

УДК 678.06:621.64

ВЫБОР ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ БЕЗЛЕЙНЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Илья Александрович Евсюков

*Научный руководитель: А.В. Егоров,
доктор наук, профессор, кафедра "Космические аппараты и ракеты-носители"*

Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) с термопластичной матрицей в корпусных конструкциях изделий ракетной техники открывает новые пути её совершенствования. Такие ПКМ дают выигрыш по массе оболочки баков до 40% в сравнении с алюминиевыми сплавами, а также обладают лучшими герметичностью, ремонтпригодностью и экологичностью, чем композиции с реактопластичным связующим.

Полимер, применяемый в качестве матрицы для безлейнерного композитного бака криогенного ракетного топлива, должен отвечать следующим требованиям: повышенные прочностные и жесткостные свойства, сохраняющиеся в интервале температур от $-260...-180$ °С до $150...220$ °С, высокое удлинение при разрыве, низкие гигроскопичность и плотность, высокая трещиностойкость, близкий с наполнителем КЛТР ($-5 - 10 \cdot 10^{-6}$ 1/град), приемлемая обрабатываемость и наличие отечественной сырьевой базы.

Результаты анализа свойств существующих групп термопластичных соединений, сохраняющих работоспособность при криогенных температурах, представлены в Таблице 1 [1-4]. Рассматриваемые полимеры: полиарилат (ПАР), полибензоксазол (ПБО), полиимид (ПИ), полисульфон (ПСФ), фенилон (ФН), фторопласт (ФТ), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК).

Таблица 1. Свойства термопластичных ПКМ

ПКМ	T_{xp}/T_B , °С	$\sigma_B^+/\sigma_B^-/\sigma_{ви}$, МПа	$E_B^+/E_B^-/E_{ви}$, ГПа	ε , %	КЛТР, 10^{-6} °С ⁻¹	V_{24} , %	ρ , кг/м ³
ПАР	-200/200	70-77/97/80-105	1.8/2.1/2.3	10	62	0.25-0.26	1210
ПБО	-250/260	70/220/100	2.3-4.3/-/3.5-3.8	3-12	-	-	1300
ПИ	-200/280	110/192-280/150-200	3.5-4.9/-/3.1-4.9	> 100	40-60	0.20-0.23	1420
ПСФ	-100/190	55-60/97/107	2.5/2.6/2.7	>30	56	0.20-0.30	1245
ФН ¹	-100/280	145/220-240/150-170	4.0-4.4/3.1/-	4-6	30-35	0.30-0.40	1325
ФТ	-269/260	34-49/49/41-49	1.0-1.6/1.2-1.5/1.4	> 50	60-120	< 0.01	2200
ПЭЭК ²	-/ < 260	96/-/100-169	3.4/-/4.1	5-100	26 – 50	0.5	1320

Примечания:

1. существующие исследования подтверждают работоспособность фенилона при температуре жидкого азота;
2. баки из углеволокна и ПЭЭК проходят испытания на фирме Boeing [5];
3. повышение теплостойкости ПКМ при введении наполнителя не учитывается;
4. T_{xp} – температура хрупкости при изгибе, T_B – теплостойкость по Вика, V_{24} – влагопоглощение за 24 часа.

Выводы:

1. Полиимид и полиэфирэфиркетон обладают характеристиками, наиболее полно отвечающими поставленным требованиям. Ввиду высокой температуры переработки изготовление конечного изделия предпочтительно из полуфабрикатов. Помимо этого, необходимо уточнение ряда свойств реально располагаемых сортов ПЭЭК ввиду широкого диапазона их значений для данного класса полимеров.

2. Использование в качестве матричного материала фенилона и полибензоксазола рассматривается при условии подтверждения их свойств. Прочность фенилона при криогенной температуре требует подтверждения, полибензоксазол обладает меньшей прочностью, чем материалы, представленные в пп.1,2, при этом он столь же сложен в обработке, а часть достоверных данных о его свойствах отсутствует.

3. Полиарилат и полисульфон проигрывают перечисленным выше полимерам по прочности и жёсткости, однако значительно более технологичны из-за более низкой температуры переработки. Возможно также рассмотрение после соответствующих испытаний полиэфирсульфона, обладающего лучшей прочностью, не подтверждённой на текущий момент при криогенных температурах.

4. Благодаря уникальному набору свойств, фторопласт может быть применён в качестве внутреннего покрытия бака, играя роль герметизирующего (благодаря хладотекучести) и изолирующего (благодаря стойкости к окислителям и малой гигроскопичности) слоя.

5. Таким образом, наиболее перспективным выглядит план испытаний материалов на соответствие поставленной задаче в порядке, соответствующем пп.1-3, где меньший номер означает больший приоритет.

Литература

1. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий: Справ. изд. Л.: Химия, 1987. 416 с.
2. Бюллер К.-У. Тепло- и термостойкие полимеры; Пер. с нем./ под ред. Я.С. Выгодского. – М.: Химия, 1984 – 1056 с., ил.
3. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. –СПб.: Профессия, 2006. – 624 с., ил. ISBN 5-93913-104-2.
4. Polyetheretherketone. ScienceDirect.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polyetheretherketone>. Дата обращения: 15.03.2025 г.
5. K. Doyle, A. Doyle, C.M. O Bradaigh, D. Jaredson (2012), “Feasibility of carbon fibre/peek composites for cryogenic fuel tank applications”, Proceeding of 12th European Conference on Space Structures, materials & Environmental Testing, Noordwijk, 20 - 23 March 2012.