом старении за 1, 2 и 3 мес. осуществляли по ГОСТ 9.707–81. После необходимой выдержки получены значения прочности при сжатии (табл. 5).

Таблица 5

Прочность при сжатии образцов полимерного синтактного заполнителя-сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-25 после термовлажностного старения в течение 1, 2 и 3 мес.

Температура испытания, °С	Прочность при сжатии, МПа, после старения в течение, мес.			
	в исходном состоянии	1	2	3
–60	76,7	85,8	82,2	80,2
23±2	45,8	59,6	58,0	52,8
80	19,2	33,4	36,0	31,4

Результаты испытаний на определение прочности при растяжении и статическом изгибе в интервале температур от –60 до +120 °С представлены в табл. 6. Испытания проводили по ГОСТ 11262–2017 и ГОСТ 4648–2014 соответственно, устанавливающим методы определения свойств жестких и полужестких пластмасс.

Таблица 6

Прочность при растяжении и статическом изгибе образцов полимерного синтактного заполнителя-сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-25

Температура испытания, °С	Прочность, МПа	
	при растяжении	при изгибе
–60	12,0	30,2
23±2	14,0	25,0
80	5,2	9,3
100	1,9	4,7
120	1,5	2,7

Проведены испытания на теплофизические свойства, результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), удельная теплоемкость и теплопроводность в диапазоне температур от –60 до +200 °С для образцов полимерного синтактного заполнителя-сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-25

Показатель	Стандарт испытания	Температура испытания T_i, °С	Значение показателя
Средний ТКЛР в диапазоне температур от 20 до T_i: $\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	ГОСТ 32618.2–2014	–60	28,1
		–20	30,0
		50	33,3
		100	42,5
		150	54,0
		200	59,3
Удельная теплоемкость c_p, Дж/(кг·К)	ГОСТ Р 56754–2015	–60	797
		–20	914
		20	1072
		50	1253
		100	1713
		150	1889
		175	1983
Теплопроводность λ, Вт/(м·К)	ГОСТ Р 57943–2017	–60	0,11
		–20	0,11
		20	0,13
		50	0,14
		100	0,14
		150	0,17
		175	0,18

Проведены испытания на горючесть сферопластика ВПЗ-25, полученные данные представлены в табл. 8.

Таблица 8

Горючесть образцов полимерного синтактного заполнителя-сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-25

Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения (тления), с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация по ГОСТ Р 57924–2017
60	0	53	Нет	Трудносгораю-щий 60
Допустимые значения по АП-25 п. 25.853 (а)	Не более 15	Не более 152	Не более 3	–

Разработанный сферопластик относится к категории трудносгорающих материалов и соответствует требованиям АП-25 по дымообразованию, что позволяет рекомендовать сферопластик марки ВПЗ-25 к применению в интерьерах авиационной техники.

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

Заключения

В работе приведены исследования кинетических закономерностей реакции отверждения сферопластика ВПЗ-25. По результатам исследований установлено, что пик экзотермической реакции приходится на температуру ~100 °С. Поэтому использование для совместного формования с препрегами сферопластика холодного отверждения

возможно при соблюдении температурного режима. Показано, что ступенчатый режим отверждения при медленном увеличении температуры позволяет избежать протекания неконтролируемой экзотермической реакции.

По результатам климатических испытаний установлено, что сферопластик сохраняет свои физико-механические характеристики, а где-то даже происходит увеличение, что свидетельствует об эффекте пластификации полимерной матрицы за счет поглощенной воды и возможном доотверждении с течением времени. Поэтому возможно использование данного сферопластика в условиях повышенной влажности при разных температурах.

В результате испытаний на прочность при сжатии после термического старения в течение разных периодов также отмечено сохранение или увеличение физико-механических характерик и возможность использования данного сферопластика в разных условиях.

Разработанный сферопластик ВПЗ-25 относится к категории трудносгорающих материалов и соответствует требованиям АП-25 по дымообразованию, что позволяет рекомендовать его к применению в интерьерах авиационной техники.

Преимуществами сферопластика ВПЗ-25 являются: время отверждения при 23 °С – не более 24 ч, прочность при сжатии – не менее 40 МПа, плотность – не более 0,65 г/см^3, классификация по горючести – трудносгорающий, категория дымообразования – среднедымящий.

Полученные результаты соответствуют мировому уровню в области разработки и применения полимерных заполнителей в авиационной технике.

Список источников

1. Syntactic foam market forecast and company analysis report 2025–2030, featuring case studies of AIS, CMT, Europe and Trelleborg. URL: https://www. Valuespectrum.com/corporate_news/1299852-syntactic-foam-market-forecast-and-company-analysis-report-2025-2030-featuring-case-studies-of-ais-cm-Europe-and-relleborg (дата обращения: 15.08.2026)
2. Syntactic foam market report 2025–2030. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Report/syntactic-foam-market-49852579.html?utm_campaign=Linkedin/RamS/CHSF&utm_medium=RamS/CH/SF&utm_source=Linkedin (дата обращения: 15.08.2026).
3. Байков А.В. Упругие параметры синактовых композитов на основе полых стеклянных микросфер: дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 108 с.
4. Global polymer matrix syntactic foam market 2025 by manufacturers, regions, type and applicatoin, forecast 2031. URL: https://www.marketresearch.com/GlobalInfoResearch-v4117/Global-Polymer-Matrix-Syntactic-Foam-42607736/ (дата обращения: 16.08.2026).
5. Застрогина О.Б., Долматовский М.Г., Швец Н.И., Минаков В.Т., Барботько С.Л. Сферопласты холодного отверждения с пониженной горючестью и дымообразованием // Авиационные материалы и технологии. 2005. № 2. С. 55–61.
6. Современные проблемы науки и образования. URL: https://science-education.ru/article/view?id=6547 (дата обращения: 16.08.2026).
7. Anirudh S., Jayalakshmi C.G., Anand A. et al. Ismail.Epoxy/hollow glass microsphere syntactic foams for structural and functional application-A review // European Polymer Journal. 2022. Vol. 171. P. 111163. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111163.
8. Galvagnini F., Fredi G., Dorigato A. et al. Mechanical Behaviour of Multifunctional Epoxy/Hollow Glass Microspheres/Paraffin Microcapsules Syntactic Foams for Thermal Management // Plumers. 2021. No. 13 (17). P. 2896. DOI: 10.3390/polym13172896.
9. Kaur M., Jayakumari L.S. Eco-friendly cardanol-based phenalkamine cured epoxy-cenosphere syntactic foams: Fabrication and characterisation // Journal of Applied Polymer Science. 2016. Vol. 133. P. 44189. DOI: 10.1002/app.44189.
10. Kaur M., Jayakumari L.S. Novel bio-based epoxidized cardanol/cenosphere syntactic foams // High Performance Polymers. 2016. Vol. 29 (7). P. 785–796. DOI: 10.1177/0954008316656923.
11. 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). С. 33–43. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 16.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.

12. Копылов А.В., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Курносов А.О., Славин А.В. Исследование характеристик полимерного заполнителя холодного отверждения ВПЗ-25 для заполнения сотовых панелей элементов авиационной техники // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). С. 37–52. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 16.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52.
13. Способ получения связующего для препрега (варианты), связующее для препрега (варианты), препрег и изделие: пат. 2420547C2 Рос. Федерация; заявл. 26.03.09; опубл. 10.06.11.
14. Эпоксидная композиция для стеклопластиков: пат. 2172328C2 Рос. Федерация; заявл. 06.08.99; опубл. 20.08.01.
15. Epoxy resin composition, prepreg, and fiber-reinforced composite material: pat. EP 2154171A1; appl. 12.05.08; publ. 04.05.16.
16. Quick cure carbon fiber reinforced epoxy resin: pat. US 7005185B2; appl. 27.11.02; publ. 28.02.06.
17. Epoxy resin composition for carbon-fiber-reinforced composite material, prepreg, integrated molding, fiber-reinforced composite sheet, and casing for electrical/electronic equipment: pat. US 2008166511A1; appl. 24.02.05; publ. 02.10.14.
18. Manufacturing method of fiber reinforced composite material molded article: pat. JP 4603978B2; appl. 28.11.03; publ. 23.03.06.
19. Matrix resin composition: pat. GB 2427196A; appl. 24.06.06; publ. 28.10.09.
20. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов: учебное пособие. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. С. 18–21.
21. Любимова А.С., Ткачук А.И., Кузнецова П.А. Полимеры с памятью формы на основе эпоксидных смол // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). С. 50–63. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-50-63.
22. Вахрушева Я.А., Ткачук А.И., Афанасьева Е.А., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Перспективное эпоксидное связующее марки ВСЭ-81 для входного контроля качества углеродного волокна // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 96–107. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-96-107.

References

1. *Syntactic foam market forecast and company analysis report 2025–2030, featuring case studies of AIS, CMT, Europe and Trelleborg*. Available at: https://www. Valuespectrum.com/corporate_news/1299852-syntactic-foam-market-forecast-and-company-analysis-report-2025-2030-featuring-case-studies-of-ais-cm-Europe-and-relleborg (accessed: August 15, 2026).
2. *Syntactic foam market report 2025–2030*. Available at: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Report/syntactic-foam-market-49852579.html?utm_campaign=Linkedin/RamS/CHSF&utm_medium=RamS/CH/SF&utm_source=Linkedin (accessed: August 15, 2026).
3. Baykov A.V. *Elastic parameters of synact composites based on hollow glass microspheres*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2023, 108 p.
4. *Global polymer matrix syntactic foam market 2025 by manufacturers, regions, type and applicatoin, forecast 2031*. Available at: https://www.marketresearch.com/GlobalInfoResearch-v4117/Global-Polymer-Matrix-Syntactic-Foam-42607736/ (accessed: August 16, 2026).
5. Zastrogina O.B., Dolmatovsky M.G., Shvets N.I., Minakov V.T., Barbotko S.L. Cold-curing spheroplasts with reduced flammability and smoke generation. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2005, no. 2, pp. 55–61.
6. *Modern problems of a scienceand educations*. Available at: https://science-education.ru/article/view?id=6547 (accessed: August 16, 2026).
7. Anirudh S., Jayalakshmi C.G., Anand A. et al. Ismail.Epoxy/hollow glass microsphere syntactic foams for structural and functional application-A review. *European Polymer Journal*, 2022, vol. 171, p. 111163. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111163.
8. Galvagnini F., Fredi G., Dorigato A. et al. Mechanical Behaviour of Multifunctional Epoxy/Hollow Glass Microspheres/Paraffin Microcapsules Syntactic Foams for Thermal Management. *Plumers*, 2021, no. 13 (17), p. 2896. DOI: 10.3390/polym13172896.
9. Kaur M., Jayakumari L.S. Eco-friendly cardanol-based phenalkamine cured epoxy-cenosphere syntactic foams: Fabrication and characterisation. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, vol. 133, p. 44189. DOI: 10.1002/app.44189.

10. Kaur M., Jayakumari L.S. Novel bio-based epoxidized cardanol/cenosphere syntactic foams. *High Performance Polymers*, 2016, vol. 29 (7), pp. 785–796. DOI: 10.1177/0954008316656923.
11. Kapustianskaia M.A., Lyubimova A.S., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Tkachuk A.I., Slavin A.V. Development of a cold-curing polymer syntatic filler with enhanced physico-mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), pp. 33–43. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: August 16, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.
12. 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), pp. 37–52. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: August 16, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52.
13. *Method for producing a binder for a prepreg (variants), binder for a prepreg (variants), prepreg, and article*: pat. 2420547C2 Rus. Federation; appl. 26.03.09; publ. 10.06.11.
14. *Epoxy composition for fiberglass-reinforced plastics*: pat. 2172328C2 Rus. Federation; appl. 06.08.99; publ. 20.08.01.
15. *Epoxy resin composition, prepreg, and fiber-reinforced composite material*: pat. EP 2154171A1; appl. 12.05.08; publ. 04.05.16.
16. *Quick cure carbon fiber reinforced epoxy resin*: pat. US 7005185B2; appl. 27.11.02; publ. 28.02.06.
17. *Epoxy resin composition for carbon-fiber-reinforced composite material, prepreg, integrated molding, fiber-reinforced composite sheet, and casing for electrical/electronic equipment*: pat. US 2008166511A1; appl. 24.02.05; publ. 02.10.14.
18. *Manufacturing method of fiber reinforced composite material molded article*: pat. JP 4603978B2; appl. 28.11.03; publ. 23.03.06.
19. *Matrix resin composition*: pat. GB 2427196A; appl. 24.06.06; publ. 28.10.09.
20. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of Polymer Composite Materials*: A Textbook. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, pp. 18–21.
21. Lyubimova A.S., Tkachuk A.I., Kuznetsova P.A. Shape memory epoxy polymers. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), pp. 50–63. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: August 18, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-50-63.
22. Vakhrusheva Ya.A., Tkachuk A.I., Afanaseva E.A., Kurshev E.V., Lonskii S.L. Perspective epoxy resin system VSE-81 for incoming quality inspection of carbon fiber. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 96–107. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: August 18, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-96-107.

Информация об авторах

Шафиев Даниил Наильевич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Ткачук Анатолий Иванович, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Суворова Елизавета Сергеевна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Эльдяева Галина Борисовна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Коваленко Антон Владимирович, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Сидельников Николай Константинович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Daniil N. Shafiev, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoly I. Tkachuk, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Elizaveta S. Suvorova, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Galina B. Eldyaeva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Anton V. Kovalenko, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Nikolay K. Sidelnikov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.09.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.09.2026.
The article was submitted 11.09.2026; approved and accepted for publication after reviewing 15.09.2026.