

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-52-60

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СФЕРОПЛАСТИКА МАРКИ ВПЗ-24 С ТЕМПЕРАТУРОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДО 320 °С

К.С. Мишуров<sup>1</sup>, С.М. Паярель<sup>1</sup>, А.О. Курносов<sup>1</sup>, В.В. Боков<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.** Проведены исследования основных физико-механических свойств полимерного наполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24 на цианэфирной полимерной основе с добавлением в качестве наполнителя полых стеклянных микросфер. Данный сферопластик предназначен для заполнения участков многослойных сотовых теплонагруженных конструкций. Представлены результаты исследования микроструктуры сферопластика. Показано влияние воздействия повышенной температуры на значения его предела прочности при сжатии. Установлено, что сферопластик марки ВПЗ-24 работоспособен при температуре 320 °С.

**Ключевые слова:** сферопластик, композиционный материал, полимер, микросферы, микроструктура, сотовые конструкции

**Для цитирования:** Мишуров К.С., Паярель С.М., Курносов 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-52-60.

Scientific article

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SYNTACTIC FOAM VPZ-24 WITH A MAXIMUM SERVICE TEMPERATURE UP TO 320 °C

K.S. Mishurov<sup>1</sup>, S.M. Payarel<sup>1</sup>, A.O. Kurnosov<sup>1</sup>, V.V. Bokov<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.** In this work, we investigated the main physical and mechanical properties of VPZ-24 syntactic foam based on a cyanate ester polymer base with the addition of hollow glass microspheres as a filler. Syntactic foam VPZ-24 is intended for filling sections of multilayer honeycomb heat-loaded structures. The results of the study of the microstructure of syntactic foam are shown. The influence of the effect of elevated temperature on the values of the ultimate strength in compression of a syntactic foam is shown. It was found that the maximum service temperature of syntactic foam VPZ-24 is 320 °C.

**Keywords:** syntactic foam, composite material, polymer, microsphere, microstructure, honeycomb structures

**For citation:** 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-52-60.

### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяют в авиастроении. В первую очередь это обусловлено их низкой плотностью, сохранением высоких механических и специальных характеристик в различных условиях эксплуатации, вариабельностью состава и строения, что позволяет расширить диапазон технических свойств данных материалов. Большой вклад в области ПКМ внесли работы НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [1].

Непрерывное развитие авиационной промышленности создает потребность в применении новых материалов с усовершенствованными свойствами для высокотехнологичных изделий. Необходимым становится не только доведение до предельно возможных значений эксплуатационных характеристик материалов, но и обеспечение высокого уровня их сохранения в наиболее широком температурном интервале, что особенно затруднительно в тех случаях, когда конструкция предназначена для работы в условиях повышенных температур [2, 3].

Современные тенденции в области создания новых двигательных установок подразумевают расширение использования ПКМ. В частности, для применения в конструкции теплонагруженных элементов мотогондолы и холодного контура двигателя необходимы ПКМ, устойчивые к воздействию высоких температур и обеспечивающие снижение массы конструкции [4].

Сферопластики – это ПКМ на полимерной основе, армированной дисперсными наполнителями. Полимерная основа обеспечивает требуемый уровень температуры эксплуатации, а также определяет технологические, теплофизические и упруго-прочностные характеристики, био- и химическую стойкость и другие свойства сферопластика [5–7]. Основным его наполнителем являются микросферы, представляющие собой сыпучие мелкодисперсные порошки, состоящие из полых тонкостенных частиц сферической формы. Наиболее важным функциональным свойством микросфер как наполнителя композиционных материалов является их низкая плотность, которая позволяет уменьшить общую плотность композиционного материала [8]. Сферопластики применяют для местного упрочнения сотовых панелей, а также для заделки торцов и технологических пустот в конструкциях узлов авиационной техники. Они обеспечивают процесс соединения частей сотовых конструкций, участвуют в принятии и передаче действующих нагрузок, сохраняя необходимый уровень прочности и долговечности соединения [9].

В настоящее время разработан широкий ассортимент сферопластиков с различными температурами эксплуатации. Так, сферопластики марок ВПЗ-7М, ВПЗ-10, ВПЗ-16М и ВПЗ-21 имеют рабочие температуры до 80 °С, марок ВПЗ-5 и ВПЗ-14 – до 160 °С, а марки ВПЗ-17 – до 170 °С [10–12]. Анализ тенденций развития областей применения композиционных материалов показал, что существует необходимость создания материала с температурой эксплуатации до 320 °С, обладающего комплексом заданных технологических, физико-механических свойств и обеспечивающего высокую энергоэффективность и низкую трудоемкость процесса изготовления, а также совместимость по режимам переработки с другими ПКМ [13, 14].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан сферопластик марки ВПЗ-24 с температурой эксплуатации до 320 °С для заполнения участков многослойных сотовых теплонагруженных конструкций [15].

### Материалы и методы

Объектом исследования является полимерный наполнитель-сферопластик марки ВПЗ-24 с температурой эксплуатации до 320 °С. В качестве исходных компонентов его

полимерной основы используют цианэфирные смолы, полимеры которых обладают высокими значениями температуры стеклования, а в качестве дисперсного наполнителя – полые стеклянные микросферы марки МС-ВП-А9.

Физико-механические свойства сферопластика марки ВПЗ-24 (здесь и далее: в числителе представлены минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее):

Свойства	Значения свойств
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	<u>660–690</u> 670
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, МПа	<u>75–87</u> 82
Предел прочности при сжатии при температуре 320°С, МПа	<u>54–58</u> 56

В работе для определения характеристик сферопластика марки ВПЗ-24 использовали следующие методы исследований:

– плотность – по ГОСТ 15139–69 «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)» (п. 2);

– предел прочности при сжатии – по ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» на испытательной машине Zwick/Roell Z050. Температура воздуха в помещении составляла 20±5 °С, относительная влажность: 50±10 %;

– температура стеклования – по ГОСТ Р 57739–2017 «Определение температуры стеклования методом динамического механического анализа»;

– температура начала термоокислительной деструкции – по ГОСТ Р 56721–2015 «Термогравиметрия полимеров»;

– микроструктура – методами световой и электронной сканирующей микроскопии по ММ 1.595-12-243–2007 «Методика анализа микроструктуры полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением сканирующей электронной микроскопии». Для микроструктурных исследований из отвержденного сферопластика марки ВПЗ-24 изготовлен низкотемпературный скол в жидком азоте, который с помощью токопроводящего клея на основе углерода приклеен к держателю образца для сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) и высушен. После полного высыхания клея при комнатной температуре поверхность скола подверглась ионно-плазменному травлению в вакуумной установке. Для снятия электрических зарядов при исследовании образца диэлектрика в СЭМ, его поверхность металлизировалась в установке магнетронного распыления. Подготовленный скол исследовали в СЭМ в режиме вторичных (SE) электронов при увеличениях от ×200 до ×40000. Фотографирование проведено в помещении при температуре 24 °С и влажности 41 %;

– предел прочности при изгибе – по ГОСТ 4648–2014 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб» на испытательной машине Zwick/Roell Z050. Температура воздуха в помещении составляла 20±5 °С, относительная влажность: 50±10 %.

### **Результаты и обсуждение**

Полимерный наполнитель-сферопластик марки ВПЗ-24 – термореактивный композиционный материал, эксплуатируемый в стеклообразном состоянии. За верхний температурный предел работоспособности данного материала принята температура стеклования, которая является температурой перехода аморфного полимера из стеклообразного состояния в высокоэластическое в процессе его нагревания. Вид полимера, его строение, наличие или отсутствие наполнителей влияют на температуру стеклования,

поэтому показатели данного параметра имеют важное практическое значение и являются залогом эффективного использования сферопластика [16].

Термоокислительной деструкцией называют разрушение макромолекул отвержденного полимера при одновременном воздействии тепла и кислорода. Такому воздействию материал подвергается при эксплуатации при повышенных температурах. В результате интенсивной термоокислительной деструкции происходит резкое снижение механических свойств сферопластика [16].

Результаты определения температуры стеклования и температуры начала термоокислительной деструкции полимерного наполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24 (средние значения):

Свойства	Значения свойств
Температура стеклования, °С	380
Температура начала интенсивной термоокислительной деструкции, °С	420

Установлено, что полученные результаты температуры стеклования и температуры начала термоокислительной деструкции превышают максимальную рабочую температуру на 50 и 100 °С соответственно. Это свидетельствует о работоспособности сферопластика марки ВПЗ-24 при температурах до 320 °С.

Методами световой и электронной сканирующей микроскопии исследована микроструктура данного сферопластика. Результаты микроструктурного анализа приведены на рис. 1 и 2.

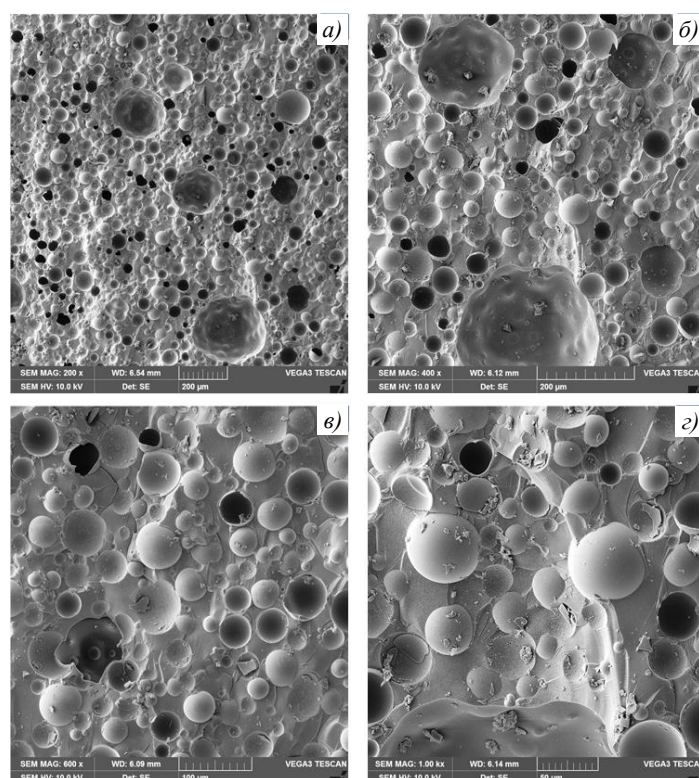


Рис. 1. Микроструктура поверхности скола полимерного наполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24 с микросферами и порами (общий вид; *а* –  $\times 200$ , *б* –  $\times 400$ ) и микросферы в матрице (*в* –  $\times 600$ , *з* –  $\times 1000$ )

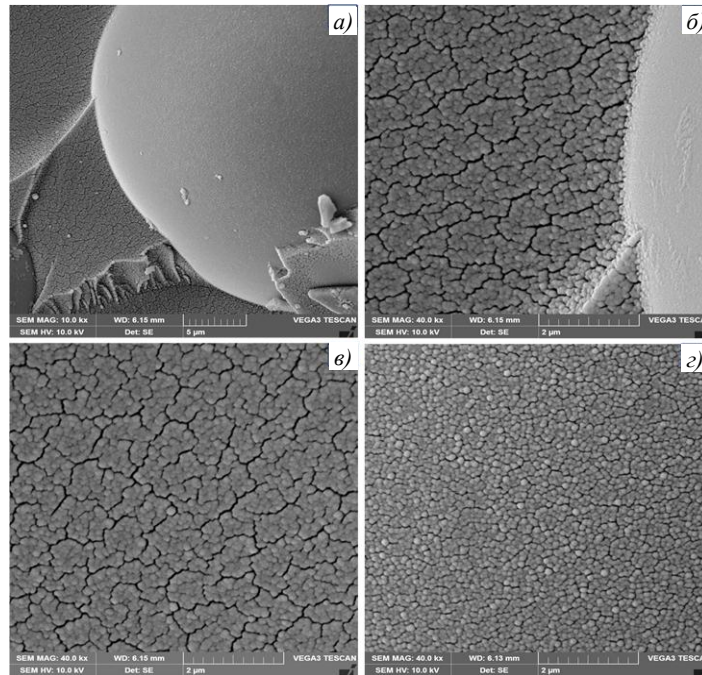


Рис. 2. Микроструктура поверхности скола полимерного заполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24 на границе матрицы и микросферы (*а* –  $\times 10000$ , *б* –  $\times 40000$ ), а также микрофазовые структуры (*в*, *г* –  $\times 40000$ ) матрицы (*в*) и микросферы (*г*)

Микроструктурные исследования поверхности скола сферопластика марки ВПЗ-24 показали (рис. 1), что в объеме образца распределены микросферы, которые имеют округлую форму. Диаметры микросфер находятся в диапазоне от 15 до 75 мкм. Микрофазовая структура матрицы – однородная, состоит из агрегатов дисперсных частиц (рис. 2, *б* и *в*), что подтверждает гипотезу о микрокомпозитном строении полимерной матрицы, согласно которой матрица представляет собой однородную дисперсионную среду, где распределены частицы микродисперсной фазы. Микрофазовая структура представляет собой пластически деформируемую изотропную среду (микроматрицу), наполненную жесткими частицами мелкодисперсной фазы того же полимера, что указывает на резкие различия в степени сшивки в составе микрофаз [17].

Результаты исследований микроструктуры сферопластика марки ВПЗ-24 методом СЭМ свидетельствуют о равномерном распределении полых стеклянных микросфер в объеме полимерной матрицы.

Получены значения механических свойств образцов из полимерного заполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24:

Свойства	Значения свойств
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С:	
20	<u>75–87</u> 82
200	<u>61–68</u> 65
250	<u>59–66</u> 63
320	<u>54–58</u> 56
Предел прочности при изгибе при температуре 20 °С, МПа	<u>17–25</u> 21

Установлено, что полученные значения предела прочности при сжатии (средние значения) в диапазоне температур от 20 и до 320 °С сферопластика марки ВПЗ-24 составляют от 82 до 56 МПа. При этом сохранение прочности при сжатии данного сферопластика при воздействии различных температур относительно значения при 20 °С (минимальное значение показателя) составило: 79 % – при 200 °С, 76 % – при 250 °С, 68 % – при 320 °С.

Для визуализации полученных результатов построена кривая зависимости предела прочности при сжатии от температуры (рис. 3).

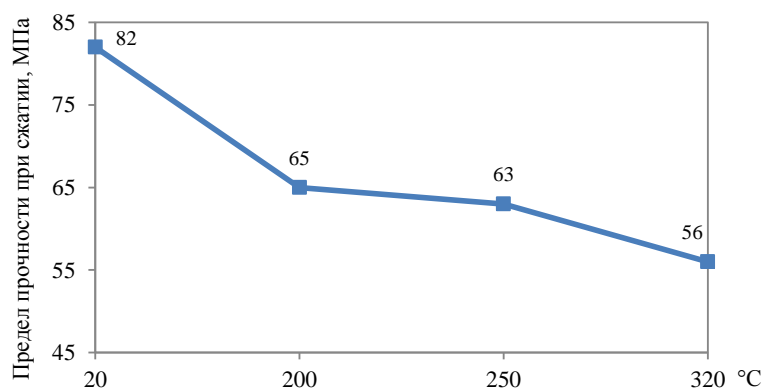


Рис. 3. Кривая зависимости предела прочности при сжатии от температуры

Результаты испытаний физико-механических свойств образцов опытной партии из полимерного заполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24 после воздействия температуры 320 °С в течение 100 ч:

Свойства	Значения свойств	
	исходное	после испытания
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С		
20	<u>75–87</u> 82	<u>45–61</u> 55
320	<u>54–58</u> 56	<u>28–33</u> 31

Показано, что сохранение прочности при сжатии сферопластика марки ВПЗ-24 (среднее значение) после воздействия температуры 320 °С в течение 100 ч составило: 68 % – при 20 °С относительно исходного значения при 20 °С и 55 % – при 320 °С относительно исходного значения при 320 °С.

Полученные значения сохранения прочности данного сферопластика позволяют сделать вывод о возможности его эксплуатации при температуре 320 °С в течение не менее 100 ч.

Изготовлены образцы сотовых панелей, заполненные сферопластиком, с применением комплекса высокотемпературных материалов. К заполненной сферопластиком сотовой панели методом прямого прессования с использованием клея марки ВК-103 (представляет собой смесь имидообразующих компонентов, армированную нетканой стекловалью) приклеены высокотемпературные материалы: углепластик марки ВКУ-61 – ПКМ на основе равнопрочной ткани марки ВТкУ-2.200 и полиимидного связующего марки ВС-51; стеклопластик марки ВПС-72 – ПКМ на основе полиимидного связующего марки ВС-51 и стеклоткани Т-10-14. Внешний вид образца представлен на рис. 4.

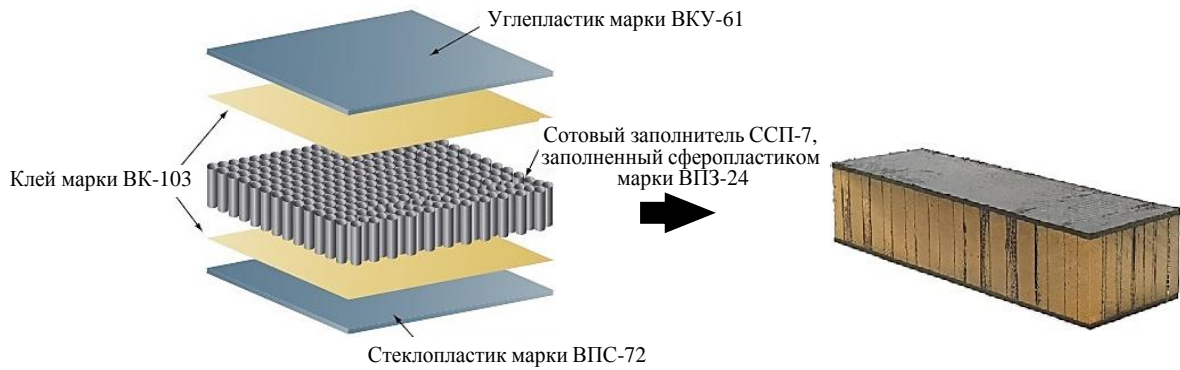


Рис. 4. Образец сотовой панели на основе комплекса высокотемпературных материалов

### Заключения

Проведены исследования полимерного наполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24 на цианэфирной полимерной основе с добавлением в качестве наполнителя полых стеклянных микросфер. Данный сферопластик предназначен для заполнения участков многослойных сотовых теплонагруженных конструкций.

Установлено, что среднее значение температуры стеклования составило 380 °С, а температуры начала термоокислительной деструкции – 420 °С, что превышает максимальную рабочую температуру на 50 и 100 °С соответственно. Это свидетельствует о работоспособности сферопластика марки ВПЗ-24 при температурах до 320 °С.

Данный сферопластик для местного упрочнения сотовых панелей, заделки торцов и технологических пустот обладает следующим комплексом свойств: плотность 670 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии (среднее значение) при температуре испытания 20 °С составляет 74–85 МПа, а при температуре 320 °С: 48–58 МПа.

Установлено, что сохранение прочности при сжатии сферопластика марки ВПЗ-24 относительно значения при 20 °С составило: 79 % – при 200 °С, 76 % – при 250 °С, 68 % – при 320 °С. Кроме того, сохранение прочности при сжатии данного сферопластика (среднее значение) после воздействия температуры 320 °С в течение 100 ч составило: 68 % – при 20 °С относительно исходного значения при 20 °С и 55 % – при 320 °С относительно исходного значения при 320 °С. Полученные значения сохранения прочности полимерного наполнителя-сферопластика марки ВПЗ-24 позволяют сделать вывод о возможности его эксплуатации при температуре 320 °С.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ Е.В. Куршеву и С.Л. Лонскому за подготовку образцов и проведение микроструктурных исследований.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.

4. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России. 2013. № 2. С. 4–9.
5. 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: 01.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.
6. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. Мишкин С.И., Малаховский С.С. Быстроотверждаемые связующие и препреги: получение, свойства и области применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40.
8. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С., Куваев М.Д., Куликов С.А., Максимова Н.В., Пикулин И.В., Потемкин Г.А., Редюшев С.А., Самсонов Г.Ю., Скорочкин Ю.В. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
9. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
10. Соколов И.И. Сферопластики на основе термореактивных связующих для изделий авиационной техники: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 18 с.
11. Соколов И.И., Минаков В.Т. Сферопластики авиационного назначения на основе эпоксидных клеев и дисперсных наполнителей // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 5. С. 22–26.
12. Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Соколов И.И., Тундайкин К.О. Сферопластик с регулируемой вязкостью для заполнения участков сотовых конструкций // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
13. Соколов И.И., Коган Д.И., Раскутин А.Е., Бабин А.Н., Филатов А.А., Морозов Б.Б. Многослойные конструкции со сферопластиком для изделий авиационной техники // Конструкции из композиционных материалов. 2014. № 1 (133). С. 37–42.
14. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. Синтактные пенопласты. М.: Химия, 1980. С. 158–215.
15. Панин В.Ф., Гладких Ю.А. Конструкции с наполнителем: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
16. Осипчик В.С., Олихова Ю.В., Нгуен Л.Х. и др. Определение температуры стеклования эпоксисилоксановой композиции термическими методами анализа // Пластические массы. 2017. № 7–8. С. 34–37.
17. Деев И.С., Кобец Л.П. Фактография эпоксидных полимеров // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 1996. Т. 38. № 4. С. 627–633.

#### References

1. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
4. Kablov E.N. Materials are the basis of any business. *Delovaya Slava Rossii*, 2013, no. 2, pp. 4–9.
5. Sarychev I.A., Serkova E.A., Khmel'nitsky 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: January 3, 2021). DOI: 10.18577/2307-6049-2019-0-7-26-33.

6. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. Mishkin S.I., Malakhovskiy S.S. Fast curing resins and prepregs: receiving, properties and areas of application (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 04. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: January 3, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40.
8. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S. et al. Composite materials using hollow microspheres. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
9. Pavlyuk B.Ph. The main directions in the field of development of polymeric functional materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
10. Sokolov I.I. *Spheroplasty based on thermosetting binders for aircraft products*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2013, 18 p.
11. Sokolov I.I., Minakov V.T. Spheroplasts for aviation purposes based on epoxy adhesives and dispersed fillers. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 22–26.
12. Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Sokolov I.I., Tundaykin K.O. Spheroplastic with adjustable viscosity for filling sections of honey-comb structures. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 23, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
13. Sokolov I.I., Kogan D.I., Raskutin A.E., Babin A.N., Filatov A.A., Morozov B.B. Multilayer constructions with spheroplast for aircraft products. *Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov*, 2014, no. 1 (133). pp. 37–42.
14. Berlin A.A., Shutov F.A. *Reinforced gas-filled plastics. Syntax foams*. Moscow: Khimiya, 1980, pp. 158–215.
15. Panin V.F., Gladkikh Yu.A. *Designs with a placeholder*: reference. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 272 p.
16. Osipchik V.S., Olikhova Yu.V., Nguyen L.Kh. Determination of the glass transition temperature of the epoxysiloxane composition by thermal methods of analysis. *Plasticheskiye massy*, 2017, no. 7–8. pp. 34–37.
17. Deev I.S., Kobets L.P. Factography of epoxy polymers. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*, ser. A. 1996, vol. 38, no. 4, pp. 627–633.

**Информация об авторах**

**Мишуров Константин Сергеевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Паярель Сергей Михайлович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Курносов Артем Олегович**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Боков Виталий Викторович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Konstantin S. Mishurov**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Sergey M. Payarel**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Artem O. Kurnosov**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vitalij V. Bokov**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 20.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.12.2021.

The article was submitted 20.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 22.12.2021.