

Севашко Евгения Александровна, инженер-технолог I категории,

АО «НПО Лавочкина», г. Химки

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Аннотация: В статье рассматриваются возможности применения полимерных композитных материалов в космической технике. Анализируются структурные особенности полимерных композитных материалов, приводится их классификация. Рассматриваются характеристики полимерных композитных материалов, свойства матриц и наполнителей, используемых в космической технике. Выявляются актуальные задачи развития полимерных композитных материалов в космической технике.

Ключевые слова: полимерные композитные материалы, матрица, наполнитель, эксплуатационные характеристики, космическая техника.

Annotation: The article discusses the possibilities of using polymer composite materials in space technology. Structural features of polymer composite materials are analyzed and their classification is given. The characteristics of polymer composite materials, the properties of matrices and fillers used in space technology are considered. The actual problems of the development of polymer composite materials in space technology are revealed.

Keywords: polymer composite materials, matrix, filler, operational characteristics, space technology.

Стремительное развитие полимерных композитных материалов (далее – ПКМ), обусловленное их свойствами и аномальными особенностями поведения, сделало их неотъемлемой частью космической техники [1]. В составе

космических конструкций происходит сдвиг процентного соотношения используемых металлических и ПКМ в сторону увеличения последних. Это связано с возможностью адаптации жёсткости и прочности композитов, их лучшим отношением жёсткости к массе по сравнению с традиционными сплавами, термоупругой устойчивостью и функционализацией к конкретному приложению [2]. Именно последнее свойство, означающее способность иметь совокупность параметров, которые необходимы и достаточны для решения конкретной узкой задачи, делает ПКМ универсальными и позволяет широко использовать их в космической технике.

Целью работы является изучение возможностей применения ПКМ в космической технике. Для её достижения были использованы аналитический, синтетический, индуктивный и дедуктивный методы обработки тематических исследований, научных публикаций и релевантных литературных источников.

Композитными называются материалы, в которых сочетаются две или более химически разнородные фазы с чёткой границей раздела [3]. Композиты гетерогенны по химическому составу и структуре, характеризуются совокупностью свойств, которые не присущи каждому отдельному компоненту, входящему в их состав. Выделяют аддитивные композиты, в которых достигается благоприятное сочетание положительных свойств входящих в состав компонентов, и синергические композиты, которые проявляют экстремально высокие показатели свойств, что связано с реализацией определённых физических эффектов, проявляющихся на границе раздела химически разнородных фаз.

Структурно композиты состоят из матрицы, содержащей в своём объёме упрочняющую фазу или армирующие элементы – наполнитель. Матрица и наполнитель разделены границей раздела. Объёмная доля матричного материала в любых композитах составляет не менее 50 %. Наполнитель, обладающий заданной пространственной ориентацией, равномерно распределяется в матричном объёме.

Несмотря на высокое разнообразие строения композитов, большую часть

из них можно разделить на три группы [4]:

1. Слоистые. Их структура представлена чередующимися армирующими и матричными слоями. Объёмная доля слоёв наполнителя меньше и задаётся соотношением толщин обоих типов слоёв.

2. Волокнистые. В них волокна в матрице могут располагаться направленно или хаотично. В случае направленного армирования волокна укладываются с заданным шагом, в случае хаотичного – расстояния между соседними отрезками волокон зависят от их объёмного содержания.

3. Дисперсно-армированные. В них дисперсные включения равномерно распределены по объёму матрицы, а расстояния между соседними частицами зависят от их объёмной доли.

В космической технике к материалам предъявляются повышенные требования к жёсткости и весовой эффективности – сочетанию малого веса и высоких прочностных характеристик [5]. Весовая эффективность зависит от удельной прочности и удельной жёсткости, показатели которых имеют наибольшее значение в ПКМ, матрица которых выполнена из эпоксидной смолы, а наполнитель – волокон бора или углерода. При увеличении модуля упругости армирующих волокон возможно сокращение массы изделий, что имеет большое значение для каркасов корпусов искусственных спутников Земли, несущих рамных конструкций широкоформатных орбитальных систем, скелетных конструкций солнечных батарей, антенных блоков и других конструкций и элементов космической техники.

Углеродные волокна отличаются лёгкостью и обеспечивают высокие показатели жёсткости и прочности [6]. Полимерная матрица связывает армированные волокна, перераспределяет нагрузки на них и защищает от агрессивного воздействия космической среды. Высокое распространение углеродных ПКМ обусловлено их малой плотностью при высоких технических и эксплуатационных характеристиках, которые не только не уступают, но и превосходят металлические сплавы.

В отечественной космической технике получают распространение

углепластики на основе клеевых препрегов [7]. Их использование обеспечивает длительный ресурс конструкций, сокращение их веса на 30–50 % и трудоёмкости производства в 1,5 раза, увеличение герметичности в 10 раз и трещиностойкости на 40–60 %.

Преимущественное использование матриц из эпоксидных смол в композитах, создаваемых для космической промышленности, обусловлено их следующими свойствами [8]:

- высокая смачивающая способность и адгезия с большинством видов волокон;
- отсутствие выделения побочных продуктов в процессе отверждения, что позволяет получать монолитные ПКМ с малой пористостью;
- низкая усадка при отверждении;
- химическая стойкость, высокие физико-механические свойства и диэлектрические характеристики;
- хорошая сочетаемость с большинством смол, позволяющая модифицировать и улучшать свойства материалов;
- разнообразие и доступность смол и отвердителей, позволяющие получать материалы с разнообразным сочетанием свойств, которые удовлетворяют различным эксплуатационным и технологическим требованиям.

При выборе компонентов полимерных матриц для ПКМ, использующихся в космической технике, исходят из значений параметров, приведённых в табл. 1.

Таблица 1. Свойства полимерных матриц [9]

Свойства	Значения свойств для полимеров					
	Эпоксидные смолы	Фенольные смолы	Эластифицированные БМИ	Циановые эфиры	Фенолтриазиновые смолы	Полибензоксазины
Плотность, г/см ³	1,2–1,25	1,24–1,32	1,2–1,3	1,1–1,35	1,25	1,19
Максимальная рабочая температура, °С	180	200	~200	150–200	300	130–280
Предел	90–120	24–45	50–90	70–130	42	100–125

прочности при растяжении, МПа						
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,1–3,8	3–5	3,5–4,5	3,1–3,4	4,1	3,8–4,5
Относительное удлинение, %	3–4,3	0,3	3	2–4	2	2,3–2,9
Диэлектрическая постоянная (при частоте $f = 1$ МГц)	3,8–4,5	4–1	3,4–3,7	2,7–3,0	3,1	3–3,5
Температура отверждения, °С	(20±3)–180	150–190	220–300	180–250	177–316	160–220
Усадка при отверждении, %	>3	0,002	0,007	~3	~3	~0
Температура начала деструкции, °С	260–340	300–360	360–400	400–420	410–450	380–400
Температура стеклования, °С	150–220	170	230–380	250–290	300–400	170–340
G_{1c} , Дж/м ²	54–230	760	160–250	До 786	120	70–300
K_{Ic} , МПа√м	0,6	1,01	0,85	0,3–1,45	0,2–0,3	0,6–1,1

Актуальной задачей при создании космической техники является поиск ПКМ, в которых свойства высокопрочных армирующих волокон использовались бы в максимальной мере [10]. Одним из решений является создание композитных конструкций с сетчатой структурой, которая значительно отличается от традиционных обшивочных конструкций по способу восприятия основных внешних нагрузок. Такие ПКМ позволяют обеспечить более высокий уровень нагружения углеродных волокон благодаря восприятию внешних нагрузок за счёт сжатия и растяжения рёбер в направлении укладки волокна. В результате достигается значительное увеличение прочности и надёжности конструкции при снижении её массы [11].

Несмотря на высокие эксплуатационные свойства ПКМ и возможность получения изделий сложной формы с высокими рабочими характеристиками, композитные конструкции отличаются существенной неоднородностью структуры и физико-механических свойств компонентов [12]. Эти факторы оказывают значительное воздействие на процессы зарождения и накопления повреждений композитов, вследствие чего снижаются прочность, жёсткость и

размерная стабильность конструкций. Для оценки роли неоднородности решаются расчётно-экспериментальные задачи по анализу напряженно-деформированных состояний, характера и степеней повреждённости и условий её наступления. Решение данных задач позволяет совершенствовать ПКМ и улучшать показатели космической техники.

Таким образом, благодаря таким свойствам ПКМ, как низкое водопоглощение, высокие удельная прочность, температура стеклования, модуль упругости, термостойкость, электроизоляционные свойства и антифрикционные характеристики, малый вес, коррозионная стойкость и устойчивость к воздействию окружающей среды, они широко используются практически во всех элементах космических аппаратов: в высокотемпературных компонентах сопел ракет, твердотопливных ракетных двигателях, аппаратах высокого давления, предназначенных для хранения газа и топлива, и секциях межступенчатого разгонного блока. ПКМ применяются также на орбитальных космических аппаратах для создания сэндвич-панелей с сотовым наполнителем, которые выступают опорой для приборов и других грузов, в радиочастотных отражателях, развёртываемых головных обтекателях и подложках солнечных батарей. Дальнейшее совершенствование ПКМ позволит повысить функциональные и эксплуатационные характеристики космической техники.

Библиографический список:

1. Гладков С.О. Физика композитов: учебник для вузов / С.О. Гладков. – 2-е изд. – М.: Изд-во Юрайт, 2023. – 332 с.
2. Семенуха О.В., Воронина С.Ю. Перспективные полимерные материалы для мембранных рефлекторов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, посвящённой Дню космонавтики / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. – 2020. – С. 354-355.
3. Композиционные материалы: учеб. пособие для вузов / Д.А. Иванов, А.И. Ситников, С.Д. Шляпин; под ред. А.А. Ильина. – М.: Изд-во Юрайт, 2023.

– 253 с.

4. Аннин Б.Д. Механика композитов: учеб. пособие для СПО / Б.Д. Аннин, Е.В. Карпов. – 2-е изд. – М.: Изд-во Юрайт, 2023. – 85 с.

5. Маркин В.Б. Конструкции из композиционных материалов: учеб. пособие. – Барнаул: АлтГТУ, 2022. – 253 с.

6. Токарева М.И., Ширяев М.И. Проблемы применения композиционных материалов при разработке ферменных конструкций двигательных установок // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – № 1 (85). – С. 89-99. – DOI: 10.18698/2308-6033-2019-1-1840.

7. Тимошков П.Н. Препреги на основе расплавных связующих и ПКМ нового поколения на их основе для изделий авиационной техники / П.Н. Тимошков, А.С. Колобков, А.О. Курносков, В.А. Гончаров // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: сборник докладов V всероссийской научно-технической конференции. – М., 2021. – С. 7-20.

8. Кулик В.И. Связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019. – 52 с.

9. Долгова Е.В., Лаврова К.С. Применение материалов на основе циановых эфиров (обзор). Часть 1. Авиационная и космическая техника // Труды ВИАМ. – 2021. – № 4 (98). – С. 48-60. – DOI: 10.18577/2307-6046-2021 -0-4-48-60.

10. Кондаков И.О. Исследование статической и ударной прочности сетчатых композитных конструкций фюзеляжа: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.03 / Иван Олегович Кондаков; Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. – Жуковский, 2020. – 138 с.

11. Склезнев А.А., Червяков А.А., Агапов И.Г. Решение задачи оптимизации в целях проектирования сетчатой структуры из полимерных композиционных материалов с наружной обшивкой // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 70-82. – DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-4-70-82.

12. Москвичев В.В. Расчётно-экспериментальная оценка прочности и

предельных состояний композитных конструкций космических аппаратов / В.В. Москвичев, А.М. Лепихин, А.Е. Буров, С.В. Доронин, Е.В. Москвичев // Космические аппараты и технологии. – 2019. – Т. 3, № 3 (29). – С. 140-148. – DOI: 10.26732/2618-7957-2019-3-140-148.