

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 539.2-022.532

РАЗРАБОТКА НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2022 г. И. А. Зайцев^{1,*}, М. С. Спирин¹, Е. И. Москвитина¹

¹ Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_otd2@mil.ru

Поступила в редакцию 15.03.2022 г.

После доработки 20.03.2022 г.

Принята к публикации 20.03.2022 г.

Представлено современное состояние использования композиционных материалов в авиастроении, проанализирована актуальность использования углеродных наноматериалов в качестве наполнителей полимерных матриц и обусловлена значимость модифицирования нанонаполнителя для улучшения уже имеющихся характеристик и придания новых функциональных возможностей. Теоретически и экспериментально доказана возможность создания многофункционального полимерного нанокompозита, модифицированного углеродными наноматериалами, для повышения комбинированной защиты беспилотных летательных аппаратов, непосредственно участвующих в боевых действиях.

DOI: 10.56304/S2782375X22040155

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве отраслей человеческой деятельности так или иначе используются дроны [1], и сегодня трудно представить вооруженные силы любой страны мира без использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Вооруженные силы используют БПЛА для круглосуточной охраны объектов, патрулирования территории, сопровождения колонн и даже доставки малогабаритных срочных грузов в труднодоступные районы боевых действий [2].

При выполнении поставленных задач дрон, оказавшись непосредственно на поле боя, имеет высокую вероятность быть замеченным и выведенным из строя. Поэтому появилась потребность в установке на борту БПЛА не только фотоаппаратуры, но и высококачественной видеоаппаратуры, комплексного навигационного оборудования, тепловизоров и других дорогостоящих средств дистанционного зондирования территорий, которое защитит от механических и других внешних воздействий на БПЛА при атаке противника.

Актуальной является задача повышения прочности корпуса летательного аппарата, облегчение конструкции для увеличения полезной переносимой массы или увеличения скорости и дальности полета, а также защиты от средств электромагнитного излучения (ЭМИ) и лазерного излуче-

ния, которые часто используются для выведения БПЛА из строя.

Полимерные композиционные материалы в авиастроении. Композиционные материалы применяются в авиационной и космической технике более 60 лет, так как они позволяют эффективно использовать уникальные свойства компонентов, входящих в их состав [3]. Композиты позволяют сократить массу конструкций, что крайне важно в авиастроении, при сохранении прочностных характеристик или обеспечить функциональные преимущества относительно изделий из других материалов.

Благодаря низкому удельному весу, высокой усталостной прочности и дополнительной оптимизации конструктива, достигаемой за счет использования анизотропных свойств волокнистых пластиков, полимерные композиционные материалы (ПКМ) по праву стали одним из основных решений, применяемых при изготовлении современных летательных аппаратов [4].

Новые композиционные материалы также широко используются в беспилотной авиации, в частности легкие БПЛА возможно оснастить пластиковыми корпусами, но на более тяжелых дронах самолетного типа активно используются композитные изделия сложных форм и конфигураций. К примеру, российский средневысотный планер большой продолжительности полета «Орион» изготавливается преимущественно из

Таблица 1. Механические свойства эпоксидных композитов

Концентрация введенных в композит УНТ, мас. %	Прочность на разрыв, МПа	Модуль Юнга, МПа	Разрывное удлинение, %	Прочность на изгиб, МПа	Модуль Юнга, МПа
0 (ненаполненный композит)	18.2 ± 1.09	849 ± 51	4.3 ± 0.22	32 ± 1.60	933 ± 47
0.01% исходных УНТ	20 ± 1.1	1077 ± 44	4.2 ± 0.2	42 ± 1.7	1100 ± 55
0.1% исходных УНТ	24 ± 1.2	1137 ± 46	4.9 ± 0.2	45 ± 1.8	1251 ± 50
0.5% исходных УНТ	23 ± 1.1	1245 ± 50	4 ± 0.16	43 ± 1.7	1290 ± 52
0.01% фторированных УНТ	22 ± 0.88	1352 ± 54	4 ± 0.15	45 ± 1.75	1187 ± 48
0.1% фторированных УНТ	27 ± 1.05	1479 ± 56	3.5 ± 0.14	51 ± 2.0	1550 ± 59
0.5% фторированных УНТ	25 ± 1.0	1588 ± 65	3.2 ± 0.13	48 ± 1.8	1611 ± 61

композитов, тогда как доля других материалов сокращена до необходимого минимума. Схожие подходы использовались при разработке других современных БПЛА среднего и тяжелого классов [5].

Композиционные материалы, модифицированные углеродными наноматериалами. Из-за повсеместного использования композиционных материалов требования, предъявляемые к их физико-механическим и эксплуатационным характеристикам, становятся все более высокими. Соответствовать этим требованиям могут помочь углеродные наноматериалы (УНМ), используемые в качестве модификатора полимерных матриц. Анализ состояния и тенденций развития объектов наноиндустрии позволяет сделать вывод о том, что особое место среди многообразия УНМ занимают углеродные нанотрубки (УНТ) и графен [6]. Диаметр УНТ от 1 до 50 нм, длина до нескольких микрометров, имеют упорядоченную структуру нанофрагментов, из которых они состоят, это и обуславливает их уникальные свойства: высокие прочностные характеристики в сочетании с высокими значениями упругой деформации, электро- и теплопроводности, способность к холодной эмиссии электронов, магнитные характеристики, химическая и термическая стабильность. Композитные материалы на основе УНМ (углеродных нанотрубок и графена) могут успешно использоваться в качестве структурных и функциональных модификаторов конструкционных материалов, элементов электроники и микроэлектроники, экранирующих покрытий [7, 8] и т.д. В настоящее время все более широкое распространение получает оксид графена (ОГ), представляющий собой протяженные ароматические системы атомов углерода толщиной ~15 нм, содержащие на поверхности большое число кислородсодержащих функциональных групп. Известно огромное количество как потенциальных, так и уже существующих практических применений [9]. Среди всего их многообразия особое место занимают полимерные композиты, модифицированные ОГ, поскольку он эффектив-

но распределяется в большинстве полимерных матриц, способен выступать как сопутствующее поверхностно-активное вещество (вещество, вводимое для повышения дисперсности и стабильности сложодиспергируемых компонентов). В частности, электрические свойства ОГ придают полимерным матрицам способность экранировать электромагнитное излучение [10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве модификатора в работе использовали многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) марки Таунит-М и оксид графена (ООО «Нанотехцентр» г. Тамбов, сертифицированы в «Центр сертификации продукции и систем менеджмента в сфере наноиндустрии») [11]. Синтез МУНТ осуществлен CVD-методом.

Для лучшего сродства с матрицей и придания новых свойств УНМ подвергали функционализации и легированию. Для наилучшего армирующего эффекта, равномерного распределения и высокой диспергируемости модификацию проводили методом прямого фторирования в стальном реакторе. Фтор вводили в предварительно нагретый реактор. Давление фтора в реакторе контролировали по манометру. Для увеличения электрофизического потенциала УНМ подвергали жидкофазному галогенированию (подана заявка на патент). Разработанные методики в первом приближении включают в себя два основных фактора, влияющие на структуру и свойства УНМ: химический (влияние I_2 и KI) и физический – влияние температуры.

Анализ влияния УНМ на физико-механические характеристики полимерных композитов. Изготовление образцов для изучения влияния исходных и модифицированных УНМ на прочностные характеристики композиционных материалов проводили по методикам ГОСТ с соответствующей геометрией. Образцы полимерных композитов для исследования влияния модифицирования УНМ на основные эксплуатационные характеристики были изготовлены на базе эпоксидной смо-

Таблица 2. Электромагнитные свойства полимерных композиционных материалов, модифицированных МУНТ

Образец	Матрица	Модификатор	Содержание МУНТ, мас. %	Частота, ГГц	SE_{TOTAL} , дБ мм ⁻¹
1	Силикон	МУНТ	5	8–12	3.77
2	Силикон	МУНТ	7		9.47
3	Силикон	МУНТ	10		12.31
4	Силикон	МУНТ	12		11.81

Таблица 3. Электромагнитные свойства модифицированных композитов

Образец	Матрица	Модификатор	Содержание, ОГ, мас. %	Частота, ГГц	SE_{TOTAL} , дБ мм ⁻¹
1	Стирол-акрил	ОГ	0.5	8–12	21
2	Стирол-акрил	ОГ	1		23
3	Стирол-акрил	ОГ	2		25
4	Стирол-акрил	ОГ	3		23

лы, так как она является одним из распространенных связующих в промышленности, что объясняется разнообразием доступных марок и отверждающих агентов, это позволяет получить материалы с различным сочетанием свойств. Материалы на основе эпоксидной бисфенольной смолы марки ВFE-170 и ускорителя полимеризации УП 606/2, используемого в качестве горячего отвердителя, совмещали с УНМ. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Анализ влияния УНМ на экранирующие способности полимерных композитов. В рамках проекта были изготовлены радиопоглощающие материалы на основе силиконового композита, а также стирол-акриловой дисперсии, модифицированных углеродными наноструктурами. В качестве основы использовали силикон Elastomould 115

Таблица 4. Электропроводящие свойства полимерных композиционных материалов, модифицированных УНТ

Модификатор и мас. %	Удельное сопротивление, Ом · см
Эпоксидная смола без наполнителя	8.49 E+14
Эпоксидная смола + УНТ 1%	3.19 E+09
Эпоксидная смола + УНТ 2%	1.64 E+09
Эпоксидная смола + УНТ 3%	4.43 E+07
Эпоксидная смола + УНТ 4%	9.56 E+07
Эпоксидная смола + УНТ + йод 1%	3.69 E+10
Эпоксидная смола + УНТ + йод 2%	1.91 E+07
Эпоксидная смола + УНТ + йод 3%	3.53 E+05
Эпоксидная смола + УНТ + йод 4%	3.22 E+07

фирмы “ВМРTechnology” (Москва) и стирол-акриловую дисперсию (ТУ 2257-001-71432335-17).

В табл. 2 приведены частотные зависимости параметров (коэффициент отражения R , эффективность экранирования и комплексная диэлектрическая проницаемость ϵ) для образцов с различным массовым содержанием наноматериала.

Также были изготовлены композиты на основе стирол-акриловой дисперсии, модифицированной ОГ. Методика получения покрытий заключалась в смешивании компонентов в необходимых пропорциях, после чего смесь наносили на полипропиленовую подложку выдерживали при необходимых условиях в течение ~16 ч. На примере стирол-акрилового композита в табл. 3 видно, что ОГ является эффективным модификатором ввиду его хорошей совместимости с полимерными матрицами.

Анализ придания электропроводящих свойств полимерным композиционным материалам с введенными УНТ. Для исследования влияния модифицирования УНТ на электрофизические характеристики композитов на основе эпоксидной смолы марки ВFE-170 были изготовлены образцы по ГОСТ. Образцы нужной геометрии получали методом литья в форму. Увеличение электропроводности модифицированных нанотрубок по сравнению с контрольными, показанное в табл. 4, можно объяснить несколькими известными механизмами: интеркалированием или адсорбированием йода, кислорода, или изменением структуры МУНТ. Таким образом, удалось повысить функциональные свойства отечественного УНМ “Таунит-М” на сотни процентов посредством его модификации галогенами и галогенсодержащими соединениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенным исследованиям использование УНМ приводит к существенному возрастанию физико-механических, электрофизических и эксплуатационных характеристик эпоксидных композитов на их основе (табл. 1–4).

Модифицированные УНТ дают лучший эффект армирования по сравнению с исходными УНТ. Наибольший эффект достигается при содержании 0.1 мас. % фторированных УНТ в составе композита: прочность на разрыв возрастает на 50%, модуль Юнга при растяжении – на 74%, прочность на изгиб – на 60%, модуль Юнга при изгибе – на 66% (табл. 1) в сравнении с ненаполненным композитом. Как видно из полученных данных (табл. 2), при увеличении концентрации коэффициент отражения изменяется незначительно, в то время как общая эффективность экранирования при концентрации свыше 2 мас. % заметно возрастает. Наибольшей величиной эффективности экранирования 12.3 дБ/мм обладает образец 3, содержащий концентрацию МУНТ 10 мас. %, дальнейшее увеличение приводит к негативному влиянию. Электромагнитные свойства стирол-акриловых композитов, модифицированных ОГ/МУНТ, представленные в табл. 3, позволяют сделать вывод, что при концентрации 2 мас. % достигается максимальная эффективность материала, дальнейшее увеличение приводит к негативному влиянию.

Данные по электрическим характеристикам (табл. 4) показывают уменьшение электрического сопротивления при добавлении исходных УНТ на 7 порядков (при концентрации в 3 мас. %), а при введении легированных йодом УНТ – на 9 порядков при той же концентрации по сравнению с эпоксидной смолой без наполнителя, которая является диэлектриком.

ВЫВОДЫ

Создание роботизированных единиц техники, таких как БПЛА, беспилотные наземные военные единицы или роботы-солдаты, является актуальной задачей и наиболее вероятным исходом в будущих разработках.

Согласно проведенным исследованиям многофункциональный полимерный композитный материал на основе УНМ позволяет повысить прочность конструкции, сократить общий вес летательного аппарата, придать электропроводность для стока статического напряжения, защиты от разрабатываемых коронных (шоковых) зарядов, а также придать экранирующий эффект корпусу для уменьшения заметности и противодействию электромагнитному оружию. УНМ имеют высокую теплопроводность, что позволит избежать локального нагрева при воздействии ла-

зерным оружием, которое бурно развивается для борьбы с БПЛА.

Модифицированные УНТ, на поверхности которых имеются функциональные группы, обладают высоким сродством к полимерным матрицам и повышенной диспергируемостью в них. Применение функционализированных УНТ в составе полимерных композиционных материалов является эффективным и экономически выгодным, поскольку позволяет значительно снизить расходные нормы.

Полученные результаты позволяют перейти на следующий уровень исследований, постройки опытной модели корпуса летательного аппарата и придание новых функциональных свойств, например возможности самодиагностики при разрушении корпуса.

Таким образом, теоретически и экспериментально подтвердилась возможность создания многофункционального полимерного нанокompозита, модифицированного УНМ, для повышения комбинированной защиты БПЛА, участвующих в боевых действиях. Также получены новые научные и технологические результаты, обеспечивающие возможность применения новых отечественных модифицированных УНМ в качестве основных наполнителей в полимерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаджиева С.А., Курбанов С.К.* Беспилотные летательные аппараты, применение и перспективы их развития // Компьютерные технологии и моделирование в науке, технике, экономике, образовании и управлении. 2019. 140 с.
2. *Бакач В.А., Беляев В.А., Бурнышев Я.А.* Беспилотные летательные аппараты двойного назначения // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. 2019. 146 с.
3. *Сагитов И.Ф.* // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. № 13.
4. *Подтелкина О.А.* // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 11.
5. *Сагитов И.Ф.* // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. № 13.
6. *Кирчанов В.С.* Наноматериалы и нанотехнологии: учебное пособие / Пермь. Изд-во Перм. нац. иссл. политех. ун-та, 2016. 193 с.
7. *Алиева Н.З., Русяков Д.В.* Наноматериалы и нанотехнологии в легкой промышленности: учеб. пособие. Ч.1. / Новочеркасск: Лик, 2019. 152 с.
8. *Абасов Р.К.* Применение углеродных материалов в экранировании электромагнитных полей. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. № 5.
9. *Li Z., Wang L., Li Y. et al.* // Comp. Sci. Tech. 2019. V. 179. № 28. P. 10.
10. *Kolanowska A., Janas D., Herman A.P. et al.* // Carb. 2018. V. 126. P. 31.
11. ООО “Нанотехцентр”. <http://www.nanotc.ru>