

DOI: 10.15593/2224-9982/2020.63.10

УДК 66.018.4

**А.В. Марамыгин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **МОДИФИЦИРОВАННАЯ ЭПОКСИДНАЯ КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ**

Материал, обобщенный в данной статье, рекомендован для инженерных работников авиакосмической отрасли, а также представляет интерес для производственного персонала промышленных предприятий авиакосмической отрасли. Освещает вопросы изготовления наружных теплозащитных покрытий «чешуйчатого» типа на основе синтактичных материалов с интумесцентными свойствами, используемых в производстве техники специального назначения. Проведенная работа обобщает результаты практического применения метода технологической адаптации в условиях реального производства наружных теплозащитных покрытий. Приводится описание типового технологического процесса изготовления наружного теплозащитного покрытия чешуйчатого типа из панелей на основе синтактичного материала, включающего этапы изготовления отдельных панелей в формообразующей оснастке и формования теплозащитного покрытия путем укладки и приформовки отдельных панелей на силовую оболочку летательного аппарата. Автором на примере процессов модификации модельной полимерной композиции, являющейся основой синтактичного материала, подтверждается эффективность применения метода технологической адаптации. Описаны решения по оптимизации производственного цикла за счет улучшения технологических свойств используемых материалов. Приведены результаты исследований, в том числе спектрального и термохимического анализа полимерных композиций, модифицированных полиизоцианатами, описаны методики исследования их свойств. Получены квазиэвтектические смеси алифатических и ароматических аминов, применение которых в качестве отвердителей реакционноспособных эпоксиуретановых полимеров, изготовленных на основе эпоксидных диановых олигомеров и полиизоцианатов, позволило разделить процесс полимеризации на две ступени. Раскрытый в статье способ включения в процессы полимеризации разделения режима обеспечивает исключение дефектов панелей на этапе приформовки, что способствует повышению качества и надежности теплозащитного покрытия.

**Ключевые слова:** технологическая адаптация, производство, летательный аппарат, теплозащитное покрытие, эпоксидная композиция, эвтектическая смесь, аминный отвердитель, синтактичные материалы, интумесценция, температура стеклования, стехиометрическое соотношение, модификация, полиизоцианаты, инфракрасная спектроскопия, термоаналитическое исследование.

**A.V. Maramygin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **MODIFIED EPOXY COMPOSITION FOR PRODUCTION OF THERMAL PROTECTION COATING**

The material summed up in this article is recommended for engineers of aerospace industry, as well as can be of interest for the production personnel. The article covers the production of "scale-like" outer thermal protection coatings on the basis of syntactic materials with tumescent characteristics used in the production of special purpose equipment. The research performed sums up the results of the practical implementation of the technology adaptative method in the conditions of the real outer thermal protection coatings production. This work describes a typical technological process of "scale-like" outer thermal protection coating production from the panels based on syntactic material, including the stages of separate panels production with the help of shape-generating molding tools and forming of thermal protection coating by laying and molding-on of separate panels on the pressure restraint layer of the aircraft. The author proves the effectiveness of technology adaptative method usage on the example of modification processes of pattern polymer composition being the basis of syntactic material. The research describes the solutions for the production cycle optimization via improvement of technological properties of the materials used. The work also contains the results of the researches, including spectral and thermochemical analyses of polymer compositions modified by polyisocyanates, and describes the research techniques of their properties. Quasi-eutectic compositions of aliphatic and aromatic amines are received, which, being used as curative of reactive epoxyurethane polymers produced on the basis of epoxy-diane oligomers and polyisocyanates, enable to divide the polymerization process into two stages. The method described in the article provides the elimination of panel defects on the stage of molding-on due to implementation of mode separation in polymerization processes, which contributes towards the quality and reliability of thermal protection coating.

**Keywords:** technological adaptation, production, aircraft, thermal protection coating, epoxy composition, eutectic composition, amine curative, syntactic materials, tumescence, glass transition temperature, stoichiometric ratio, modification, polyisocyanates, IR spectroscopy, thermoanalytical investigation.

## Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития авиакосмической отрасли является разработка и совершенствование технологии производства покрытий, предназначенных для защиты летательных аппаратов (ЛА) от специфических факторов воздействия (лазерное, радиационное, тепловое излучение и др.) [1, 2].

В этой связи особый интерес представляют технологии производства наружных покрытий на основе синтактных материалов (сферопластиков), для которых за счет вариативности исходных компонентов можно спроектировать и изготовить материалы, сочетающие в себе комплексную защиту, высокие удельные показатели прочности и низкую плотность [2, 3]. В качестве полимерных матриц для сферопластиков в основном используют фенольные, эпоксидные, а также кремнийорганические [4, 5]. Одновременно с этим в современной производственной практике сложилась закономерная тенденция разработки материалов, соответствующих не только конструкционным требованиям изделия, но и производственным возможностям предприятия, – так называемый подход технологической адаптации. Данный подход на этапе проектирования материала требует значительных финансовых и временных затрат, но упрощает процесс подготовки и оснащения производства, поэтому развитие и совершенствование метода технологической адаптации новых материалов для предприятий специального машиностроения является актуальным.

В рамках данного проекта проведены работы по технологической адаптации модельной эпоксидной композиции для изготовления сферопластика, являющегося основой интумесцентного состава для производства «чешуйчатого» наружного теплозащитного покрытия (НТЗП) ЛА. Данный тип НТЗП давно известен и используется в специальном машиностроении [6, 7].

Показателен пример изготовления НТЗП, технология нанесения которого на ЛА включала следующие операции:

– формование заготовки силовой оболочки методом «мокрой» намотки;

– формование пластин сферопластика методом свободной заливки в пресс-формы;

– режим предварительного отверждения и извлечение заготовок пластин сферопластика из пресс-форм;

– приклейка заготовок пластин сферопластика на заготовку силовой оболочки;

– режим формования клеевого шва;

– совместный режим отверждения заготовок силовой оболочки и пластин сферопластика с окончательным формированием свойств ЛА с НТЗП.

Для реализации данного проекта материал после окончательного режима отверждения должен соответствовать конструкционным требованиям, приведенным в табл. 1, и, кроме того, обеспечивать следующие технологические параметры:

– величину динамической вязкости, достаточную для заполнения прямоугольных пресс-форм, – толщиной до 4 мм, без нагрева методом свободной заливки, с возможностью удаления пустот и пор путем вакуумирования;

– величины ударной вязкости и относительного удлинения в предварительно отвержденном виде, достаточные для обеспечения демонтажа пластин сферопластика из пресс-форм ударным методом или методом отжатия и укладки предварительно отвержденных пластин сферопластика на цилиндрические поверхности с радиусом кривизны не менее 2500 мм, без образования трещин и нарушения целостности.

Таблица 1

Конструкционные требования к материалу

№ п/п	Параметр	Значение
1	Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup> , в пределах	670–750
2	Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР), 10 <sup>-6</sup> ·К <sup>-1</sup> , не более	50–60
3	Температура стеклования, °С, не менее	100
4	Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	30
5	Предел прочности на изгиб, МПа, не менее	25

Таким образом, *целью работы* являлась модификация модельной эпоксидной композиции (основы) сферопластика для обеспечения заданных конструкционных и технологических свойств материала.

*Объектом исследования* являлась эпоксидная композиция на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587–84 (ЭД)), продукт конденсации димеризованных метиловых эфиров, кислот, растительных масел и полиэтиленполиаминов (ТУ 2224-092-05034239–96 (ПС)).

*Предметом исследования* являлись процессы модификации эпоксидной композиции.

### Экспериментальная часть

#### Материалы

В качестве *модификаторов* использовались метиленидиенилоцианат (МДИ) с содержанием изоцианатных групп 31,5 %, ароматический аминный отвердитель 3,3-дихлор-4,4-диаминодифенилметан (Диамет-Х) (ТУ 2491-030-35785061–2010) со стехиометрическим коэффициентом 1,55.

*Модифицированная смесь смолы* изготавливалась путем смешения ЭД и МДИ с различным массовым содержанием МДИ (1, 3, 5, 7 мас. %) в реакторе при температуре  $(65 \pm 5)^\circ\text{C}$  в течение 60 мин, не менее, при постоянном перемешивании.

*Модифицированная смесь отвердителей* изготавливалась путем смешения ПС и Диамет-Х в соотношениях 1:1, 1:2, 2:1 в реакторе при температуре  $(85 \pm 5)^\circ\text{C}$  в течение 120 мин, не менее, при постоянном перемешивании.

Модельная и модифицированная *эпоксидные композиции* изготавливались путем смешения соответствующих смол и отвердителей в стехиометрическом соотношении. Отверждение модельных композиций на основе ЭД и ПС проводилось при температуре  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, не менее; модифицированных композиций на основе ЭД + МДИ и Диамет-Х + ПС – при температуре  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, не менее, и по комбинированному режиму – при температуре  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, не менее, с последующим режимом  $160^\circ\text{C}$  в течение 10 ч, не менее.

*Сферопластики* изготавливались путем введения в соответствующие эпоксидные ком-

позиции (модифицированные и модельные) микросфер марки МС-ВП-А9 гр. 3 (ТУ 6-48-91–92) в количестве 20 мас. %.

*Пластины из сферопластика* для НТЗП изготавливали путем свободной заливки соответствующих эпоксидных композиций (модифицированных и модельных) в предварительно обработанные антиадгезионной смазкой пресс-формы размером  $400 \times 200 \times 4$  мм. Отверждение в пресс-формах для модельных и модифицированных композиций проводилось при температуре  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, не менее, вне пресс-форм (на силовой оболочке после формирования клеевого шва) – по совместному с силовой оболочкой режиму при температуре  $160^\circ\text{C}$  в течение 10 ч, не менее.

#### Методики исследования

Для контроля содержания эпоксидных, гидроксильных и изоцианатных групп в жидких полимерах использовались стандартизованные аналитические методы химического анализа в соответствии с ГОСТ 12497–78, ГОСТ 17555–72 и ТУ 113-38-115–91 соответственно.

Контроль полноты реакции взаимодействия смеси ЭД и МДИ проводился методом ИК-спектроскопии на ИК-фурье-спектрометре Bruker Vertex 80V по результатам анализа ИК-спектров пропускания образцов смесей в диапазоне длин волн от 400 до  $4000\text{ см}^{-1}$  при разрешении  $1\text{ см}^{-1}$  на КВг-стеклах. Дополнительный контроль модифицированных смесей осуществлялся по стандартизованной аналитической методике химического анализа в соответствии с ГОСТ 12497–78.

Контроль совместимости отвердителей Диамет-Х и ПС осуществлялся по внешневиновым признакам – наличию опалесценции в смеси на просвет после выдержки 24 ч, не менее. Стехиометрический коэффициент смесей определялся опытным путем в соответствии с методикой ТУ 2433-065-04689375–2003.

Контроль полноты отверждения композиций проводился по степени отверждения в соответствии с методикой по ОСТ 92–0903. Контроль температуры стеклования проводили на приборе термомеханического и дифференциального термического анализа Mettler Toledo TMA/SDTA841 в диапазоне от 0 до  $200^\circ\text{C}$  со скоростью нагрева  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$  при

постоянной нагрузке 0,02 Н на образцах кубической формы с размером ребра ( $6 \pm 2$ ) мм в соответствии с ГОСТ Р 55135–2012.

Контроль кажущейся плотности сферопластиков проводили на образцах кубической формы с размером ребра ( $30,0 \pm 0,5$ ) мм в соответствии с ГОСТ 409. Контроль коэффициентов линейного температурного расширения проводили на образцах размером  $20 \times 20 \times 30$  мм в соответствии с ГОСТ 32618.2. Контроль прочностных характеристик проводили путем определения разрушающего напряжения при сжатии на образцах  $\varnothing 20$  мм и высотой 40 мм в соответствии с ГОСТ 4651; разрушающего напряжения при изгибе на образцах размером  $80 \times 10 \times 4$  мм в соответствии с ГОСТ 4648.

Контроль качества заполнения прессформ сферопластиком оценивали визуально после демонтажа и разрезки пластин сферопластика по наличию пустот и пор. Контроль технологичности пластин сферопластика оценивали путем укладки пластин сферопластика, предварительно отвержденного при ( $25 \pm 2$ ) °С в течение 24 ч, не менее, на поверхность силовой оболочки с обжатием по форме до полного прилегания, с последующим визуальным контролем на наличие механических повреждений (трещин, сколов, белесоватостей и др.) и наличие отслаивания до и после совместного с силовой оболочкой режима.

### Результаты и их обсуждение

Руководствуясь ограничительным перечнем клеев и компаундов, приведенных в ОСТ 92–0948, для изготовления основы интумесцентного синтактного состава выбрали модельную композицию на основе ЭД и ПС. Стехиометрическое соотношение компонентов смеси 100:66,9 определено из расчета установленных в ходе анализа стехиометрического коэффициента ПС, равного 3,0, и эпоксидного числа ЭД, равного 22,3. На основе модельной композиции в пресс-формах изготовлены пластины сферопластика, предварительный режим (температура ( $25 \pm 2$ ) °С в течение 24 ч, не менее) которых проведен в пресс-форме без демонтажа, после чего проведены их демонтаж и обжатие на имитаторе силовой оболочки с кривизной 2500 мм. Осмотр показал, что при демонтаже на поверхности образ-

цов модельной композиции образуются множественные растрескивания (белесоватости) и сколы, попытки обжатия пластин на имитаторе силовой оболочки приводят к нарушению целостности, что свидетельствует о недостаточной ударной вязкости и низком показателе относительного удлинения. Повторные режимы, имитирующие совместное отверждение с силовой оболочкой (температура 160 °С в течение 10 ч, не менее), приводят к растрескиванию материала, что, вероятно, обусловлено высокой хрупкостью, характерной для густосшитых полимеров, и отпуском остаточных напряжений при повторном режиме, приводящих к критическим деформациям и нарушению целостности образца. Кроме того, результаты термоаналитического анализа модельной композиции свидетельствуют о точке стеклования на уровне температуры 60 °С, при этом теплостойкость пластин сферопластика в составе ЛА должна быть на уровне 90 °С, именно таких значений достигает температура поверхности силовой оболочки при рабочих режимах.

В соответствии с теорией хрупкого разрушения (теория Гриффита) прочность полимера определяется удельной энергией вновь образованной поверхности разрушения. Если разрушение не идеально хрупкое и в вершине роста трещины успевает развиваться заметная деформация, то удельная энергия образования новой поверхности многократно возрастает [8]. Таким образом, в ненаполненных полимерах повышение трещиностойкости возможно за счет включения в сетку дополнительных групп атомов, играющих роль компенсатора роста трещин, например относительно подвижных уретановых групп [9–12]. Такой путь модификации предложен, например, в работе [13]. Эффективность данного метода модификации подтверждается практикой при использовании полиизоцианатов в качестве отвердителей эпоксидных смол [14].

Для повышения трещиностойкости композиции смола ЭД была модифицирована МДИ. Стехиометрическое соотношение компонентов было подобрано из расчета количества гидроксильных и изоцианатных групп в ЭД и МДИ соответственно. В связи со значительным разбросом соответствующих пока-

зателей от партии к партии (0,5–1,5 % для гидроксильных и 29,0–32,5 % для изоцианатных) и снижением функциональности эпоксидного олигомера при протекании побочных реакций с эпоксидными группами был введен дополнительный контроль по ИК-спектрам и аналитический контроль содержания эпоксидных групп в модифицированной МДИ ЭД. Нормирование ИК-спектров (рис. 1) эпоксидиановой смолы с различным содержанием МДИ (0, 3, 5, 7 мас. %) производили по волновому числу  $1600\text{ см}^{-1}$ , характерному для колебаний бензольного кольца. Во всем диапазоне исследуемых концентраций МДИ на ИК-спектрах, наряду с ростом интенсивности волновых чисел  $1730$  и  $3310\text{ см}^{-1}$ , характерных для колебаний уретановых групп, наблюдается закономерное снижение интенсивности пиков, характерных для гидроксильных групп  $3500\text{ см}^{-1}$  [15], что подтверждает протекание реакции уретанообразования, об этом также свидетельствует пропорциональный рост вязкости олигомера. При этом содержание эпоксидных групп в модифицированных МДИ-образцах для концентраций до 5 мас. % включительно находится на одном уровне –  $(22,3 \pm 0,2)\%$ , в пределах погрешности измерения, при больших концентрациях наблюдается снижение содержания эпоксидных групп до 20,1 %. Вероятно,

это обусловлено протеканием побочных реакций между изоцианатными и эпоксидными группами, что ведет к потере функциональности модифицированного ЭД.

С учетом результатов анализа модельной композиции для комплексного решения вопроса по ее технологической адаптации, кроме ранее обозначенных технологических требований, возникла необходимость повышения теплостойкости материала при сохранении его свойств эластичности в степени, достаточной для обжатия силовой оболочки с заданным радиусом кривизны. Для решения данной задачи был проработан вариант проектирования материала с двумя температурами стеклования: первая точка – не менее  $50\text{ °C}$ , что соответствует нижней границе температуры формирования клеевого шва, вторая точка – не менее  $90\text{ °C}$ , что соответствует нижней границе температуры рабочего диапазона силовой оболочки.

Для решения задачи в качестве активной части отвердителя выбран ПС, представляющий собой продукт конденсации димеризованных метиловых эфиров, кислот, растительных масел и полиэтиленполиаминов, активный водород которого способен вступать в реакции с эпоксидными группами уже при температурах свыше  $18\text{ °C}$ ; в качестве латентной

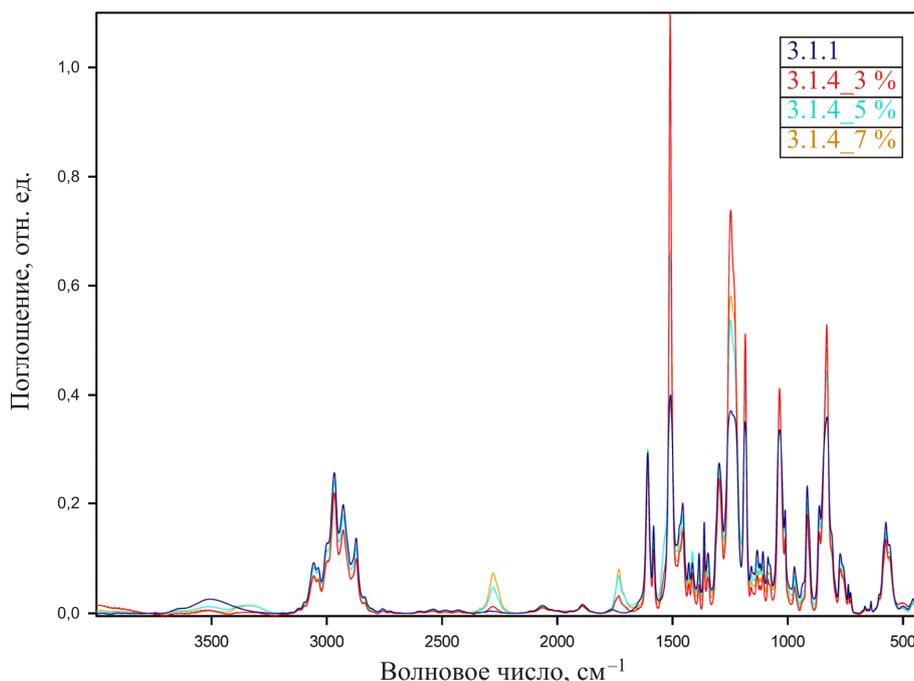
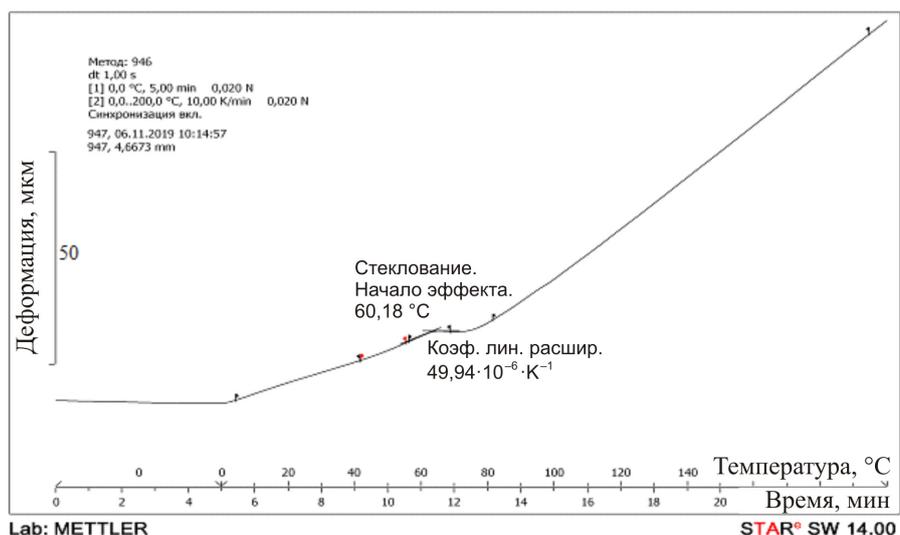


Рис. 1. ИК-спектры модифицированной ЭД с различным содержанием МДИ

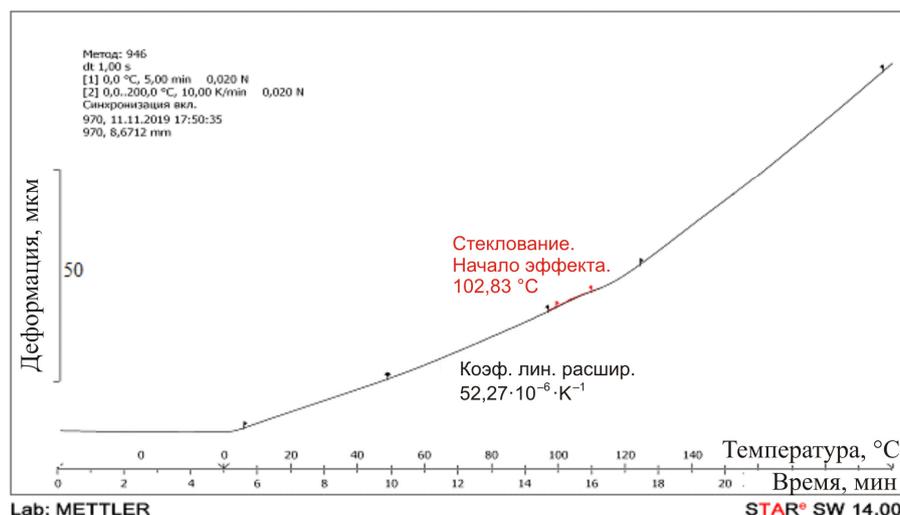
части выбран Диамет-Х, ароматический амин, являющийся «горячим» отвердителем с температурой активной реакции свыше 120 °С. Из ряда смесей отвердителей, приготовленных в соотношениях 1:1, 1:2, 2:1, квазиэвтектической можно считать только смесь, приготовленную в соотношении 1:1, где опалесценция не наблюдалась даже по истечении 10 сут. Остальные смеси, принятые к рассмотрению в качестве модифицированного отвердителя, были нетехнологичны и в работе не участвовали: для соотношения 1:2 добиться полной растворимости Диамет-Х не удалось, для соотношения 2:1 появление опалесценции, связанное с выкри-

сталлизацией Диамет-Х, начиналось в интервале 1–2 ч, что отрицательно влияло на технологичность отвердителя и ограничивало применение в производственном цикле.

Для модифицированного отвердителя с соотношением ПС и Диамет-Х 1:1 расчетным способом определен стехиометрический коэффициент, равный 1,63. Практически установленный коэффициент сопоставим с расчетным 1,6. Изготовлены модифицированные эпоксидные композиции при стехиометрическом отношении Диамет-Х + ПС и ЭД + МДИ, проведен термоаналитический анализ, получены ТМА-кривые (рис. 2). На кривых наблю-



*a*



*б*

Рис. 2. Кривая ТМА модифицированных эпоксидных композиций:

*a* – после выдержки при 25 ± 2 °С в течение 24 ч, не менее;

*б* – после выдержки при 25 ± 2 °С в течение 24 ч, не менее + при 160 °С в течение 10 ч, не менее

Таблица 2

Характеристики сферопластика

№ п/п	Параметр	Значение
1	Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup> , в пределах	720
2	Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР), 10 <sup>-6</sup> ·К <sup>-1</sup> , не более	58
3	Температура стеклования, °С, не менее	102
4	Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	35
5	Предел прочности на изгиб, МПа, не менее	28

даются тепловые эффекты, соответствующие первой точке с температурой стеклования 60,18 °С (см. рис. 2, а) и второй точке с температурой стеклования 102,83 °С (см. рис. 2, б). Таким образом, можно говорить, что при выдержке модифицированных эпоксидных композиций без приложения температурной нагрузки формировалась первичная сетка полимера, реакция шла по аминным группам ПС, при нагреве стали активны аминные группы, сопряженные с ароматическими кольцами Диамет-Х, что привело к образованию новых связей, росту шивок и повышению температуры стеклования.

Последующий контроль технологичности плит сферопластика подтвердил эффективность выполненной модификации – при демонтаже и укладке плит сферопластика на поверхность имитатора силовой оболочки не

было отмечено наличия расстрескиваний (белесоватостей), сколов и других дефектов, характерных для густосшитых и хрупких полимеров. В ходе совместного режима отверждения методом термоаналитического анализа установлена температура стеклования материала плит сферопластика, значение которой оказалось сопоставимо с температурой модифицированных композиций (табл. 2).

Проведен контроль физико-химических и физико-механических характеристик сферопластика, результаты сведены в табл. 2.

Как видно из предоставленных данных, характеристики сферопластика соответствуют предъявляемым конструкцией требованиям.

**Выводы**

1. Исследованы процессы модификации модельной эпоксидной композиции, определены теплофизические, физико-химические и физико-механические характеристики синтактного материала на ее основе.

2. Проведена технологическая адаптация модельной эпоксидной композиции путем модификации исходных компонентов. Разработана основа интумесцентного состава НТЗП ЛА на эпоксиуретановых смолах, отвержденных квазиэвтектическими смесями алифатических и ароматических аминов.

3. Определены оптимальные пропорции модифицирующих добавок для достижения требуемых свойств исходных компонентов и их смесей.

**Библиографический список**

1. Левшин Е.А., Усов С.Ю., Коровин Р.А. Влияние пленочных покрытий мультизеркального типа на точностные характеристики лазерных следящих систем // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. ПК «АВИАТОР», г. Воронеж, 11–13 февраля 2015 г.: в 2 т. / ВУНЦ ВВС «ВВА». – Воронеж, 2015. – Т. 1. – 250 с.
2. Напыляемые теплозащитные покрытия на основе полиуретановых водных дисперсий, полимерных и стеклянных микросфер / О.В. Черваков, А.Н. Симбиркина [и др.] // Космическая техника. Ракетное вооружение. – 2015. – № 3 (110). – С. 65–70.
3. Разработка и перспективы применения синтактных пенопластов в качестве теплозащитных материалов ракетно-космической техники / А.М. Потапов, А.Н. Симбиркина, О.В. Черваков, В.М. Кисель // Физико-химическая механика материалов. – 2016. – Т. 52, № 1. – С. 7–13.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ 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.
5. Физико-механические свойства сферопластиков на основе полых стеклянных микросфер и полиакрилового связующего / В.Ю. Чухланов [и др.] // Бутлеровские сообщения. – 2017. – Т. 50, № 6. – С. 141–145.

6. Chukhlanov V.Y., Selivanov O.G. Thermophysical properties of syntactic plastic foams based on polydimethylsiloxane binder // *International Polymer Science and Technology*. – 2016. – Vol. 43, no. 3. – P. 39–42.
7. Каблов Е.Н., Демонис И.М., Зыков Д.К. «Доспехи» для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия-Буран» / под общ. ред. академика РАН Е.Н. Каблова; Фонд «Наука и жизнь». – М., 2013. – 172 с.
8. Способ выполнения теплозащитного покрытия аэродинамической поверхности летательного аппарата: пат. RU2669147 / Каверин В.А. [и др.]. – № 201727411; заявл. 01.08.2017; опубл. 08.10.2018.
9. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – Ч. 1. – 118 с.
10. Эпоксидная композиция: а.с. 749869 СССР / Лапицкий В.А. [и др.]. – Опубл. в Б.И. 1980, Бюл. № 27.
11. Эпоксидная композиция холодного отверждения: пат. RU2479601С1 / Панина Н.Н. [и др.]. – № RU2012107988/04А; заявл. 02.09.2012; опубл. 20.04.2013.
12. Эпоксипуретановый заливочный компаунд: пат. RU2545308С2 / Николаева Н.П. [и др.]. – № RU2013131713/05А; заявл. 09.07.2013; опубл. 27.03.2015.
13. Косточко А.В. Специальные полимеры и композиции. Избранные статьи. – Казань, 1999. – 224 с.
14. Способ отверждения эпоксидных смол: а.с. 150622 СССР / Сытина М.А., Гурджи Ф.М. – Опубл. в Б.И. 1967, Бюл. № 9. – 32 с.
15. Плиев Т.Н. Молекулярная спектроскопия: в 5 т. – Владикавказ: Иростон, 2002. – Т. 4. – 758 с.

#### References

1. Levshin E.A., Usov S.Yu., Korovin R.A. Vliyaniye plenochnykh pokrytiy multizerkalnogo tipa na tochnostnyye kharakteristiki lazernykh sledyashchikh sistem [Influence of multi-mirror film coatings on the precision characteristics of laser tracking systems]. *Aktualnyye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivaniye, razrabotki*. Collection of scientific articles adapted from the II all-Russian research and practice conference “AVIATOR” (11–13 February, 2015) reports, in 2 volumes, Voronezh, VUNTS VVS “VVA” (Military Educational and Scientific Center of Air Force establishment “Air Force Academy”), 2015, vol. 1, pp. 72–75.
2. Chervakov O.V., Simbirкина A.N. i dr. Napylyayemyye teplozashchitnyye pokrytiya na osnove poliuretanykh vodnykh dispersiy, polimernykh i steklyannykh mikrosfer [Thermal spray coatings on the basis of polyurethane water dispersions, polymer and glass microspheres]. *Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoye vooruzheniye*, 2015, vol. 3 (110), pp. 65–70.
3. Potapov A.M., Simbirкина A.N., Chervakov O.V., Kisel V.M. Razrabotka i perspektivy primeneniya sintaknykh penoplastov v kachestve teplozashchitnykh materialov raketno-kosmicheskoy tekhniki [Development and usage possibilities of syntactic plastic foams as thermal protection materials for the rocket and space equipment]. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 7–13.
4. Kablov E.N. Innovatsionnyye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF po realizatsii «Strategicheskikh napravleniy razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative solutions of FGUP “VIAM” (Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Aviation Materials”) State Science Center of RF for the implementation of Strategic directions of growth for the materials and technologies of their recycling for the period up to the year 2030]. *Aviation materials and technologies*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33.
5. Chukhlanov V.Yu. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva sferoplastikov na osnove polykh steklyannykh mikrosfer i poliakrilovogo svyazuyushchego [Physical and mechanical properties of sphereplastics on the basis of hollow glass microspheres and polyacrylic bonding adhesive]. *Butlerov Communications*, 2017, vol. 50, no. 6, p. 141–145.
6. Chukhlanov V.Y., Selivanov O.G. Thermophysical properties of syntactic plastic foams based on polydimethylsiloxane binder. *International Polymer Science and Technology*, 2016, vol. 43, no. 3, pp. 39–42.
7. Kablov E.N., Demonis I.M., Zikov D.K. “Dospexhi” dlya “Burana”. Materialy i tekhnologii “VIAM” dlya MKS “Energiya-Buran” [“Armour for Buran”. Materials and technologies of “VIAM” (All-Russian Research Institute of Aviation Materials) for reusable spacecraft “Energia Buran”]. *Nauka i zhizn*. Moscow, 2013, 172 p.
8. Kaverin V.A., et al. Sposob vypolneniya teplozashchitnogo pokrytiya aerodinamicheskoy poverkhnosti letatel'nogo apparata [Execution method of thermal protection coating of aircraft aerofoil]. Patent RF No. 2669147, no. 201727411, published on 08.10.2018. (in Russian)

9. Bondaletova L.I. Polimernyye kompozitsionnyye materialy (chast 1): uchebnoye posobiye [Polymer composite materials (part 1)]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2013, 118 p. (in Russian)

10. Lapitskiy V.A., et al. Epoksidnaya kompozitsiya [Epoxy composition]. Authorship certificate No. 749869 USSR, published in bulletin of inventions, 1980, no. 27. (in Russian)

11. Panina N.N., et al. Epoksidnaya kompozitsiya kholodnogo otverzhdeniya [Epoxy composition for cold curing]. Patent RF No. RU2479601C1, No. RU2012107988/04A, published on 20.04.2013. (in Russian)

12. Nikolaeva N.P., et al. Epoksiuretanovyy zalivochnyy kompaund [Epoxy-urethane potting compound]. Patent RF No. RU2545308C2, No. RU2013131713/05A, published on 27.03.2015. (in Russian)

13. Kostochko A.V. Spetsialnyye polimery i kompozitsii. Izbrannyye stati [Special polymers and compositions. Selected papers]. Kazan, 1999, 224 p. (in Russian)

14. Sytina M.A., Gurdzhi F.M. Sposob otverzhdeniya epoksidnykh smol [Epoxy curing ways]. Authorship certificate No. 150622 USSR, published in bulletin of inventions, 1967, no. 9, 32 p. (in Russian)

15. Pliev T.N. Molekulyarnaya spektroskopiya: v 5-ti tomakh [Molecular spectroscopy: in 5 volumes]. Vladikavkaz, Iriston Publ., 2002, vol. 4, 758 p. (in Russian)

#### **Об авторе**

**Марамыгин Александр Викторович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Вычислительная математика и механика» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: a-maramygin@pzmash.perm.ru).

#### **About the author**

**Alexandr V. Maramygin** (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Computational Mathematics and Mechanics Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: a-maramygin@pzmash.perm.ru).

Получено 24.11.2020