
Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43

РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНОГО СИНТАКТНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М.А. Капустянская¹, А.С. Любимова¹, А.В. Коваленко¹,
Н.К. Сидельников¹, А.И. Ткачук¹, А.В. Славин¹

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

Аннотация. Приведены результаты исследования по разработке состава полимерного синтактного заполнителя холодного отверждения для местного упрочнения сотовых панелей, заделки торцевых участков и заполнения технологических пустот элементов авиационной техники. Исследовано порядка 100 составов, различающихся по компонентам и их соотношению в системе. Наилучшей по результатам испытаний композиции присвоена марка ВПЗ-25. По ряду свойств разработанный материал находится на уровне или превосходит характеристики иностранных и отечественных аналогов.

Ключевые слова: полимерный заполнитель, сферопластик, ПКМ, сотовый заполнитель, эпоксидное связующее, стеклянные микросферы

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.

Scientific article

DEVELOPMENT OF A COLD-CURING POLYMER SYNTATIC FILLER WITH ENHANCED PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES

М.А. Kapustianskaia¹, А.С. Lyubimova¹, А.В. Kovalenko¹,
Н.К. Sidelnikov¹, А.И. Tkachuk¹, А.В. Slavin¹

¹Federal 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 on the development of a cold-curing polymer syntactic filler composition for local strengthening of honeycomb panels, sealing end sections and filling technological voids of aircraft elements. About 100 compositions were studied, differing in components and their ratio in the system. The best composition based on test results was assigned the VPZ-25 brand. In terms of a number of properties, the developed material is at the same level or exceeds the characteristics of its foreign and domestic analogues.

Keywords: polymer filler, spheroplastic, PCM, honeycomb filler, epoxy binder, glass microspheres

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.

Введение

Преимуществами полимерных композиционных материалов (ПКМ) перед традиционными являются более долгий срок эксплуатации [1], меньшая плотность, из-за чего образуется резерв массы, который может использоваться для увеличения полезной нагрузки [2], стойкость к внешним факторам воздействия, низкие показатели газо- и пылевыведения [3], а также возможность воспроизведения формы. Такие материалы находят применение в различных областях промышленности – от авиакосмической до строительной [4–8]. Возможность менять свойства материала с помощью модифицирования состава позволяет обеспечить требуемый ряд свойств у ПКМ [9]. По виду наполнителя их разделяют на непрерывно армированные (нити, жгуты, ленты, ткани), наполненные (дисперсные частицы) и дискретно армированные (штапельные или рубленные волокна) [10].

Одной из разновидностей наполненных ПКМ являются полимерные наполнители – сферопластики. Они производятся на основе полимерных связующих с наполнителем в виде полых микросфер [11].

С каждым годом увеличивается их потребление в авиакосмической области [12]. Данное явление связано с характеристиками материала – низкой массой готового изделия с сохранением высоких физико-механических свойств. Сферопластики широко применяются для локального упрочнения сотовых панелей, заполнения кромок и технологических пустот элементов авиационной техники. По способу переработки различают полимерные синтактные наполнители холодного и горячего отверждения. Регулирование температуры отверждения достигается путем использования различных типов отвердителей и каталитических добавок. При применении отвердителей холодного отверждения формирование трехмерной сетчатой структуры происходит при комнатной температуре, без дополнительного нагрева. Использование отвердителей горячего отверждения требует дополнительной выдержки при повышенных температурах в течение нескольких часов [13]. Применение последних может затруднить процесс ремонта и укрепления участка конструкций из-за необходимости использования оборудования, позволяющего создавать требуемую температуру и давление. При обработке массивных деталей могут возникнуть трудности из-за масштабного фактора, также при заполнении сотовых конструкций наполнитель не должен выделять летучих продуктов, при этом сохранять высокие адгезионные и механические свойства [14]. В этих случаях предпочтительнее использовать полимерные наполнители холодного отверждения.

Помимо отвердителей, одной из важных задач является выбор дисперсных наполнителей, с помощью которых регулируют физико-механические и технологические свойства материала [15]. Модификация полимерных наполнителей стеклянными полыми микросферами позволяет создавать изотропный материал с повышенными прочностными свойствами на сжатие, низкими показателями водопоглощения и сниженной плотностью. Добавление антипиренов в качестве наполнителя дает возможность достичь требуемого уровня свойств по пожаробезопасности [16].

Для упрочнения конструкций элементов авиационной техники в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан полимерный синтактный наполнитель холодного отверждения марки ВПЗ-25.

Материалы и методы

На основе эпоксидной смолы и аминного отвердителя синтезировано связующее, в составе полимерного наполнителя которого также присутствуют стеклянные микросферы, пигмент и антипирен на основе фосфорсодержащего соединения. Исследованы теплофизические и физико-механические свойства полученного двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-25, его реологические показатели и жизнеспособность.

Изотермическую вязкость и плотность в отвержденном состоянии сферопластика определяли по ГОСТ 25271–93 и ГОСТ 15139–80 соответственно.

По ГОСТ 4651–2014 определяли предел прочности при сжатии на испытательной машине при температуре воздуха 20 ± 5 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 10 %.

Исследование водопоглощения проводили по ГОСТ 4650–2014. Образцы размером $10 \times 10 \times 15$ мм выдерживали в течение 24 ч при температуре 20 ± 5 °С.

По ГОСТ Р 57924–2014 исследовали горючесть. Образцы размером $305 \times 75 \times 10$ мм в вертикальном положении в течение 60 с подвергали воздействию источника воспламенения. По результатам испытаний определяли продолжительность остаточного горения после удаления пламени, наличие и продолжительность горения падающих капель, а также максимальную длину поврежденной части.

По ГОСТ 24632–81 определяли дымообразование. Три образца размером 75×75 мм подвергали воздействию теплового потока заданной интенсивности – режим пиролиза, три других образца с таким же размером испытывали в условиях 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.

По ГОСТ Р 55134–2012 исследовали удельную теплоемкость, по ГОСТ 32618.2–2014 измеряли температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР).

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

Результаты и обсуждение

Полимерные синтактные наполнители (или сферопластики) используют для местного упрочнения панелей сотовых конструкций с целью повышения их прочности и жесткости в зонах установки крепежа, для заделки торцевых участков, заполнения различных полостей, закрепления электротехнических кабелей и т. п. Связующие на основе эпоксидных смол могут быть как холодного, так и горячего отверждения с различными технологическими (вязкость, жизнеспособность) характеристиками, которые позволяют удовлетворить высокие требования, предъявляемые к изделиям авиационной техники [17, 18]. Использование композиций, отверждаемых при комнатной температуре, значительно облегчает получение готовых изделий и имеет ряд преимуществ, а именно: отсутствует необходимость применения сложного оборудования и длительного нагрева при повышенных температурах, уменьшаются затраты на изготовление изделия, при этом наполнитель не утрачивает технологичности и не снижаются значения его механических характеристик.

Эпоксидные смолы – соединения, содержащие в химическом строении эпоксидную группу, которая представляет собой химически нестабильный треугольный цикл, сформированный атомами углерода и кислорода. Эпоксидная группа может располагаться как внутри, так и на концах полимерной цепи.

Для получения композиции, отверждаемой при комнатной температуре, чаще всего используют алифатические амины, например триэтилентетрамин (ТЭТА), полиэтиленполиамин (ПЭПА), полиамидные отвердители, а также полиэфирамины – джеффамины с различной молекулярной массой. Отверждение при комнатной температуре может продолжаться от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от активности отвердителя. Например, реакция отверждения с алифатическими аминами, обладающими высокой активностью, сопровождается существенным экзотермическим

эффектом, что в больших объемах может привести к сильному разогреву реакционной массы. С другой стороны, реакция отверждения с полиэфираминами, которые характеризуются меньшей активностью, занимает до нескольких суток или проводится при более высоких температурах. Существуют также ускорители отверждения, добавление которых в систему приводит к значительному сокращению продолжительности отверждения. Ускорителями процесса могут выступать диметилбензиламин, 2,4,6-трис(диметиламинометил) и салициловая кислота.

Полимерная основа и наполнители выбраны на основе анализа научно-технической литературы в области изготовления синтактного полимерного заполнителя на основе термореактивной полимерной матрицы. За основу взята система «эпоксидная смола–аминный отвердитель», которая обеспечивает необходимую текучесть, небольшую продолжительность отверждения при комнатной температуре и требуемую плотность в отвержденном состоянии. Реакция amino- и эпоксидной групп происходит по следующему механизму (рис. 1).

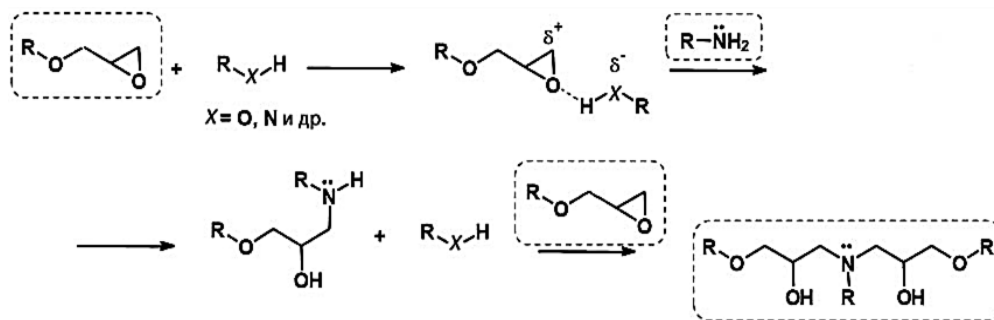


Рис. 1. Механизм отверждения эпоксидной смолы с аминным отвердителем

Химическое строение низковязких эпоксидных смол, обусловленное высоким содержанием эпоксидных групп на единицу массы полимера, обеспечивает относительно высокую реакционную способность в ряду полимерных гомологов эпоксидиановых смол. Способность отверждаться при низких температурах и образовывать отвержденные полимеры с высокой плотностью сшивки позволяет создавать на их основе низковязкие полимерные композиции с улучшенной совместимостью с дисперсными наполнителями, а также отвержденные полимерные материалы с высокими температурой стеклования, химической устойчивостью и теплоемкостью.

Исследовано более 100 полимерных композиций, имеющих различное соотношение компонентов, а также отличающихся по составу. Варьирование содержания стеклянных сфер позволяло контролировать плотность и механические характеристики полимерного заполнителя-сферопластика, а различное соотношение смол и отвердителей – жизнеспособность и тепловой эффект. Составы, отверждаемые с каталитическими отвердителями и ускорителями, имели большой экзотермический эффект, что вызывало сильный саморазогрев. В больших объемах для получения крупногабаритных изделий это может привести к неконтролируемому выделению тепла. Для уменьшения теплового эффекта реакции в состав композиции вводили менее активные отвердители, комбинация их с ускорителями позволяла получать составы, способные отверждаться при комнатной температуре в течение суток без саморазогрева даже в больших объемах. Из данных композиций выбраны десять оптимальных составов. Помимо различий в полимерной основе, композиции также отличались по содержанию микросфер (табл. 1).

Таблица 1

Содержание микросфер в десяти композициях

| Условный номер композиции | Содержание микросфер, % (по массе) | |
|---------------------------|------------------------------------|------------|
| | стеклянных | полимерных |
| 1, 3, 7, 9 | 22 | – |
| 2, 6, 10 | 20 | 0,4 |
| 4 | 19 | 0,5 |
| 5 | 18 | 0,7 |
| 8 | 18 | 0,55 |

Образцы исключались из экспериментов по таким показателям, как низкие технологичность и жизнеспособность, а также длительное время отверждения. По десяти выбранным композициям проведены исследования на определение плотности в отвержденном состоянии и прочности при сжатии при температуре 23 ± 2 °С (табл. 2).

Таблица 2

Плотность и прочность при сжатии при 23 ± 2 °С десяти выбранных композиций*

| Условный номер композиции | Плотность, г/см ³ | Прочность при сжатии, МПа |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | <u>0,60–0,62</u> 0,61 | <u>42–44</u> 42,7 |
| 2 | <u>0,59–0,62</u> 0,61 | <u>33–44</u> 39,4 |
| 3 | <u>0,66–0,67</u> 0,66 | <u>53–57</u> 54,4 |
| 4 | <u>0,61–0,63</u> 0,62 | – |
| 5 | <u>0,58–0,59</u> 0,59 | <u>35–37</u> 35,8 |
| 6 | <u>0,61–0,63</u> 0,62 | <u>42–45</u> 43,5 |
| 7 | <u>0,60–0,61</u> 0,60 | <u>42–43</u> 42,4 |
| 8 | <u>0,61–0,63</u> 0,62 | <u>38–41</u> 40,2 |
| 9 | <u>0,66–0,68</u> 0,67 | <u>57–61</u> 59,8 |
| 10 | <u>0,62–0,63</u> 0,63 | <u>45–46</u> 45,3 |

* В числителе – пределы полученных значений, в знаменателе – среднее значение.

Все полученные и исследованные композиции имели низкую плотность $\leq 0,7$ г/см³, а также высокие показатели прочности при сжатии ≥ 30 МПа при температуре 23 ± 2 °С. В сравнении с другими составами композиция 5 имела наименьшее значение плотности, однако существенно отставала по результатам механических испытаний, что объясняется использованием большого количества полимерных сфер (0,7 % (по массе)). Составы 6 и 8 – высоковязкие, поэтому уступают по технологичности. У композиции 9 наблюдался высокий показатель прочности при сжатии, но при этом значение плотности превышало значения для всех остальных композиций. Композиция 4 имела низкую плотность, однако система не отвердилась окончательно за 24 ч. Из десяти исследованных составов выбрали три системы, которые имели наилучшее

соотношение плотности и прочности при сжатии при температуре 23 ± 2 °С, а также удовлетворяли требованиям по вязкости и технологичности. Композиции 1, 7 и 10 (далее в тексте 1, 2 и 3) обладали всеми необходимыми характеристиками.

С использованием трех выбранных систем проведены исследования реологических характеристик полимерной матрицы. Данные представлены в табл. 3 и на рис. 2. При введении микросфер для получения заполнителя наблюдалось значительное увеличение вязкости системы, которое не позволяло корректно провести измерения реологических характеристик, поэтому исследована вязкость смоляной части. Основа композиции 1 обладала самой низкой вязкостью, однако при сравнении ее показателей в наполненной системе она находится на уровне системы 2. Состав 2 имел изначально достаточно низкую вязкость, при этом хорошую реакцию способностью, позволяющую получить высокую степень конверсии после отверждения в течение 24 ч. Система 3 наиболее высоковязкая при отсутствии наполнителей, при этом ее показатели в виде сферопластика снижаются относительно двух остальных систем. Низкая вязкость всех подобранных полимерных композиций позволила получить высоконаполненную систему, что положительно отразилось на плотности сферопластика и механических характеристиках.

Таблица 3

Реологические характеристики экспериментальных образцов сферопластика и экспериментальных образцов ненаполненных эпоксидных композиций

| Маркировка образца | Кажущаяся вязкость по Брукфильду, Па·с (фактическое значение), при температуре $25\pm 0,1$ °С | |
|------------------------|---|--------------------|
| | в исходном состоянии | после 1 ч выдержки |
| Сферопластик: | | |
| 1 | >1000 | >1000 |
| 2 | >1000 | >1000 |
| 3 | 420; 422; 421 | 651; 650; 653 |
| Эпоксидная композиция: | | |
| 1 | 0,51; 0,52; 0,51 | 1,8; 1,81; 1,81 |
| 2 | 0,62; 0,62; 0,63 | 2,38; 2,35; 2,30 |
| 3 | 0,88; 0,88; 0,89 | 2,68; 2,7; 2,71 |

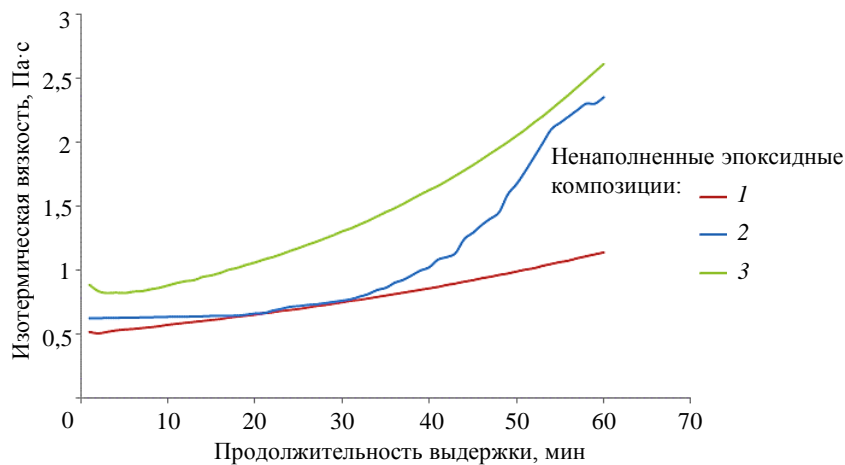


Рис. 2. Графики изотермической выдержки ненаполненных полимерных композиций при температуре 25 °С

На трех выбранных композициях проведен комплекс исследований, который включал определение: изотермической вязкости, плотности, продолжительности отверждения, предела прочности при сжатии при различных температурах, водопоглощения за 24 ч, горючести, дымообразования, удельной теплоемкости и ТКЛР (табл. 4).

Таблица 4

Результаты исследования трех композиций полимерного наполнителя

| Свойства | | Стандарт испытания (ГОСТ, ГОСТ Р) | Значения свойств* для композиции | | |
|---|-----|---|---|--------------------------|--------------------------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Изотермическая вязкость при температуре 25 °С, Па·с | | ГОСТ 25271–93 | 0,51 | 0,62 | 0,88 |
| Плотность, г/см ³ | | ГОСТ 15139–80 | <u>0,60–0,62</u> 0,61 | <u>0,60–0,61</u> 0,61 | <u>0,65–0,66</u> 0,65 |
| Прочность при сжатии, МПа, при температуре, °С | –60 | ГОСТ 4651–2014 | <u>75–79</u> 77 | <u>70–85</u> 79 | <u>63–65</u> 64 |
| | 20 | | <u>42–45</u> 44 | <u>56–61</u> 58 | <u>56–62</u> 59 |
| | 80 | | <u>4,4–6,6</u> 6 | <u>4,7–7,6</u> 7 | <u>3,1–7,5</u> 5 |
| Водопоглощение за 24 ч, % | | ГОСТ 4650–2014 (метод 1) | 1,34 | 0,75 | 1,02 |
| Горючесть | | ГОСТ Р 57924–2017 | Само- затухающий | Трудно- сгорающий | Трудно- сгорающий |
| Дымообразование | | ГОСТ 24632–81 | Соответствует требованиям АП-25 по дымообразованию | | |
| ТКЛР: $\bar{\alpha}_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$, при температуре, °С | –60 | ГОСТ Р 55134–2012 | 30 | 30 | 31 |
| | 0 | | 32 | 32 | 33 |
| | 50 | | 52 | 54 | 45 |
| | 70 | | 60 | 60 | 52 |
| Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), при температуре, °С | –60 | ГОСТ Р 56753–2015 | <u>1142–1244</u> 1188 | <u>1010–1079</u> 1047 | <u>1041–1084</u> 1063 |
| | –40 | | <u>1215–1324</u> 1264 | <u>1135–1212</u> 1176 | <u>1149–1196</u> 1173 |
| | –20 | | <u>1294–1410</u> 1346 | <u>1260–1346</u> 1306 | <u>1261–1312</u> 1287 |
| | 20 | | <u>1465–1596</u> 1524 | <u>1509–1612</u> 1564 | <u>1496–1557</u> 1527 |
| | 40 | | <u>1557–1696</u> 1619 | <u>1634–1746</u> 1694 | <u>1620–1686</u> 1653 |

* В числителе – пределы полученных значений, в знаменателе – среднее значение.

Прочность при сжатии у композиции 3 ниже, чем у составов сравнения, у нее более высокий показатель по водопоглощению за 24 ч относительно показателя для системы 2, а также наибольший показатель вязкости. Состав 1 уступал составу 2 по прочности при сжатии при различных температурах и водопоглощению за 24 ч. В результате исследований по совокупности свойств выбрана композиция 2, имеющая лучшие свойства по сравнению с двумя оставшимися составами.

В табл. 5 представлено сравнение свойств выбранной по результатам испытаний композиции, которой присвоена марка ВПЗ-25 (рис. 3), с иностранным и отечественным полимерными наполнителями – Eprocast 1618-D/B и пастой ИТМ25 производства ООО «Итекма».



Рис. 3. Образцы полимерного наполнителя-сферопластика марки ВПЗ-25

Таблица 5

**Свойства полимерного наполнителя-сферопластика марки ВПЗ-25
в сравнении с аналогами**

| Свойства | | Значения свойств* | | |
|--|------|---|----------------------------|--------------------------------|
| | | ВПЗ-25 | Ерораст 1618-D/B, США [19] | Паста ИТМ25, ООО «Итекма» [20] |
| Плотность, г/см ³ | | $\frac{0,60-0,61}{0,61}$ | 0,70 | 0,60 |
| Прочность при сжатии, МПа, при температуре, °С | -60 | $\frac{70-85}{79}$ | – | – |
| | 23±2 | $\frac{56-61}{58}$ | 42 | 33 |
| | 80 | $\frac{5-8}{7}$ | 3 | – |
| Водопоглощение за 24 ч, % | | 0,75 | 1,5 | – |
| Продолжительность отверждения при температуре 23±2 °С, ч | | 24 | 24 | 24 |
| Горючесть | | Трудногорающий | Самозатухающий | – |
| Дымообразование | | Соответствует требованиям НЛГ-25 по дымообразованию | – | – |
| * В числителе – пределы полученных значений, в знаменателе – среднее значение. | | | | |

Плотность полученного полимерного наполнителя находится на уровне его отечественного аналога, в то время как прочность при сжатии при температуре 23±2 °С превосходит аналогичную характеристику у представленных для сравнения композиций. Прочность при сжатии при 80 °С, показатели по горючести и водопоглощению за 24 ч превосходят характеристики материала-аналога Ерораст 1618-D/B. Все три композиции имеют продолжительность отверждения 24 ч.

Заключения

Подобран состав полимерной матрицы на основе эпоксидной смолы и аминного отвердителя и разработан полимерный синтактный наполнитель-сферопластик марки

ВПЗ-25 холодного отверждения. Данный сферопластик может применяться для местного упрочнения сотовых панелей, заделки торцевых участков и заполнения технологических пустот элементов авиационной техники. По своим характеристикам, таким как плотность, прочность при сжатии при различных температурах, а также по продолжительности отверждения он находится на уровне или превосходит импортные и отечественные аналоги.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2023-57 от 31.08.2023 г.).

Список источников

1. Кетов Ю.А., Словиков С.В. Синтактические полимерные композиционные материалы, высоконаполненные гранулированным пеностеклом // Методы контроля и диагностика в машиностроении. 2019. Т. 6. № 3. С. 39–45.
2. Панин С.В. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (2). С. 686–693.
3. Аристов В.Ф., Вихров И.А. Радиопрозрачные цианатэфирные синтактики (сферопластики) на основе полых стеклянных или полимерных микросфер для приемопередающих устройств космических аппаратов // Материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. М.: Красноярск, 2017. С. 66–67.
4. 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: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
5. Тростянская Е.Б., Головкин Г.С., Дмитренко В.П. Перспективные ПКМ и прогрессивные технологии производства из них элементов конструкции ЛА // Авиационная промышленность. 1987. № 2. С. 37–42.
6. Швецов Е.П., Соколов И.И., Гребенева Т.А. Полимерный наномодифицированный композиционный материал для строительной индустрии // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 5 (23). Ст. 08. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 01.03.2024).
7. 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 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
9. 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.
10. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
11. Яковенко Т.В., Яруллина Г.К., Гарустович И.В. и др. Сферопластики как термоизолирующие защитные материалы промышленного назначения // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 3. № 8. С. 71–73.
12. Мишуров К.С., Паярель С.М., Курносков А.О., Боков В.В. Физико-механические свойства сферопластика марки ВПЗ-24 с температурой эксплуатации до 320 °С // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-52-60.

13. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. СПб.: Профессия, 2020. 576 с.
14. Соколов И.И. Сферопластики холодного отверждения на основе клеевых связующих для изделий авиационной техники // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. № 3. С. 25–28.
15. Капустянская М.А., Гуревич Я.М., Мишуров К.С. Полимерный наполнитель для технологии ускоренного формования // Пластические массы. 2023. № 11–12. С. 50–53.
16. Ткачук А.И., Терехов И.В., Афанасьева Е.А. Реакционноспособные антипирены для эпоксидных смол. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-41-48.
17. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие для нового поколения материалов интерьера // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 265–272.
18. 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). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.
19. Erocast 1618-D/B // Freeman Manufacturing & Supply: офиц. сайт. URL: <https://freemansupply.com/products/liquid-tooling-materials/epoxy-aerospace-syntactics/epocast-1618-epoxy-syntactic> (дата обращения: 14.05.2024).
20. ИТМ25 // ИТЕКМА: офиц. сайт. URL: <https://itecma.ru/products/interernye-materialy/mats-pasty/15786/> (дата обращения: 14.05.2024).

References

1. Ketov Yu.A., Slovikov S.V. Syntactic polymer composite materials highly filled with granulated foam glass. *Metody kontrolya i diagnostika v mashinostroyenii*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 39–45.
2. Panin S.V. Application of modern polymer composite materials in the airframe design of the MS-21 family of aircraft. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (2), pp. 686–693.
3. Aristov V.F., Vikhrov I.A. Radiotransparent cyanate ether syntactics (spheroplastics) based on hollow glass or polymer microspheres for spacecraft transceivers. *Proc. XXI Int. scientific-practical. Conf., dedicated to the memory of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev*. Moscow: Krasnoyarsk, 2017, pp. 66–67.
4. 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: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
5. Trostyanskaya E.B., Golovkin G.S., Dmitrenko V.P. Promising polymer composite materials and progressive technologies for their production of aircraft structural elements. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1987, no. 2, pp. 37–42.
6. Shvetsov E.P., Sokolov I.I., Grebeneva T.A. Polymer nanomodified composite material for the construction industry. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 5 (23), paper no. 08. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: March 01, 2024).
7. 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), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Pavlyuk B.Ph. The main directions in the field of development of polymeric functional materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-388-392.
9. Kablov E.N. The Role of Chemistry in Creating 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.
10. Kablov E.N. Composites: Today and Tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.

11. Yakovenko T.V., Yarullina G.K., Garustovich I.V. et al. Spheroplasts as Thermal Insulating Protective Materials for Industrial Use. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2016, vol. 3, no. 8, pp. 71–73.
12. Mishurov K.S., Payarel S.M., Kurnosov A.O., Bokov V.V. Physical and mechanical properties of syntactic foam VPZ-24 with a maximum service temperature up to 320 °C. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-52-60.
13. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Yu. *Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them*. St. Petersburg: Profession, 2020, 576 p.
14. Sokolov I.I. Cold-curing spheroplasts based on adhesive binders for aviation products. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 25–28.
15. Kapustyanskaya M.A., Gurevich Ya.M., Mishurov K.S. Polymer filler for accelerated molding technology. *Plasticheskiye massy*, 2023, no. 11–12, pp. 50–53.
16. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Afanasyeva E.A. Reactive type flame retardants for epoxy resins. Part 1. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-41-48.
17. Zastrogina O.B., Shvets N.I., Postnov V.I., Serkova E.A. Phenolformaldehyde binding new generation for interior materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 265–272.
18. Sarychev I.A., Serkova E.A., Khmel'nitskiy V.V., Zastrogin O.B. Thermosetting binders for aircraft floor panel materials (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.
19. *Epocast 1618-D/B*. Available at: <https://freemansupply.com/products/liquid-tooling-materials/epoxy-aerospace-syntactics/epocast-1618-epoxy-syntactic> (accessed: May 14, 2024).
20. *ITM25*. Available at: <https://itecma.ru/products/interernye-materialy/mats-pasty/15786/> (accessed: May 14, 2024).

Информация об авторах

Капустянская Мария Александровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Любимова Анастасия Сергеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коваленко Антон Владимирович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сидельников Николай Константинович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткачук Анатолий Иванович, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Славин Андрей Вячеславович, начальник научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maria A. Kapustianskaia, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anastasia S. Lyubimova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton V. Kovalenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay K. Sidelnikov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoly I. Tkachuk, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.08.2024.
The article was submitted 30.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 28.08.2024.