

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-45-55

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУХКОМПОНЕНТНОГО СФЕРОПЛАСТИКА ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ МАРКИ ВПЗ-7М

Н.С. Артемов¹, М.А. Капустянская¹, А.В. Коваленко¹, Н.К. Сидельников¹, А.О. Курносов¹

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

Аннотация. Проведен анализ влияния температурных режимов отверждения на физико-механические свойства двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М. На основе ранее изученных режимов отверждения смол, входящих в состав сферопластика, подобраны наиболее подходящие режимы его отверждения. Рассмотрена модель реакции отверждения полимерного наполнителя на основе экспериментальных данных, полученных методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Исследована микроструктура образцов сферопластика. Полученные результаты позволяют сделать выбор условий отверждения, которые требуются для достижения высоких характеристик материала.

Ключевые слова: сферопластик, полимерный наполнитель, микроструктура, полимерный композиционный материал, отверждение, эпоксидное связующее

Для цитирования: Артемов Н.С., Капустянская М.А., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Курносов А.О. Исследование влияния температурных режимов отверждения на физико-механические свойства двухкомпонентного сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-7М // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-45-55.

Scientific article

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CURING TEMPERATURE CONDITIONS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TWO-COMPONENT COLD CURING SPHEROPLASTIC VPZ-7M

N.S. Artyomov¹, M.A. Kapustianskaia¹, A.V. Kovalenko¹, N.K. Sidelnikov¹, A.O. Kurnosov¹

¹Federal 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 study, an analysis of the influence of curing temperature conditions on the physical and mechanical properties of two-component spheroplastics VPZ-7M is carried out. Based on previously studied curing modes of resins included in spheroplastics, the most suitable curing modes were selected. A model of the curing reaction of a polymer filler is considered based on experimental data obtained by differential scanning calorimetry. The microstructure of the samples of spheroplastic was studied. The obtained results allow making a choice of the curing conditions to achieve the required material characteristics.

Keywords: spheroplastic, polymer filler, microstructure, polymer composite material, curing, epoxy binder

For citation: Artyomov N.S., Kapustianskaia M.A., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Kurnosov A.O. Research of the influence of curing temperature conditions on the physical and mechanical properties of two-component cold curing spheroplastic VPZ-7M. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-45-55.

Введение

В современном мире ученые продолжают исследовать и расширять границы понимания физико-химических свойств материалов. Каждый год проводится большое количество научных исследований с целью разработки и улучшения методов синтеза новых полимеров, что позволяет получать полимерные материалы с уникальным сочетанием характеристик [1, 2].

Одним из самых востребованных и перспективных направлений в современном промышленном производстве считается разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ). Процессы изготовления изделий из эпоксидных ПКМ (стекло-, угле-, органопластики с высокими упруго-прочностными свойствами) требуют длительных и энергоемких режимов отверждения, а эпоксидные материалы имеют низкую тепло-, огне- и трещиностойкость, а также высокое водопоглощение. Их широкое применение при производстве авиационных конструкций остается важным направлением в авиастроении [3–5]. Полимерные композиционные материалы обеспечивают изделиям оптимальное сочетание легкости и прочности, что представляет серьезную конкуренцию изделиям из стали и сплавов. К материалам, применяемым в авиационной и космической технике, предъявляются требования, в соответствии с которыми они должны быть как можно более легкими, надежными и не подверженными поломкам; выдерживать длительную эксплуатацию в экстремальных условиях, а также высокие температуры, возникающие при полетах на высоких скоростях или при входе в атмосферу; обладать стойкостью к коррозии под воздействием влаги, солей и других агрессивных сред и способностью выдерживать значительные аэродинамические нагрузки [6–8].

Экономическая эффективность производства ПКМ обуславливается их превосходящими эксплуатационными свойствами в сравнении с традиционными материалами. Увеличение ресурса изделий на основе ПКМ в 2–3 раза приводит к снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт [9].

В результате применения конструкций из ПКМ получаем: снижение массы изделий на 25–50 %, уменьшение трудоемкости, сокращение энергозатрат на изготовление сложных агрегатов в 8–10 раз, повышение коэффициента использования материала с 0,3 до 0,85, сокращение потерь от коррозии и расхода топлива, уменьшение материалоемкости в 1,6–3,5 раза. В сравнении с традиционными материалами ПКМ выгодно выделяются по таким основным параметрам, как плотность, модуль упругости, кратковременная и длительная прочность при растяжении, ползучесть, сопротивление усталости и демпфирующая способность [10].

При производстве основных компонентов для авиационной промышленности большое внимание уделяется преимуществам ПКМ, таким как высокая устойчивость к агрессивным средам и неблагоприятным условиям эксплуатации, а также относительно низкая плотность материалов. В некоторых планерах современных самолетов доля таких материалов составляет до 60 % [11].

Одной из разновидностей ПКМ являются легкие полимерные наполнители – сферопластики. Значительная (>50 %) пористость этих материалов обусловлена применением в качестве наполнителя полых частиц, благодаря чему достигаются существенные весовые преимущества, что имеет важное значение при разработке конструкций для оборонно-промышленного комплекса, авиации, судостроения и других областей промышленности [12, 13].

В частности, значительный интерес представляет двухкомпонентный сферопластик холодного отверждения марки ВПЗ-7М (ТУ 22.21.42-110-07545412–2023) на основе эпоксидной и полиамидной смол. Основным наполнителем данного сферопластика являются стеклянные микросферы, представленные в виде мелкодисперсных порошков из пустотелых сфер с тонкими стенками. Функциональная особенность данных частиц заключается в их низкой плотности, что способствует уменьшению общей плотности

композиционного материала и достигается существенная весовая эффективность [14]. Они применяются для точечного усиления конструкций с сотовой структурой, закрытия торцов и заполнения рабочих пустот в соединительных элементах авиационного оборудования. Материал улучшает процесс компоновки сотовых конструкций, принимает участие в распределении и переносе действующих нагрузок, при этом обеспечивая требуемые показатели прочности и долговечность соединений [15, 16].

Применение пустотелых стекломикросфер в составе композиционных материалов обусловлено их доступностью, радиопрозрачными свойствами и относительно высокими физико-механическими свойствами [17].

Полимерная основа и микросферы являются ключевыми составляющими и определяют технологические свойства и уровень эксплуатационных характеристик отвержденного материала в составе изделия [18]. Исследование процесса отверждения направлено на изучение температурных режимов как одного из факторов, влияющих на физико-механические свойства сферопластика марки ВПЗ-7М. Полученные результаты могут быть полезны как для улучшения технологии производства, так и качества готовой продукции.

Исследование и анализ свойств образцов двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М осуществляли в следующей последовательности:

- отверждение образцов сферопластика по выбранным температурным режимам и их механическая обработка для получения размеров и формы, соответствующих требованиям испытаний;
- определение плотности для контроля соответствия нормативным требованиям;
- механические испытания на сжатие образцов, отвержденных при выбранных температурных режимах, чтобы оценить поведение материала при нагрузках;
- проведение термического анализа методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для определения температурных точек, при которых происходят фазовые переходы, с выявлением степени отверждения образцов и температуры их деструкции;
- исследование и анализ микроструктуры с применением сканирующей электронной микроскопии для обнаружения изменений на микро- и макроструктурном уровне;
- анализ полученных данных для выявления зависимости между температурным режимом и физико-механическими свойствами сферопластика;
- разработка рекомендации по выбору температурных режимов изготовления сферопластика на основании результатов проведенных испытаний с целью улучшения его свойств и повышения эффективности использования.

Такой подход позволил оценить зависимость физико-механических свойств двухкомпонентного сферопластика холодного отверждения от температурных режимов.

Материалы и методы

Исследуемый материал – двухкомпонентный сферопластик марки ВПЗ-7М, способный выдерживать эксплуатационные нагрузки при температуре до 80 °С. Исходными компонентами для полимерной основы служат эпоксидная и полиамидная смолы.

Полимерная основа, используемая для получения сферопластика ВПЗ-7М, обладает рядом ключевых свойств:

- высокие адгезионные и прочностные характеристики;
- отсутствие объемной усадки при отверждении;
- повышенное сопротивление усталости и способность выдерживать циклические нагрузки;
- сопротивление к образованию микротрещин;
- устойчивость при воздействии влаги и других агрессивных сред.

В качестве основного дисперсного наполнителя используются полые стеклянные микросферы.

Для испытаний сферопластика марки ВПЗ-7М изготовили образцы из компонентов А и Б, состоящих из эпоксидной и полиамидной смол, антипирена, пигментов и стеклянных микросфер. Для оценки уровня сохраняемости свойств сферопластика проведены также исследования образцов из компонентов А и Б после хранения в течение 9 мес. при выбранных температурных режимах.

Выбор режимов отверждения образцов сферопластика определяли исходя из рекомендуемых режимов отверждения, взятых из научно-технического источника [19].

В работе применяли следующие методы исследований:

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

– определение предела прочности при сжатии проведено по ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» при температуре 21 ± 3 °С и относительной влажности воздуха 40 ± 10 %;

– определение степени отверждения, температуры стеклования и термодеструкции проведено по ГОСТ Р 56755–2015 с использованием метода ДСК, который позволяет измерять тепловые эффекты, происходящие в материале при изменении температуры, и определять температурный промежуток стеклования и степень отверждения образцов;

– исследование микроструктуры методом электронной сканирующей микроскопии проведено по ММ 1.595-12-243–2007 для понимания изменений во внутренней структуре образцов сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленных при различных температурных режимах, а также изучены морфология и структура материала на микроуровне, что позволило выявить изменения в кристаллической решетке, дефекты и оценить равномерность структуры.

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

Результаты и обсуждение

Для определения продолжительности отверждения сферопластика проведены испытания образцов после 24, 48 и 72 ч отверждения при температуре 23 °С. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М после отверждения по различным режимам

Свойство	Значение свойства* после отверждения в течение, ч		
	24	48	72
Прочность при сжатии при температуре 23 ± 2 °С, МПа	$\frac{32-41}{37}$	$\frac{36-45}{43}$	$\frac{38-47}{44}$

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

На основании полученных свойств установлено, что продолжительность полного отверждения двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М составляет от 48 до 72 ч. За время полного отверждения при температуре 23 °С приняли 72 ч для сравнения с другими режимами.

Выбор режимов отверждения образцов при повышенной температуре определяли исходя из рекомендуемых режимов отверждения для полиамидной и эпоксидной смол, входящих в состав сферопластика. Для сравнения взяты три режима отверждения:

- режим 1 – при температуре 23 °С в течение 72 ч;
- режим 2 – при температуре 65 °С в течение 2 ч;
- режим 3 – при температуре 40 °С в течение 6 ч + при 100 °С в течение 6 ч.

Испытание на сжатие позволяет получить комплексное представление о воздействии температурных режимов отверждения на физико-механические свойства сферопластика марки ВПЗ-7М. С помощью данного метода можно определить наиболее эффективные способы отверждения сферопластика для получения высоких результатов. Результаты испытаний физико-механических свойств представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства* двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М

Режим отверждения	Продолжительность отверждения, ч	Температура отверждения, °С	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
<i>Физико-механические свойства в исходном состоянии</i>				
1	72	23	$\frac{610-617}{614}$	$\frac{44-48}{46}$
2	2	65	$\frac{584-619}{605}$	$\frac{53-57}{55}$
3	6 + 6	40 + 100	$\frac{602-621}{613}$	$\frac{52-54}{53}$
<i>Физико-механические свойства после 9 мес. хранения компонентов</i>				
1	72	23	$\frac{609-627}{620}$	$\frac{47-49}{48}$
2	2	65	$\frac{606-618}{612}$	$\frac{51-54}{52}$
3	6 + 6	40 + 100	$\frac{610-624}{616}$	$\frac{50-55}{52}$

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Структура полимера и содержание наполнителей оказывают влияние на температуру стеклования. Этот критерий обладает значительной практической важностью и является гарантией продуктивного применения сферопластика [20]. В качестве максимального температурного порога работоспособности этого материала установлена его температура стеклования при режиме отверждения 1, равная 80 °С. Результаты определения температуры стеклования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели температуры стеклования и начала термоокислительной деструкции полимерного сферопластика марки ВПЗ-7М

Показатель	Режим отверждения	Средние значения показателя
Температура стеклования, °С	1	69
	2	73
	3	96
Температура начала интенсивной термоокислительной деструкции, °С	1	195
	2	197
	3	200

Результаты определения тепловых эффектов химической реакции в образцах сферопластика методом ДСК показали, что изменение температурного режима формования полимерного наполнителя оказывает влияние на степень отверждения. Степень конверсии в случае использования режима отверждения 1 составила 95 %, при использовании режима отверждения 2 степень отверждения: 93 %, при режиме отверждения 3: 99 %. Результаты испытаний представлены на рис. 1.

Образцы новой партии и партии после хранения компонентов в течение 9 мес. обладают схожими показателями значений прочности при сжатии, средней температуры стеклования и термодеструкции при отверждении по различным режимам. Это

показывает, что в течение продолжительного времени характеристики исходных компонентов полимерного наполнителя остаются на первоначальном уровне.

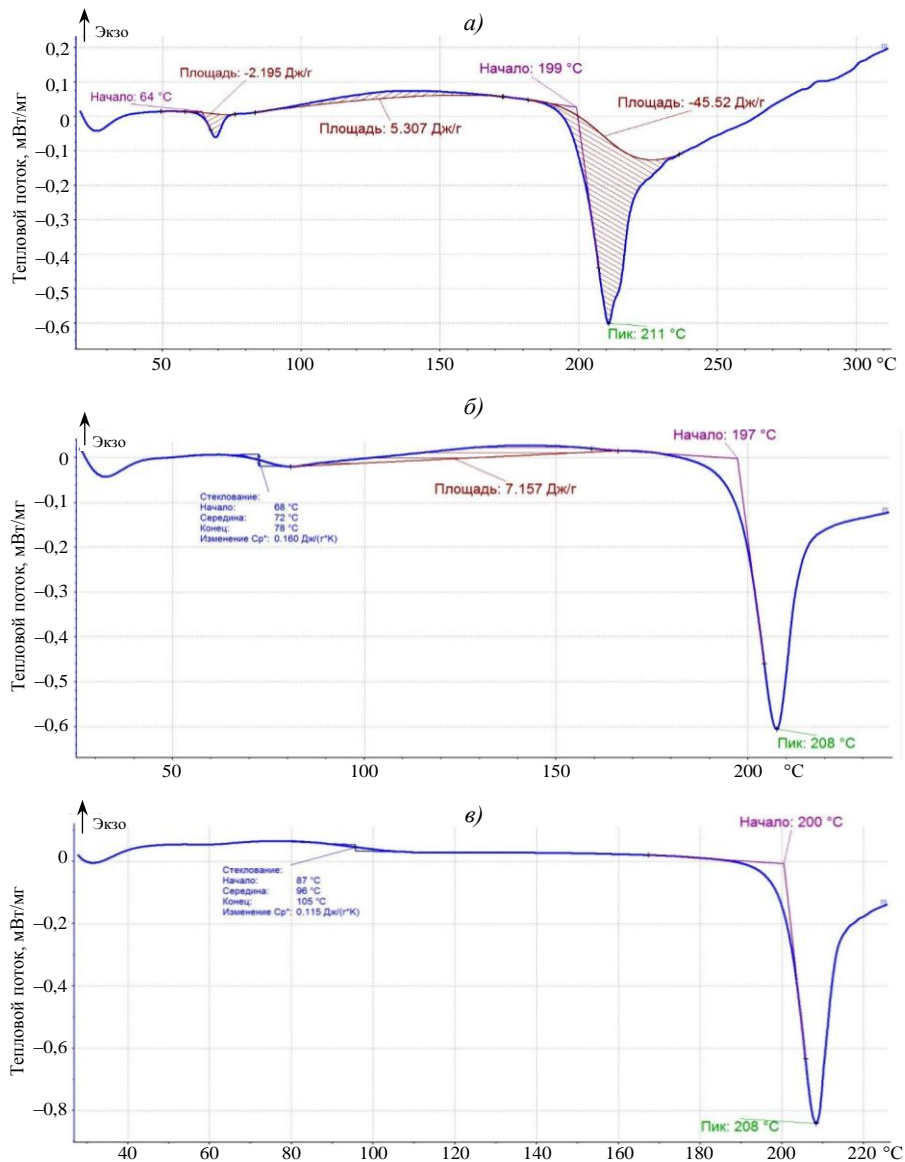


Рис. 1. ДСК-кривые отвержденных по режимам 1 (а), 2 (б) и 3 (в) образцов сферопластика

Для исследования микроструктуры подготовлены низкотемпературные сколы образцов: перед разрушением отвержденные образцы сферопластика замораживали в жидком азоте. Это делается для того, чтобы в структуре скола при пластической деформации были минимальные изменения.

Методом сканирующей электронной микроскопии проведены исследования низкотемпературных сколов образцов сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленных по трем режимам отверждения из компонентов А и Б новой партии и после их хранения в течение 9 мес.

Изготовленные в жидком азоте низкотемпературные сколы сферопластика марки ВПЗ-7М приклеивали с помощью токопроводящего клея на основе углерода к держателям образцов сканирующего электронного микроскопа и сушили на воздухе. После полного высыхания клея при комнатной температуре поверхности сколов подвергали ионно-плазменному травлению в вакуумной установке.

Для снятия электрических зарядов при исследовании образцов в сканирующем электронном микроскопе их поверхности металлизировали в установке магнетронного распыления.

Подготовленные таким образом образцы исследовали в сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичных SE-электронов при увеличениях от $\times 50$ до $\times 10000$ (рис. 2–5).

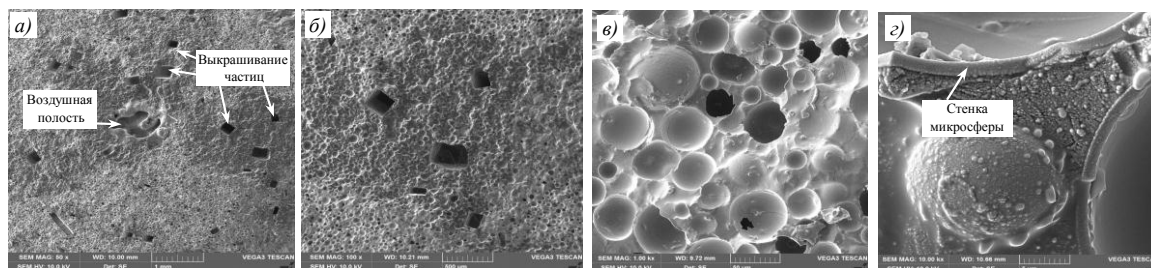


Рис. 2. Микроструктура после 9 мес. хранения низкотемпературного скота сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного из компонентов по режиму отверждения 1 при температуре 23 °С в течение 72 ч

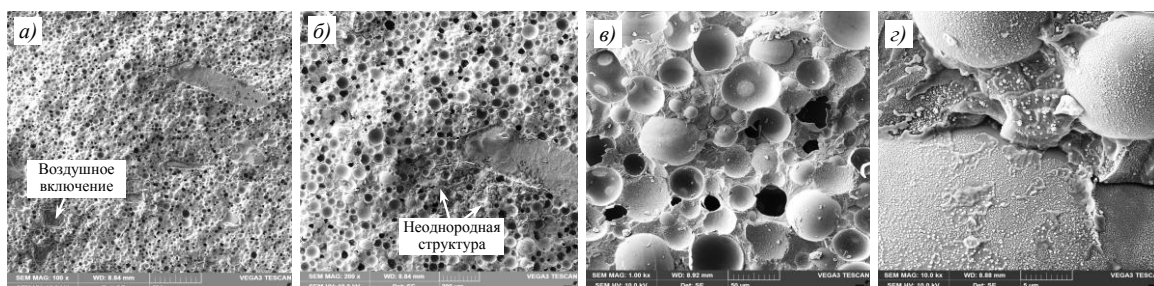


Рис. 3. Микроструктура после 9 мес. хранения низкотемпературного скота сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного из компонентов по режиму отверждения 2 при температуре 65 °С в течение 2 ч

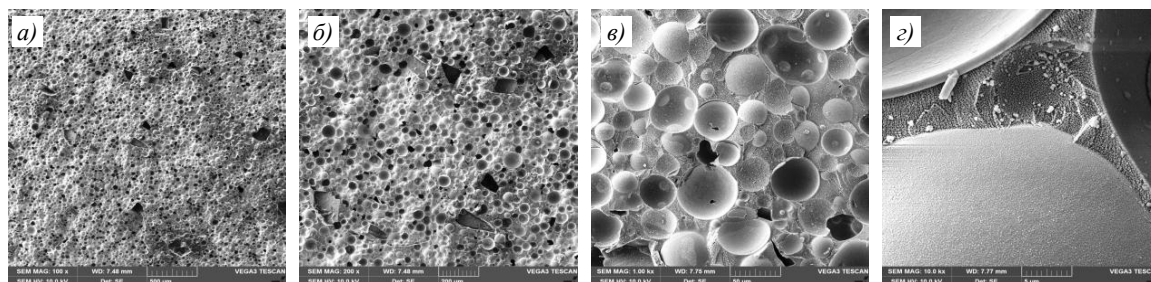


Рис. 4. Микроструктура после 9 мес. хранения низкотемпературного скота сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного по режиму отверждения 3 при температуре 40 °С в течение 6 ч + при 100 °С в течение 6 ч

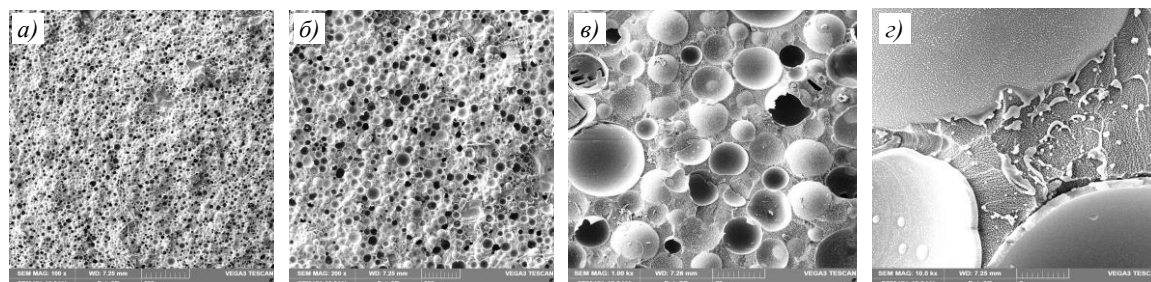


Рис. 5. Микроструктура низкотемпературного скота сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного по режиму отверждения 2 при температуре 65 °С в течение 2 ч

Микроструктурные исследования сколов сферопластика марки ВПЗ-7М показали, что в объеме образцов хаотично распределены полые микросферы размерами от 20 до 110 мкм с толщиной стенок от 0,8 до 1,2 мкм. Выявлено, что сферопластик наполнен порошкообразными частицами прямоугольной и неправильной формы (рис. 2–5). Предположительно ими являются частицы кристаллов антипирена, используемого в качестве антипирена в составе данного заполнителя.

Микроструктурные исследования поверхности скола сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного после 9 мес. хранения компонентов по режиму 1, показали (рис. 2) что при изготовлении скола происходит выкрашивание порошкообразных частиц прямоугольной формы из отвержденного образца (рис. 2, а, б). В объеме данного образца выявлена крупная воздушная полость (рис. 2, а). Разрушение отвержденного образца происходит как по границе раздела «микросфера–матрица», так и по микросфере с ее разрушением (рис. 2, в, г). Микрофазовая структура матрицы состоит из сферических частиц размерами от 140 до 350 нм, которые образуют более крупные агрегаты (рис. 2, г).

Исследования поверхности скола сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного после 9 мес. хранения компонентов по режиму 2, показали (рис. 3), что при изготовлении скола не происходит выкрашивания порошкообразных частиц из отвержденного образца (рис. 3, а, б). Обнаружены единичные воздушные включения (рис. 3, а) и области с неоднородной структурой (рис. 3, б). Механизм разрушения идентичен вышеописанному образцу (рис. 3, в, г). Микрофазовая структура матрицы состоит из дисперсных частиц, размеры которых лежат в диапазоне от 120 до 200 нм (рис. 3, г).

В образце сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного после 9 мес. хранения компонентов по режиму 3, не обнаружено воздушных полостей и включений (рис. 4). При изготовлении скола происходит выкрашивание порошкообразных частиц прямоугольной формы из отвержденного образца (рис. 4, а, б). Механизм разрушения отвержденного образца сохраняется (рис. 4, в, г). Размеры микродисперсных частиц микрофазовой структуры матрицы находятся в диапазоне от 100 до 130 нм (рис. 4, г).

Микроструктурные исследования поверхности скола сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного по режиму 2, показали (рис. 5), что разрушение отвержденного образца проходит по границе раздела «микросфера–матрица» с разрушением микросфер. Не выявлены выкрашивания порошкообразных частиц из отвержденного образца, а также воздушные включения (рис. 5, а, б). Микрофазовая структура матрицы состоит из микродисперсных частиц размерами от 80 до 125 нм, образующих более крупные агрегаты (рис. 5, г).

Во всех исследуемых сколах происходит ориентация матрицы на границе раздела с микросферами (рис. 2, г; 3, г; 4, г; 5, г).

Заключения

Испытания на сжатие выявили, что при температурных режимах отверждения 2 и 3 материал приобретает более высокую механическую прочность, что важно в случае его применения в условиях повышенных нагрузок. Однако следует учитывать, что неконтролируемые температурные изменения могут привести к снижению физико-механических характеристик.

Микроструктурные исследования скола сферопластика марки ВПЗ-7М показали, что в объеме образца равномерно распределены микросферы. Микрофазовая структура матрицы однородная, состоит из агрегатов дисперсных частиц, что подтверждает гипотезу о микрокомпозитном строении полимерной матрицы, представляющей собой однородную дисперсионную среду, в которой распределены частицы микродисперсной фазы.

В ряде образцов обнаружены вкрапления порошкообразных частиц, предположительно кристаллы антипирена. Следует вывод, что размер фракций кристаллов антипирена влияет на качество отвержденного образца, так как появляются области с неоднородной структурой, что в свою очередь ведет к ухудшению прочностных характеристик.

По результатам проведенных исследований тепловых эффектов методом ДСК определены температурные промежутки стеклования и степень отверждения образцов.

Степень отверждения образца сферопластика после температурного режима 3 увеличивается, что подтверждается повышением начала температуры стеклования на кривой отверждения.

В случаях, когда требуется высокая степень отверждения и максимальные прочностные свойства, рекомендуется использовать режим отверждения 3. В условиях с меньшими требованиями, когда скорость отверждения является более важным фактором, можно использовать режим отверждения 2. При отсутствии возможности проводить отверждение при повышенной температуре следует использовать режим отверждения 1.

Таким образом, для выбора процесса отверждения и достижения желаемых характеристик изделий из сферопластика требуется учитывать влияние температурного режима на его физико-механические характеристики.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ Е.В. Куршеву и С.Л. Лонскому, за подготовку образцов и проведение их микроструктурных исследований, Г.Б. Эльдяевой – за проведение ДСК-анализа.

Список источников

1. Застрогина О.Б., Синякова С.Д., Серкова Е.А. Материалы на основе фенолформальдегидных олигомеров резольного и новолачного типов (обзор). Часть 2 // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-55-65.
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
3. 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: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
4. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
5. Малышева Г.Н., 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: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
6. 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.
7. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
8. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
9. Капустянская М.А., Гуревич Я.М., Мишуров К.С. Полимерный наполнитель для технологии ускоренного формования // Пластические массы. 2023. № 11–12. С. 50–53. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-50-53.
10. 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.
11. Курносов А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе терморезистивных полиимидных связующих для авиакосмической техники. Обзор // Вопросы материаловедения. 2016. № 4 (88). С. 50–62.

12. 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.
13. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
14. 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: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
15. 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.
16. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. 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.
17. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
18. 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.
19. Каталог продукции: Полиамидные отвердители // ХИМЭКС Лимитед LTD. С. 48. URL: <http://chimexltd.com/catalog/otverditeli-uskoriteli-otverzhdeniya/poliamidnye-otverditeli/> (дата обращения: 01.03.2024).
20. Осипчик В.С., Олихова Ю.В., Нгуен Л.Х., Луцейкин Г.А., Аристов В.М. Определение температуры стеклования эпокси-силоксановой композиции термическими методами анализа // Пластические массы. 2017. № 7–8. С. 34–37.

References

1. Zastrogina O.B., Sinyakov S.D., Serkova E.A. Materials based on phenolformaldehyde oligomers of resol and novolac types (review). Part 2. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-55-65.
2. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aircraft. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
3. 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: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
4. Mikhailin Yu.A. *Heat-resistant polymers and polymer materials*. St. Petersburg: Profession, 2006, 624 p.
5. 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: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
6. Trostyanskaya E.B., Golovkin G.S., Dmitrenko V.P. Promising PCMs and advanced technologies for the production of aircraft structural elements from them. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1987, no. 2, pp. 37–42.
7. Kablov E.N. Materials for aerospace technology. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
8. Bulanov I.M., Vorobey V.V. *Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials*. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 1998, 516 p.
9. Kapustyanskaya M.A., Gurevich Ya.M., Mishurov K.S. Polymer filler for accelerated molding technology. *Plasticheskiye massy*, 2023, no. 11–12, pp. 50–53. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-50-53.

10. 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.
11. Kurnosov A.O., Raskutin A.E., Mukhametov R.R., Melnikov D.A. Polymer composite materials based on thermosetting polyimide binders for aerospace engineering. Review. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 4 (88), pp. 50–62.
12. 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.
13. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern materials for the aircraft cabin. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
14. Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Sokolov I.I., Tundaykin K.O. Spheroplastic with adjustable viscosity for filling sections of honeycomb structures. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
15. 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.
16. 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.
17. Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Influence of fillers on properties of adhesive pre-pregs and PCM on their basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
18. 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.
19. *Polyamide hardeners CHIMEX Limited LTD*. Available at: <http://chimexltd.com/catalog/otverditeli-uskoriteli-otverzhdeniya/poliamidnye-otverditeli/> (accessed: March 01, 2024).
20. Osipchik V.S., Olikhova Yu.V., Nguyen L.H., Lushcheykin G.A., Aristov V.M. Determination of the glass transition temperature of an epoxy-siloxane composition by thermal analysis methods. *Plasticheskiye massy*, 2017, no. 7–8, pp. 34–37.

Информация об авторах

Артемов Никита Сергеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Капустянская Мария Александровна, 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

Курносков Артем Олегович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikita S. Artyomov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

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

Artyom O. Kurnosov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.06.2024.

The article was submitted 03.06.2024; approved and accepted for publication after reviewing 18.06.2024.