

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

М.Г. Долматовский, И.И. Соколов

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ СО СФЕРОПЛАСТИКАМИ

Один из видов полимерных композиционных материалов, называемый сферопластиками, используется в качестве заполнителя трехслойных сотовых конструкций, которые нашли широкое распространение в различных отраслях промышленности, прежде всего в изделиях авиационной техники.

Ключевые слова: сферопластики, сотовые конструкции.

Авиационные полимерные сферопластики, разработанные в ВИАМ [1, 2], – легкие композиции плотностью $0,5\text{--}0,7\text{ г/см}^3$, соответствующие требованиям ИКАО по пожаробезопасности, на основе, как правило, эпоксидных и фенольных связующих, основным компонентом которых являются полые стеклянные микросферы.

В связи с наметившимся в последнее время расширением объема применения этих материалов в РФ (тонны) и разнообразием конструктивных решений для сотовых панелей интерьера пассажирских самолетов, летательных аппаратов космического назначения, при ремонте поврежденных участков различных перегородок, заполнении пустот с целью защиты от коррозии и т. п., возникает необходимость достаточно корректного подбора соответствующих марок сферопластиков для указанных вариантов, исходя из классического положения: состав – свойства.

В данной работе приведены результаты исследований и статических испытаний образцов сотовых панелей на вырыв наиболее распространенных видов закладных деталей – крепежных втулок, установленных (смонтированных) с использованием сферопластиков ВПЗ-7М, -10, -14 и некоторых марок зарубежных сферопластиков.

Разработкой и производством полимерных сферопластиков для авиастроения занимаются как в России, так и в ряде зарубежных стран. В частности, фирмы «3М Со.» и «American Cyanamid Co.» (США) выпускают легкие полимерные композиции с наполнителями в виде полых стеклянных микросфер для применения в сотовых конструкциях. Композиции отверждаются при комнатной или повышенной температурах и отличаются по физико-механическим и специальным свойствам.

Например, сферопластик фирмы «3М Со.», выпускаемый под маркой ЕС-3524 В/А, представляет собой пастообразную композицию с жизнеспособностью ~2 ч, отверждающуюся без нагрева в течение 16–24 ч, с плотностью после отверждения $0,47\text{--}0,50\text{ г/см}^3$ и прочностью при сжатии 15,5 МПа, и предназначен для заделки торцев сотовых панелей и заполнения пустот.

Сферопластик Araldite 255 (известный также под маркой Redux 255), предлагаемый фирмой «Huntsman Advance Materials» (Швейцария) в виде двух компонентов, представляет собой пастообразную композицию зеленого цвета с жизнеспособностью ~1 ч (навеска массой 100 г при 25°C), отверждающуюся без нагрева в течение ~16 ч, или 2 ч при 70°C , с плотностью после отверждения $0,65\text{ г/см}^3$, прочностью при сжатии 30 МПа, и предназначен для заполнения кромок сотовых конструкций, различных полостей, щелей и т. п.

Близкими к указанному сферопластику по составу и свойствам являются также Araldite 252 В/А (голубого цвета), ЕС 612 В/А и ЕС 662 В/А, разработанные европейской фирмой «Euro Composite», и др.

В отечественном авиастроении приоритет в области создания сферопластиков традиционно принадлежит ФГУП «ВИАМ». Разработанные в институте сферопластики ВПЗ-7М, ВПЗ-14 (модифицированный ВПЗ-5) представляют собой полимерные композиции на основе эпоксидных связующих, а ВПЗ-9, ВПЗ-10 – на основе фенольных связующих, включающие полые стеклянные микросферы и различные порошкообразные наполнители. Эти сферопластики отверждаются при комнатной (ВПЗ-7М, -9, -10) или повышенной температурах (ВПЗ-14). Основные свойства сферопластиков, получивших наибольшее распространение в авиационной промышленности, представлены в таблице.

Основные свойства отечественных сферопластиков

Показатель	Значения показателей для материалов		
	ВПЗ-7М	ВПЗ-10	ВПЗ-14
Внешний вид, консистенция	Однородная пастообразная композиция светло-зеленого цвета	Однородная пастообразная композиция светло-бежевого цвета	Однородная пастообразная композиция светло-коричневого цвета
Количество входящих компонентов	6	4	5
Жизнеспособность при 18±3°С, ч (не менее)	2	1	4
Плотность, г/см ³	0,57–0,61	0,62–0,64	0,65–0,75
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа (не менее)	40	35	35
Горючесть, группа	2 г; самозатухающий	1 г; трудногорящий	2 г; самозатухающий
Показатель рН водной вытяжки	6,6–7,1	7,56	6,6–7,5

Имеются сведения о том, что в качестве альтернативы сферопластикам отдельные предприятия пытаются применять эпоксидный пенокомпануд марки ПЭК-74, предназначенный для выравнивания дефектных поверхностей с нанесенной ТИ, изготовления сотовых конструкций, склеивания деталей из металлов и неметаллов с большими знакопеременными нагрузками. ПЭК-74 готовится и отверждается при 15–35°С не менее 48 ч. В отвержденном состоянии представляет собой пенопласт замкнутоячеистой структуры с плотностью ≤0,5 г/см³, прочностью при сжатии ≥10 МПа.

Следует обратить особое внимание на методические особенности определения некоторых основных свойств сферопластиков. Так, согласно патенту США WO 99/57182 «Ероху – syntactic foam – insulated pipes» 1999 г. рекомендовано придерживаться:

- ASTM D 695-96 «Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics». – Сжатие. Размеры образца-параллелепипеда 12,7×12,7×25,4 мм (*H*), или ∅12,7×25,4 мм;
- ASTM D 790-96a «Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Materials». – Изгиб. Размеры образца-полоски 127 (*L*)×12,7 (*B*)×3,2 мм (*H*);
- ASTM D 638-96 «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics». – Растяжение. Гантелеобразные образцы армированных и неармированных пластиков толщиной ≤14 мм.

Для надлежащей оценки возможности использования в конструктивных элементах с закладными деталями того или иного сферопластика общепринято проводить, в первую очередь, сравнение по прочности ($\sigma_{p,c}$) и удельной прочности ($\sigma_{p,c}/d$, км) при сжатии ($\sigma_{p,c}$ – разрушающее напряжение при сжатии).

Однако до сих пор применительно к полимерным сферопластикам авиационного назначения нет устоявшегося мнения о форме, типоразмерах образцов, условиях нагружения и

т. п. Так, фирмы «Huntsman», «3М», «Boeing» [3], ссылаясь на ASTM D 695-96, полагают целесообразным проводить испытания образцов сферопластиков на сжатие в виде параллелепипедов или цилиндров, полученных механическим путем из предварительно изготовленных и отвержденных блоков, а разработчики пенокомпозита ПЭК-74 – в виде образцов-кубиков с длиной ребра 30 мм.

В материалах первой международной конференции по сферопластикам и пенопластам, состоявшейся в 2004 г. в канадском городе Banff, и в ряде других публикаций методике испытаний и особенностям разрушения образцов сферопластиков при сжатии также уделяется большое внимание [4].

Так, предлагается подвергать испытаниям образцы-цилиндры $\varnothing 40$ мм, высотой $H=80$ мм [5]; кубики с ребром 25,4 мм [6]; призмы высотой 25,4 мм и основанием 25,4×12,5 мм [7], высотой 15 мм и основанием 5×8 мм [8], высотой 25,4 мм и $\varnothing 26,1$ мм [9], высотой 10 мм и основанием от 11×11 мм до 25×25 мм [10].

Отечественный ГОСТ 4651 «Пластмассы. Метод испытаний на сжатие» рекомендует для пластмасс с модулями упругости $<1 \cdot 10^4$ кгс/см² ($<10^3$ МПа) испытывать образцы-параллелепипеды с квадратным основанием 10×10 мм и высотой (H) 15 мм или цилиндры $\varnothing 10$ мм и высотой (H) 15 мм.

Анализируя приведенные данные, следует сделать вывод о возможной сопоставимости показателей свойств отечественных и зарубежных сферопластиков при сжатии, полученных при испытаниях образцов-параллелепипедов с размерами основания (12,5–13)×(12,5–13) и высотой 18–25 мм (т. е. 1,5–2,0 от размера стороны основания).

В ВИАМ (см. таблицу) испытания сферопластиков на сжатие проводятся на образцах-параллелепипедах указанных размеров.

По мнению ряда ведущих зарубежных («Boeing») и отечественных КБ (ОАО «АК им. С.В. Ильюшина, ОАО «Туполев»), наряду с определением показателей физико-механических свойств сферопластиков (сжатие), для оценки эксплуатационной работоспособности целесообразно проводить также испытания на «вырыв» несложных конструктивных элементов, в частности втулок, устанавливаемых в сотовых панелях с использованием сферопластиков.

Следует иметь в виду при этом, что в РФ специализированные методики испытаний сферопластиков в составе конструктивных сотовых элементов отсутствуют. Но имеют место весьма разнообразные подходы как к конструкции и материалам закладных втулок, так и к технологическим особенностям оформления таких элементов.

Итак, применяются три основных варианта фиксации втулок в сотовых панелях – в зависимости от их назначения (крепление исследовательского оборудования, силовой крепеж, резьбовые, болтовые соединения деталей и др.), конструктивных особенностей изделия и специфики производства:

- заполнение участка сотовой панели сферопластиком, отверждение сферопластика, механическая обработка (сверление или фрезерование с целью образования пустотелого объема), вклеивание втулки, например с помощью клея ВК-9 (вариант №1);
- удаление объема сотового заполнителя из заданного участка, заполнение его сферопластиком, установка втулки, отверждение сферопластика (вариант №2);
- удаление объема сотового заполнителя, установка и фиксация втулки, введение (шприцевание) сферопластика и его отверждение (вариант №3).

На рис. 1 приведены схемы испытаний на «вырыв» и «скручивание» втулок, установленных по варианту №2 на участках сотовых панелей, заполненных сферопластиками ВПЗ-7М, -10, -14 (так называемые зоны «сотосферопластика»), использованные авторами на основании аналогичных схем фирмы «Boeing».

На рис. 2 представлены некоторые наиболее часто используемые в сотовых панелях втулки, а на рис. 3 – результаты их испытаний на «вырыв» из зоны «сотосферопластика».

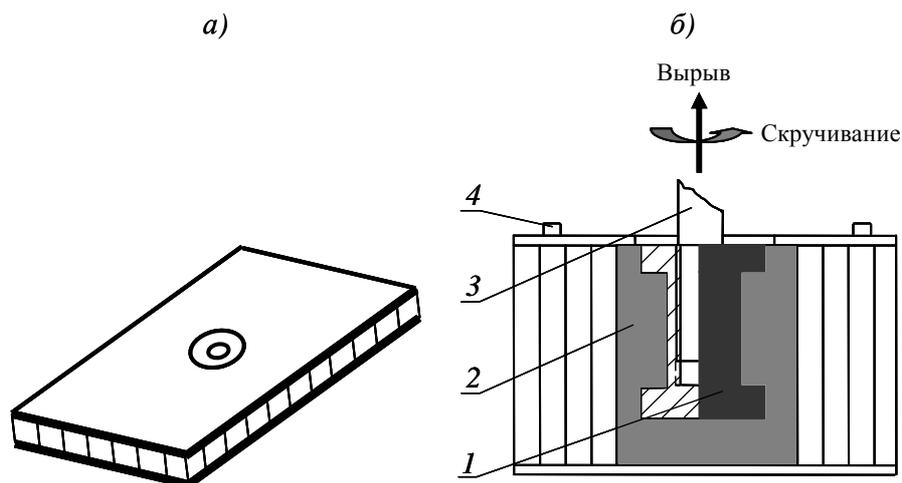


Рис. 1. Схема испытаний закладных элементов – металлических втулок – на «вырыв» из сотовой панели:

a – участок сотовой панели с установленной втулкой (ширина панели 60 мм, расстояние от края панели до отверстия 30 мм, между соседними отверстиями 60 мм); *б* – участок сотовой панели с установленной втулкой в разрезе: 1 – втулка; 2 – сферопластик; 3 – тяга; 4 – опорное кольцо

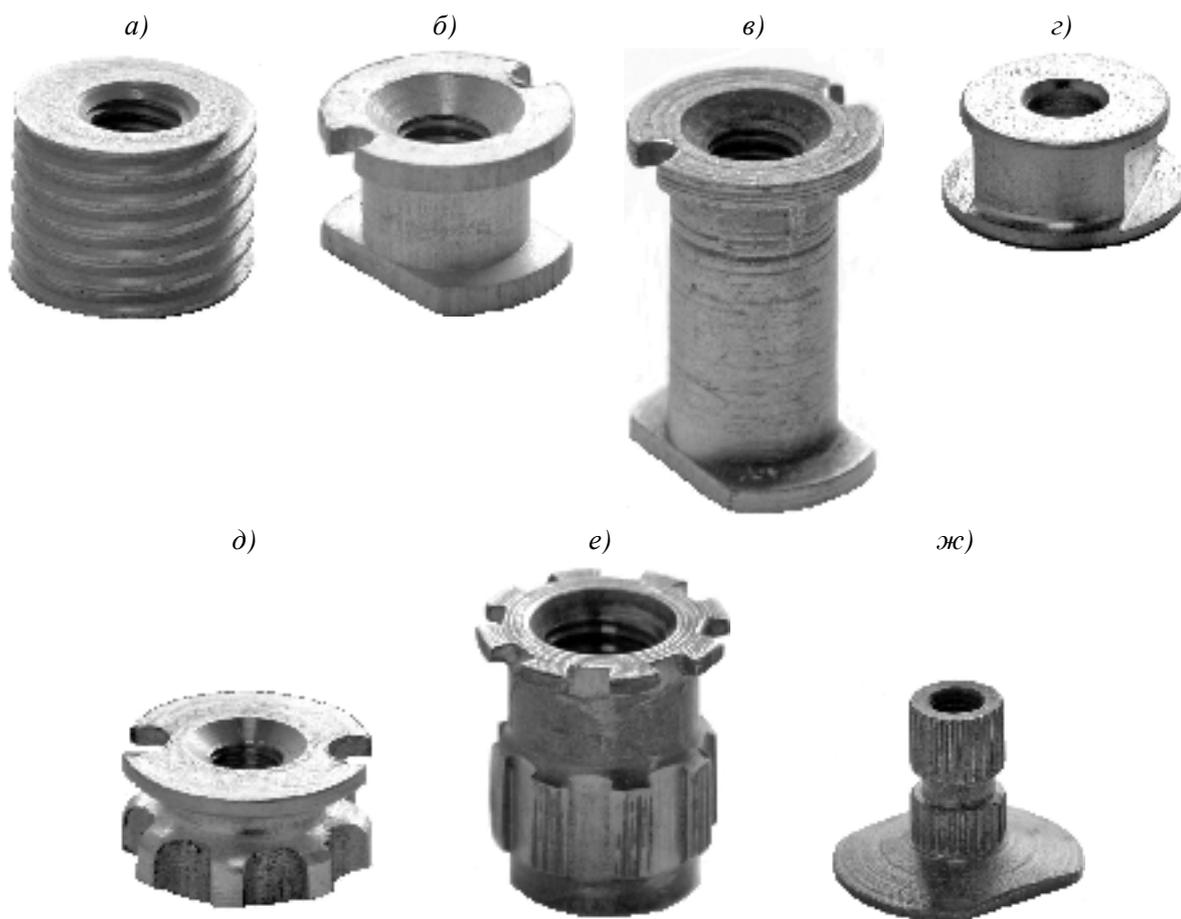


Рис. 2. Типовые закладные элементы – втулки, устанавливаемые в сотовые панели:
a – втулка $\varnothing 12$ мм, высотой (H) 9 мм; *б* – $\varnothing 8$ мм, $H=10$ мм; *в* – $\varnothing 8$ мм, $H=18$ мм;
г-ж – втулки сложной формы $H=6-18$ мм

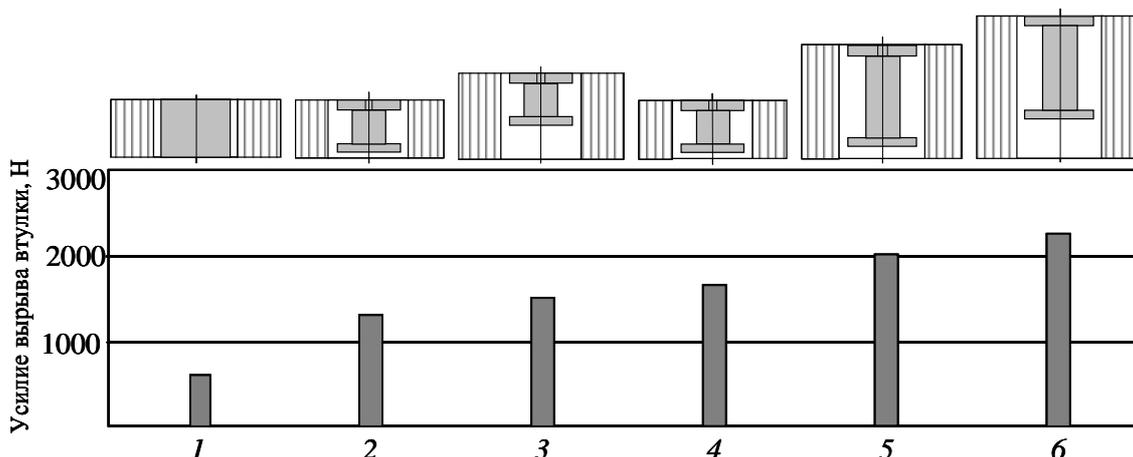


Рис. 3. Изменение усилия вырыва втулок в зависимости от их типоразмеров и марки сферопластика:

1 – на клее ВК-9; 2, 3, 5 – ВПЗ-10; 4, 6 – ВПЗ-7М, ВПЗ-14

Необходимо отметить три принципиальных, по мнению авторов, момента, связанных с показателями усилия «вырыва»:

– разрушающая нагрузка при скручивании практически не зависит от типа сферопластика (ВПЗ-7М, -10, -14), типоразмера и материала втулки и составила 11–13,8 Н·м. При этом происходило разрушение (срез) винтового индентора (М4, М5);

– между нижним торцом втулки и внутренней поверхностью обшивки сотовой панели должен быть слой сферопластика толщиной не менее 0,5 мм, поскольку усилие вырыва существенно зависит от прочности связи между материалами втулки и обшивки. Так, прочность при отрыве $\sigma_{отр}$ (ГОСТ 14760) соединения сталь–стеклопластик в слое сферопластика толщиной 1–2 мм при 20°C составляет:

Материал	$\sigma_{отр}$, МПа
ВПЗ-7М	9–20
ВПЗ-10	3–5
ВПЗ-14	8–16
Araldite 255	11–18;

– диаметр зоны (участка) заполнения сферопластиком подготовленного объема в сотовой панели должен составлять не менее 2,5–3,0 диаметров цилиндрической части втулки.

Таким образом, разрушающая нагрузка – величина силы «вырыва» втулки на момент страгивания – составила:

- при использовании клея ВК-9 (см. рис. 2, а) ≤ 600 Н;
- при использовании ВПЗ-10 (см. рис. 2, б, в) ≤ 1300 – 2000 Н;
- при использовании ВПЗ-7М (см. рис. 2, б, в) ≤ 1500 – 2250 Н;
- при использовании ВПЗ-14 (см. рис. 2, б, в) ≤ 2100 – 2250 Н.

На рис. 4, а представлены элементы сотовых панелей из алюминиевого сплава (соты АМг2Н высотой 15 мм с ячейкой 3,5 мм), на рис. 4, б – из стеклопластика (соты ССП высотой 15 мм с ячейкой 2,5 мм) после испытания на «вырыв» закладного элемента.

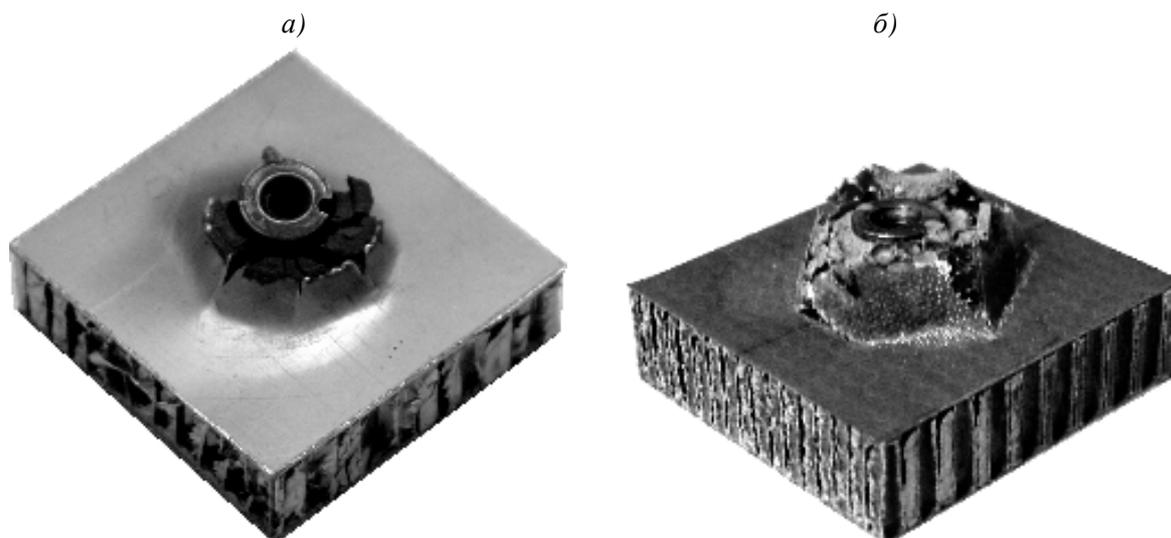


Рис. 4. Внешний вид образцов сотовых панелей после испытаний на «вырыв»:
а – соты АМг2Н (высота 15 мм, ячейка 3,5 мм); *б* – соты ССП (высота 15 мм, ячейка 2,5 мм)

По результатам проведенных исследований сферопластики ВПЗ-7М, -10, -14 рекомендованы для применения в составе сотовых панелей интерьера пассажирских самолетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов И.И., Долматовский М.Г., Деев И.С., Стеценко В.Я. Влияние физико-механических характеристик полых стеклянных микросфер на свойства сферопластиков //Пластические массы, 2005, №7, с. 16–18.
2. Соколов И.И., Долматовский М.Г. Сферопластики //Полимерные материалы, 2005, №9, с. 20–21.
3. Boeing Material Specification. Honeycomb edge filling and potting compound. 1987.
4. Syntactic and Composite Foams I. Engineering Conference International (ECI). August 1–6, 2004, Banff, Alberta (Canada).
5. Palumbo M., Tempesti E. On the nodular morphology and mechanical behavior of syntactic foam cured in thermal and microwave fields //Acta Polym., 1998, №49, p. 482–486.
6. Gupta N., Woldesenbet E. Compressive fracture feature of syntactic foams – microscopic examination //J. of Materials Science, 2002, №37, p. 3199–3209.
7. Jadhav A. Effect of density and strain rate on properties of syntactic foams //J. of Materials Science, 2005, №40, p. 4009–4017.
8. Fine T., Sautereav H. Innovative processing and mechanical properties of high temperature syntactic foams based on a thermoplastic/thermoset matrix //J. of Materials Science, 2003, №38, p. 2709–2716.
9. Gladysz G.M. Three-phase syntactic foams: structure property relationships //J. of Materials Science, 2006, №41, p. 4085–4092.
10. Sankaran S. Studies on compressive failure features in syntactic foam material //J. of Materials Science, 2001, №36, p. 4485–4491.