Конструкционные материалы радиотехнического назначения, модифицированные углеродными нанотрубками

Reinforced materials for radio engineering modified with carbon nanotubes

И.Д. КРАЕВ¹, А.Е. СОРОКИН¹, Ю.В. ОЛИХОВА², Ю.М. ТИТКОВА¹

I.D. KRAEV¹, A.E. SOROKIN¹, YU.V. OLIKHOVA², YU.M. TITKOVA¹

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

² ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

¹ Federal state unitary enterprise “All-Russian scientific research institute of aviation material”, State research center of the Russian Federation (FSUE “VIAM”)

² D.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
yuolihova@muctr.ru

В работе приведены результаты исследований влияния углеродных нанотрубок (УНТ) на радиотехнические (коэффициент отражения), электрофизические (поверхностное электросопротивление), термомеханические и прочностные свойства стеклопластиков на основе эпоксидного связующего. Предложены составы и технологические параметры изготовления образцов стеклопластиков. Показано изменение электрофизических и радиотехнических характеристик образцов стеклопластиков с ростом концентраций УНТ.

Ключевые слова: радиотехнические свойства, стеклопластик, углеродные нанотрубки, температура стеклования, аппрет, прочность.

The paper presents the results of studies of the influence of carbon nanotubes (CNTs) on radio engineering (reflection coefficient), electrophysical (surface electrical resistance), thermomechanical and strength properties of fiberglass based on epoxy binder. The compositions and technological parameters of the manufacture of fiberglass samples are proposed. The change in the electrophysical and radio technical characteristics of fiberglass samples with increasing concentrations of CNTs is shown.

Keywords: radio engineering properties, fiberglass, carbon nanotubes, glass transition temperature, size, strength

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-62-66

Введение

Материалы радиотехнического назначения находят широкое применение для обеспечения электромагнитной совместимости антенных систем, бортового и радиоэлектронного оборудования [1–3]. В настоящее время спектр разработанных для этих целей материалов достаточно широк [4]. Они различаются по составу, способу нанесения, конструктивным особенностям, области защитного действия и другим критериям. Особый интерес представляют конструкционные радиопоглощающие материалы (КРПМ). В отличие от покрытий радиотехнического назначения, они способны не только защищать от действия ЭМИ, но и нести при этом конструктивные нагрузки.

Как правило, КРПМ представляют собой полимерные композиты различного состава. Полимерной матрицей служат термо- (полиолефины, поливинилловый спирт, поливинилхлорид) или реактопласты (эпоксидные, полиэфирные кремнийорганические смолы) [5–9]. В качестве наполнителей применяют дисперсные и армирующие (стеклянные, углеродные, арамидные) волокна, ленты и ткани. При наполнении полимеров используют электропроводящие (графит, сажа) и магнитные (порошки ферромагнитных металлов и ферритов) частицы [10, 11]. В настоящее время большой интерес представляют наноразмерные функциональные наполнители: графен, углеродные нанотрубки (УНТ), наночастицы металлов и ферритов [12, 13]. В связи с многообразием областей применения КРПМ разработка новых, более совершенных материалов и структур не прекращается [14, 15].

Замещение металлических материалов полимерными композитами при изготовлении ряда узлов, деталей и других элементов конструкций современной техники, в том числе ряда летательных аппаратов [16] и морских средств [17], является актуальной зада-

чей [18]. Во-первых, это связано со снижением массогабаритных характеристик изделий, что, в свою очередь, позволяет обеспечивать энергосбережение и повышать тактико-технические показатели (повышение грузоподъемности, времени эксплуатации и прочие). Разработка новых КРПМ позволит снизить как массогабаритные характеристики технических средств, так и понизить трудоемкость при их изготовлении (например, вследствие отсутствия необходимости в нанесении радиопоглощающих покрытий на металлическую обшивку изделий).

Приемлемым пластиком при изготовлении КРПМ являются стеклопластики на основе эпоксидных связующих [19]. В работе [20] описан КРПМ авиационного назначения, представляющий собой стеклопластик на основе эпоксидного связующего, наполненный науглероженным волокном.

УНТ являются перспективным наполнителем для регулирования электрофизических и радиотехнических параметров полимерных композитов в связи с их волокнистой формой, размером и собственными проводящими свойствами. За счет высокого значения аспектного отношения (более 100) и малых размеров УНТ способны значительно повышать электропроводность композитов при крайне низких концентрациях [21]. По сравнению с материалами, содержащими углеродные волокна, графит и электропроводящую сажу, достижения близких электропроводящих характеристик возможно при концентрациях УНТ в композитах на 1–2 порядка ниже, что может обеспечить заметное снижение массогабаритных характеристик КРПМ и в меньшей степени повлиять на снижение их физико-механических свойств [22].

Настоящая работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от действия ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и

электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [23].

Цель работы: исследование влияния УНТ на радиотехнические, электрофизические, термические и механические свойства образцов стеклопластиков на основе эпоксидного связующего.

1. Объекты и методы исследования

Объектами исследований являлись образцы полимерных композиций и стеклопластиков, полученных с использованием следующих компонентов: эпоксидная смола ЭД-20 ГОСТ 10587-84 с массовой долей эпоксидных групп 21,0 мас.% производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ»; отвердитель 4,4'-диаминодифенилсульфон (ДАДФС) ТУ 2494-001-30163604-2013 (поставщик ООО «Ин-кем»); стеклоткань Э1-100 ГОСТ 19907-83 производства ООО ХК «Спецтехноткань»; ацетон ГОСТ 2768-84 (поставщик компания «Нерс+»). Для получения эпоксидного связующего смолу и отвердитель смешивали в массовых соотношениях 3:1. Для улучшения смачивания стеклоткани связующим применяли аппреты (ООО «Пента-91»): аминоэтиламинотриметоксисилан (аппрет 1), аминный эквивалент которого составляет 40,3 г/экв, и 3-глицидилоксипропилтриметоксисилан (аппрет 2), содержащий 18,2 мас.% эпоксидных групп. Функциональным наполнителем являлись углеродные нанотрубки «Таунит МД» (ТУ 2166-001-02069289-2006) производства ООО «НаноТехЦентр», свойства которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики УНТ марки «Таунит-М».

Наименование показателя	Значение показателя
Внешний диаметр, нм	8–30
Внутренний диаметр, нм	5–15
Длина, мкм	≥ 20
Удельная поверхность, м ² /г	≥ 270
Насыпная плотность, г/см ³	0,025–0,06

УНТ вводили в состав связующего в виде суспензии в ацетоне с концентрацией УНТ от 0,025 до 0,25 мас.%. Содержание УНТ в составе связующего варьировалось от 0,1 до 1,0 мас.%. Значения объемной плотности образцов стеклопластиков определялись в соответствии с разделом 2 по ГОСТ 15139-69.

Определение коэффициента отражения (КО) ЭМИ образцов осуществляли на проводящей металлической подложке, изготовленной из алюминиевого сплава Д16, в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц с использованием измерителя КСВН типа Р2-61 с рупорной антенной с размером апертуры 80×80 мм, в соответствии с ГОСТ 30381-95. Оценку поверхностного электросопротивления проводили по ГОСТ 30878-2003. Морфологию отвержденных образцов изучали с использованием электронного сканирующего микроскопа JSM-6490LV. Исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) проводили, применяя универсальный высокочувствительный дифференциальный сканирующий калориметр DSC 204 F1 Phoenix по ГОСТ Р 55134-2012 при скорости нагрева 20°С/мин. Термомеханический анализ (ТМА) образцов, представляющих собой цилиндры диаметром и высотой 10 мм, проводили на консистометре Хепплера при скорости нагрева 2°С/мин и импульсном приложении нагрузки (9,8 Н). Термогравиметрический анализ (ТГА) связующего проводили в соответствии с ГОСТ 29127-91 с использованием вакуум-плотных микротермовесов TG 209 F1 Libra фирмы Netzsch. Предел прочности при растяжении определяли по ГОСТ 11262-80 на универсальной испытательной машине Z050 TH.

2. Технологические параметры изготовления связующего и образцов стеклопластиков

Для изготовления образцов стеклопластика осуществляли следующие операции:

1. Диспергирование УНТ в ацетоне с использованием ультразвуковой ванны УЗВ-4.0 ТТЦ;
2. Приготовление связующего путем смешения ЭД-20 и ДАДФС при перемешивании на верхнеприводной мешалке HeidolphRZR 2021 со скоростью вращения 2000 об/мин;
3. Введение суспензии УНТ в ацетоне в эпоксидное связующее при механическом перемешивании;

4. Раскрой стеклоткани на заготовки и нанесение раствора связующего методом шприцевания;

5. Сушка полученных препрегов при комнатной температуре в течение 12 ч, затем в вакуумном сушильном шкафу VD-53 при температуре 60°С до полного удаления ацетона;

6. Сборка пакетов соответствующих размеров (образец стеклопластика толщиной 1 мм получали из 10 слоев препрегов), помещенные их в гидравлический пресс рамной конструкции ORMA MACCHINE Type: PSA 5/5 и дальнейшая выдержка при температурах 120°С в течение 1 ч и 160°С в течение 2 ч под давлением.

Значения объемной плотности изготовленных образцов стеклопластиков составили 1,45±0,02 г/см³.

3. Результаты и их обсуждение

3.1 Радиотехнические и электрофизические свойства стеклопластиков

Для исследования влияния УНТ на значения поверхностного электросопротивления были изготовлены серии образцов стеклопластиков толщиной 1 мм, содержащих в своем составе УНТ с концентрациями от 0 до 1% по массе связующего. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения поверхностного электросопротивления образцов стеклопластика с различными концентрациями УНТ.

Наименование показателя	Содержание УНТ в составе связующего, мас. %					
	0	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00
Электросопротивление, кОм	>1000	59,76	20,75	2,03	0,24	0,04

Согласно результатам исследований (таблица 2), с ростом концентраций УНТ в составе связующего отмечалось значительное снижение значений поверхностного электросопротивления образцов стеклопластиков: при увеличении содержания УНТ с 0,1 до 0,5 мас.% этот показатель уменьшался приблизительно в 500 раз.

Для оценки радиотехнических характеристик образцов стеклопластиков проводили измерения КО ЭМИ в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения КО в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц для образцов стеклопластика толщиной 1 и 2 мм.

Содержание УНТ в связующем, мас. %	Толщина, мм	Значения коэффициента отражения от частоты (ГГц), дБ				
		8	9	10	11	12
0	1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2
0,10	1	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
0,25	1	-1,3	-1,5	-1,9	-2,3	-2,4
0,50	1	-1,6	-1,8	-2,2	-2,7	-2,9
0,75	1	-2,9	-3,5	-3,5	-4,0	-4,0
1,00	1	-2,4	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5
0	2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2
0,50	2	-8,0	-7,0	-9,0	-7,2	-6,5
0,75	2	-11,5	-10,5	-9,0	-8,5	-6,0
1,00	2	-3,1	-2,9	-2,4	-2,6	-2,7

Из приведенных в таблице 3 данных видно, что в исследуемом диапазоне частот наблюдалось снижение значений КО образцов стеклопластиков с ростом концентраций УНТ до 0,75 мас.%. Дальнейшее повышение концентрации наночастиц в связующем нецелесообразно в связи с ростом отражения согласно данным, полученным на образцах стеклопластиков с концентрациями УНТ, превышающими 0,75 мас.%. При увеличении толщины образцов стеклопластиков (с 1 мм до 2 мм) наблюдалось снижение значений КО в исследуемом диапазоне частот. Наиболее низкие значения КО ЭМИ в исследуемом диапазоне частот характерны для образцов стеклопластика толщиной 2 мм, содержащих 0,75% УНТ по массе в составе связующего.

3.2. Исследование образцов стеклопластиков методом сканирующей электронной микроскопии

Была проведена сканирующая электронная микроскопия изготовленных образцов стеклопластиков. На рис. 1 представлена микрофотография скола образца стеклопластика с концентрацией УНТ 1 мас.%.

Рис. 1. Микрофотография скола образца стеклопластика с концентрацией УНТ 1 мас. %.

Как видно из рис. 1, УНТ в объеме связующего распределены недостаточно равномерно, наблюдались отдельные агрегаты размером до 2–3 мкм. Преобладающая форма агрегатов – вытянутая.

3.3. Изучение влияния УНТ на термические свойства связующего

Для выявления влияния УНТ на термические свойства связующего были проведены исследования методами ДСК, ТГА и ТМА (рис. 2–4).

Рис. 2. ДСК кривые связующих. Содержание УНТ, мас. %: а – 0; б – 0,75.

На кривой ДСК связующего, содержащего 0,75 мас. % УНТ (рис. 2, кривая 2), наблюдались следующие изменения:

- сдвиг максимума пика отверждения в сторону больших температур (151,4 против 148,7°C);
- уменьшение температурного интервала протекания процесса отверждения (33,9 против 39,5°C);
- незначительное (примерно на 8%) увеличение теплового эффекта, которое может объясняться протеканием химических реакций между функциональными группами на поверхности УНТ и реакционными группами компонентов связующего.

Следует отметить, что по данным ДСК введение УНТ не оказывало существенного влияния на значение температуры стеклования (T_g) связующего. Невысокие значения T_g (79,3 и 79,4°C) объясняются тем, что исследованию подвергались неотвержденные связующие.

Иной результат был получен при исследовании отвержденных образцов связующих методом ТМА (рис. 3).

По термомеханическим кривым были определены T_g и рассчитаны параметры сетчатой структуры отвержденных связующих (модуль высокоэластичности E , молекулярная масса кинетического

сегмента цепи M_c и плотность сшивки n_c) по формулам, приведенным в [24]. Полученные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты ТМА.

Содержание УНТ в связующем, мас. %	T_g , °C	E , МПа	M_c , г/моль	$n_c \cdot 10^{-3}$, моль/см ³
0	188	11,4	1400	0,97
0,75	195	9,8	1660	0,83

Рис. 3. Термомеханические кривые отвержденных связующих. Содержание УНТ, мас. %: 1 – 0; 2 – 0,75.

Термомеханические исследования показали (таблица 4), что введение УНТ приводит к повышению деформационной теплоустойчивости, характеризуемой T_g , при незначительном снижении E . Повышение T_g , вероятно, объяснялось образованием химических связей между компонентами связующего и УНТ, а уменьшение модуля – снижением плотности сетки, вызванным недостаточным равномерным распределением УНТ в связующем.

Изучение влияния УНТ на термоокислительную стабильность связующего и стеклопластиков проводили методом ТГА (таблица 5).

Таблица 5. Результаты ТГА связующих.

Содержание УНТ в связующем, мас. %	Температура, °C при потере массы, %			
	5	50	80	95
0	382	417	557	600
0,75	379	413	562	602

Термогравиметрические кривые обоих связующих имеют две ярко выраженные ступени потери массы – при 300–500 и 520–680°C, что согласуется с данными, полученными для аналогичных систем [25]. Уменьшение массы у обоих связующих начиналось одновременно – при 300°C. На первой ступени скорость потери массы модифицированным связующим превышала этот показатель у связующего, не содержащего УНТ. Однако на второй ступени термоокислительная деструкция связующего с УНТ замедлялась, и потеря массы на этом этапе становилась меньше, чем у исходного связующего.

Проведенные термогравиметрические исследования образцов стеклопластиков, полученных на основе исследуемых связующих, выявили, что обе ТГ-кривые (накладывались друг на друга) также имели две ступени потери массы – при 295°C и свыше 450°C. Температуры деструкции связующих и стеклопластиков, определяемые по пятипроцентной потере массы, составили 380±2°C. Общая потеря массы образцами стеклопластиков составила 38% (таблица 6).

Таблица 6. Результаты ТГА стеклопластиков.

Содержание УНТ в связующем, мас. %	Температура, °C при потере массы, %		
	5	25	38
0	381	530	700
0,75	381	530	700

3.4. Изучение влияния аппретов на радиотехнические и механические свойства стеклопластиков

Хорошее смачивание является залогом качественной пропитки стеклоткани, позволяющей избежать образования пор и пустот в композиции, обеспечивающей повышенную адгезионную прочность и улучшенные механические свойства стеклопластика. Известным приемом, обеспечивающим улучшение смачивания наполнителей

связующим, является использование аппретов. В данной работе для аппретирования стеклоткани применяли аминоэтиламинотриметоксисилан (аппрет 1) и 3-глицидилоксипропилтриметоксисилан (аппрет 2). Выбор аппретов обусловлен наличием в их составе реакционноспособных аминных или эпоксидных групп, которые будут способствовать встраиванию аппрета в эпоксидное связующее, а также метоксильных групп, активных по отношению к наполнителю [26]. Критериями оценки влияния аппретов на свойства образцов стеклопластиков, содержащих 0,75 мас.% УНТ, служили показатели КО и пределов прочности при растяжении (таблицы 7 и 8).

Таблица 7. Значения КО образцов стеклопластиков различного состава в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц.

Наличие аппрета	Толщина образца, мм	Значения КО от частоты (ГГц), дБ				
		8	9	10	11	12
Без аппрета	1	-2,9	-3,5	-3,5	-4,0	-4,0
Аппрет №1	1	-2,7	-3,4	-3,3	-3,8	-4,0
Аппрет №2	1	-2,8	-3,5	-3,4	-3,7	-3,9
Без аппрета	2	-11,5	-10,5	-9,0	-8,5	-6,0
Аппрет №1	2	-11,3	-10,8	-9,2	-8,5	-6,1
Аппрет №2	2	-11,4	-10,6	-9,0	-8,7	-5,9

Таблица 8. Значения предела прочности при растяжении образцов стеклопластиков толщиной 2 мм.

Содержание УНТ в связующем, мас. %	Предел прочности при растяжении, МПа		
	Без аппретов	Аппрет 1	Аппрет 2
0	267	310	312
0,75	235	265	276

Согласно результатам, представленным в таблице 7, влияние выбранных аппретов на значения КО образцов стеклопластика незначительно (на уровне погрешности измерений) по сравнению с образцами без аппретов.

Использование аппретов привело к повышению значений пределов прочности при растяжении образцов стеклопластика более чем на 10–15% (таблица 8). Значения пределов прочности при растяжении у образцов стеклопластиков, содержащих УНТ, оказались на 12–15% ниже, по сравнению с показателями немодифицированных образцов стеклопластиков, независимо от наличия или отсутствия в их составе аппретов, что объяснялось присутствием конгломератов УНТ, которые могли служить источником зарождения трещин под нагрузкой.

Выводы

1. В рамках данной работы были проведены исследования влияния УНТ на радиотехнические, электрофизические, термические и механические свойства образцов стеклопластиков на основе эпоксидного связующего. Показана возможность регулирования свойств связующего и образцов стеклопластиков путем изменения содержания УНТ в их составе. Описаны технологические параметры изготовления образцов стеклопластиков, модифицированных УНТ. Значения объемной плотности изготовленных образцов стеклопластиков составили $1,45 \pm 0,02$ г/см³.

2. Установлено, что модификация связующего УНТ приводила к снижению значений поверхностного электросопротивления образцов стеклопластиков во всем исследуемом диапазоне концентраций. При концентрации УНТ 1 мас.% среднее значение поверхностного электросопротивления составляло 0,04 кОм.

3. Снижение значений КО ЭМИ наблюдалось при увеличении толщины образцов стеклопластиков с 1 мм до 2 мм. С увеличением концентрации УНТ до 0,75% по массе связующего обеспечивалось снижение КО в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. Наименьшие значения КО в исследуемом диапазоне частот характерны для образцов стеклопластика толщиной 2 мм, содержащего 0,75 мас.% УНТ.

4. Исследования методом сканирующей электронной микроскопии показали, что УНТ распределены в отвержденном связующем недостаточно равномерно, наблюдались агрегаты, размерами 2–3 мкм.

5. Термическими исследованиями установлено, что отверждение эпоксидного связующего в присутствии УНТ сопровождалось небольшим повышением теплового эффекта, а образцы модифи-

цированных стеклопластиков обладали повышенной деформационной теплоустойчивостью и устойчивостью к термоокислительной деградации.

6. Применение в качестве аппретов аминоэтиламинотриметоксисилана и 3-глицидилоксипропилтриметоксисилана способствовало повышению значений пределов прочности при растяжении более чем на 10–15% при сохранении радиотехнических характеристик образцов стеклопластиков, содержащих 0,75 мас.% УНТ.

Литература

1. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
2. Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Юрков Г.Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // *Авиационные материалы и технологии*, 2016. №4 (45). С. 61–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-60-67.
3. Гайнутдинов Р.Р., Байтимиров Э.Д. Анализ и синтез размещения антенного оборудования беспилотного летательного аппарата с учетом электромагнитных взаимовлияний // *Сб. докл. Всерос. науч.-практич. конф с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли»*. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2016. Т. 2. С. 79–84.
4. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2012. Т. 8. № 6. С. 70–76.
5. Краев И.Д., Попков О.В., Шульдешов Е.М., Сорокин А.Е., Юрков Г.Ю. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.*, 2017. №12 (60). С. 48–62. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5.
6. Банний В.А. Модифицированные углеродным наполнителем радиопоглощающие композиционные материалы на основе полиэтилена // *Тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому) «Современные проблемы машиноведения»*. Гомель: Министерство образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, 2018. С. 129–130.
7. Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Радиопоглощающие материалы на основе криогелей поливинилового спирта // *Доклады НАН Беларуси*, 2013. Т. 57. №4. С. 114–118.
8. Прохорова Е.А. Патентные исследования по проекту «Радиопоглощающий многофункциональный материал» // *Сб. докл. IX Всероссийской школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Инноватика – 2013»*. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2013. С. 106–110.
9. Власенко Е.А., Бокова Е.С., Дедов А.В. Композиционный радиопоглощающий материал на основе наполненной резины и модифицированного нетканого полотна // *Материаловедение*, 2016. №2. С. 41–43.
10. Саввинова М.Е., Коваленко Н.А. Электропроводящие композиции на основе полимеров с дисперсным наполнителем // *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2011. Т. 17. №4. С. 577–583.
11. Краев И.Д., Говоров В.А., Широков В.В., Шашкеев К.А. Исследование влияния дисперсности функциональных частиц карбонильного железа на радиопоглощающие характеристики композита на их основе // *Авиационные материалы и технологии*, 2017. №1 (46). С. 51–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-51-60.
12. Хачатуров А.А., Фионов А.С., Колесов В.В., Потапов Е.Э., Ильин Е.М. Функциональные эластомерные композиционные материалы на основе бутадиен-стирольного каучука и магнетита // *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019. Т. 1. №2. С. 189–198.
13. Серебрянников С.В., Черкасов А.П., Серебрянников С.С., Долгов А.В., Еремцова Л.Л., Коньшин П.И. Электродинамические свойства радиопоглощающих покрытий на основе ферромагнитных наполнителей нового поколения // *Тр. XXV Междунар. конф. «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)»*. М.: ИНФРА-М, 2017. С. 604–616.

14. Кондрашев С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*, 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
15. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*, 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
16. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // *Технология электромагнитной совместимости*, 2018. №2(65). С. 62–78.
17. Андреев А.Ю., Матвеев А.В., Патраков Ю.М., Ржевский А.А. Перспективные средства снижения заметности кораблей в верхней полусфере и контроля их эффективности // *Труды Крыловского государственного научного центра*, 2019. Т.1. №387. С. 155–167.
18. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // *Вестник РФФИ*, 2017. №3. С. 97–105.
19. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики в конструкциях авиационной и ракетной техники // *Стекло и керамика*, 2012. №4. С. 36–42.
20. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном // *Авиационные материалы и технологии*, 2013. №3. С. 56–59.
21. Кулешов Г.Е., Суслиев В.И. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*, 2014. №1 (31). С. 84–87.
22. Щегольков А.В., Парфимович И.Д., Буракова Е.А., Кобелев А.В., Дьячкова Т.П. Аспекты направленного синтеза углеродных нанотрубок для создания иерархических радиопоглощающих композитных материалов // *Вестник ВГУИТ*, 2018. Т.80. № 4. С. 337–334.
23. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
24. Akopova T.A., Olikhova Y.V., Osipchik V.S. A thermoanalytical study of curing of epoxy-amine binders modified with epoxy-containing silsesquioxane // *Polymer Science, Series D*, 2015. №8 (2). P. 133–137. DOI: 10.1134/S1995421215020021.
25. Ahmed A. Moosa et al.: Mechanical and Thermal Properties of Graphene Nanoplates and Functionalized Carbon-Nanotubes Hybrid Epoxy Nanocomposites // *American Journal of Materials Science*, 2016. №6 (5). P. 125–134. DOI: 10.5923/j.materials.20160605.02.
26. Функциональные наполнители для пластмасс / под ред. Марино Ксантос, пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2010. 462 с.