

УДК 678.067.5

С.В. Кондрашов<sup>1</sup>, Л.В. Соловьянчик<sup>1</sup>,  
А.А. Мельников<sup>1</sup>, Т.П. Дьячкова<sup>2</sup>, В.М. Бузник<sup>1</sup>

## ГИБРИДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ СТЕКЛОПЛАСТИКИ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-78-87

*Изготовлены стеклопластики на основе эпоксидного связующего, модифицированного углеродными нанотрубками с ковалентно присоединенными карбоксильными группами. Содержание нанотрубок составляло от 1 до 8%. Исследованы структура синтезированных материалов, а также их электрофизические свойства, коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения в сантиметровом диапазоне длин волн. Обнаружено, что различные варианты термообработки связующего существенным образом влияют на электродинамические свойства гибридных стеклопластиков. Показано, что полученные стеклопластики могут быть использованы для обеспечения электромагнитной совместимости в качестве экранирующих материалов.*

**Ключевые слова:** стеклопластик, полимерные материалы, наноккомпозиты, углеродные нанотрубки, функциональные свойства, электропроводность, экранирование ЭМИ.

S.V. Kondrashov<sup>1</sup>, L.V. Solovyanchik<sup>1</sup>,  
A.A. Melnikov<sup>1</sup>, T.P. Dyachkova<sup>2</sup>, V.M. Buznik<sup>1</sup>

## HYBRID COMPOSITE FIBERGLASS FOR SHIELDING OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF ULTRAHIGH FREQUENCIES

*Hybrid GFRPs based on epoxy binder modified with carboxy-functionalized carbon nanotubes (CNTs) were synthesized, with CNT content in the 1–8% range. The structure of nanocomposites and their electrical properties and electromagnetic shielding performance in cm wavelength range were investigated. It was found that electrodynamic properties of the nanocomposites depend strongly on the thermal treatment conditions. These CNT-nanocomposites can be used as shielding materials for electromagnetic compatibility applications.*

**Keywords:** fiberglass, polymer material, nanocomposites, carbon nanotubes, functional property, conductivity, electromagnetic shielding.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» [Federal State Budgetary Institution of High Professional Education Tambov State Technical University]; e-mail: tsu@admin.tsu.ru

### Введение

Придание полимерным композиционным материалам конструкционного назначения дополнительных функциональных свойств, таких как электропроводность и экранирование электромагнитных волн радиодиапазона, является одной из приоритетных задач

современного материаловедения [1–6]. Одним из возможных вариантов решения данной задачи является разработка гибридных полимерных композиционных материалов (ГПКМ), в которых наряду с традиционными армирующими наполнителями (стекло- или углеволокно) используют различные функциональные наполнители: углеродные нанотрубки (УНТ) [7]; УНТ, покрытые никелем [8]; углеродсодержащие наночастицы [9]; металлуглеродные нанокомпозиты [10]; металлсодержащие наночастицы [11–14].

Традиционные методы изготовления ГПКМ, например, такие как RTM и VaRTM [15], имеют существенное ограничение по технологическим параметрам. Увеличение концентрации функционального наполнителя приводит к увеличению вязкости, что не позволяет достигнуть высокого уровня функциональных свойств.

Выращивание УНТ на поверхности армирующего наполнителя из оксида алюминия [16] или углеродного волокна [17] с последующей пропиткой и прессованием пластика позволяет достигнуть электропроводности ГПКМ на уровне  $1\text{--}10\text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$  при концентрации УНТ от 1 до 3%. Однако использование CVD-метода выращивания УНТ на поверхности стекло- и углеволокон приводит к падению их прочности при растяжении [7].

Таким образом, разработка новых способов получения ГПКМ с высокой степенью наполнения нанотрубками и заданным уровнем функциональных свойств является крайне актуальной задачей.

Данная работа посвящена созданию электропроводящих ГПКМ на основе углеродных нанотрубок, которые могут быть использованы при решении задач электромагнитной совместимости, и исследованию их структуры, электрофизических и электромагнитных свойств.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

Для получения ГПКМ использовали углеродные нанотрубки Таунит-М, поверхность которых функционализирована карбоксильными группами (производство ОАО «Нанотехцентр», г. Тамбов). Функционализацию УНТ карбоксильными группами осуществляли кипячением в азотной кислоте квалификации «х.ч.» в колбе с обратным холодильником в течение 10 ч. По окончании обработки, УНТ отделяли от кислоты центрифугированием, промывали на фильтре дистиллированной водой до нейтрального рН, а затем – ацетоном до получения «пасты», содержание окисленных углеродных нанотрубок составляло 8,5–10,0%. По аналогичной методике «пасту» получали авторы работ [18, 19].

Для качественной идентификации функциональных групп на поверхности УНТ применяли метод ИК Фурье-спектроскопии. Пробу материала помещали в агатовую микроступку, где растирали с бромистым калием в среде хлороформа. Степень измельчения контролировали при помощи микроскопа МБС-10 (увеличение – в 56 раз). Полученную смесь прессовали в микротаблетку. На приборе Infracuum FT-801 фиксировали ИК-спектры в волновом диапазоне  $4000\text{--}550\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$ . На ИК-спектрах окисленных образцов УНТ зафиксированы максимумы поглощения при длине волны  $1627,8\text{ см}^{-1}$ , относящиеся к колебаниям C=O-связи в карбоксильной группе (рис. 1).

Количественную оценку степени функционализации УНТ карбоксильными группами осуществляли посредством обратного потенциометрического кислотно-основного титрования по методике, приведенной в работе [20], с помощью автоматического титратора TirolineEasy. Титриметрический анализ показал, что степень

функционализации УНТ  $\text{COOH}$ -группами после 10 ч обработки нанотрубок в азотной кислоте составила 0,6 ммоль/г (по массе нанотрубок).

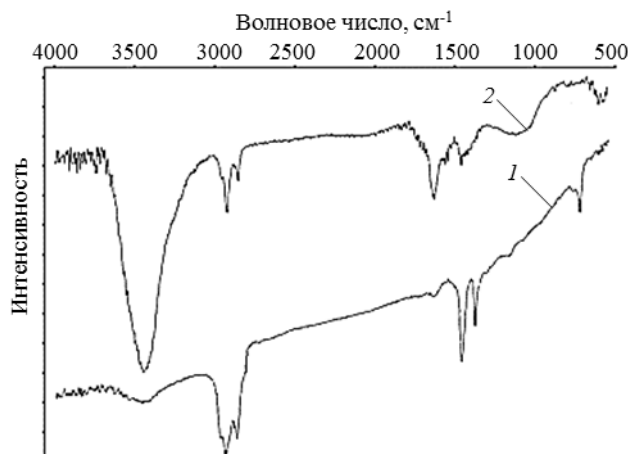


Рис. 1. ИК-спектры углеродных нанотрубок:  
1 – нефункционализированные УНТ; 2 – функционализированные УНТ

Структуру образцов анализировали при помощи СЭМ-изображений, полученных на сканирующем электронном микроскопе New Vission 40 Carl Zeiss.

В качестве армирующего наполнителя выбрана стеклоткань марки Т-64(ВМП)-270. При выполнении данной работы получены три серии образцов, отличающихся методом обработки полимерного связующего (матрицы). Для изготовления образцов первой серии (ГПКМ-1) в качестве матрицы использована композиция, состоящая из эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя 4,4-диаминодифенилсульфона, которые взяты в стехиометрическом соотношении. Образцы второй серии (ГПКМ-2) отличались от первой тем, что матрица перед растворением подвергалась термообработке при температуре  $100^\circ\text{C}$ . Третья серия образцов (ГПКМ-3) отличалась тем, что использовалась композиционная матрица, состоящая из исходного (ГПКМ-1) и термообработанного (ГПКМ-2) связующих в соотношении 75:25 по массе. Концентрация функционализированных углеродных нанотрубок (ФУНТ) во всех сериях образцов относительно полимерной матрицы одинаковая.

Для приготовления ГПКМ необходимое количество ФУНТ диспергировали в 50 мл ацетона с использованием ультразвуковой ванны «Сапфир» в течение 40 мин. В полученную дисперсию добавляли связующее. После этого композицию подвергали УЗ-диспергированию в течение 20 мин. Раствор модифицированного ФУНТ связующего выливали на стеклоткань. Для предотвращения пролива ацетона с обратной стороны стеклоткани натягивали полиэтиленовую пленку. Покрытие формировалось в процессе испарения ацетона. Пластины стеклоткани с нанесенным покрытием выдерживали при нормальных условиях в течение 48 ч, затем собирали в пакет и прессовали по традиционным режимам. Толщина изготовленных таким образом образцов составляла 0,21–0,30 мм.

Исследования поверхности покрытий, полученных из дисперсий композиций ГПКМ-1–ГПКМ-3, осуществляли с помощью электронного сканирующего микроскопа Jeol JSM 6380 LA.

Для измерения электрического сопротивления ( $\rho$ ) вдоль плоскости укладки наполнителя, между пластинами стеклоткани с покрытием перед прессованием прокладывали параллельные шины из никелевой фольги. Ширина шины 5 мм, толщина 0,1 мм, расстояние между шинами составляло 30 мм. Измерение сопротивления между шинами проводили:

- в диапазоне от 1 до  $10^7$  Ом – вольтметром В7-40;
- в диапазоне  $>10^7$  Ом – электрометрическим вольтметром В7Э-42.

Величину удельной проводимости ( $\sigma$ ) ГПКМ оценивали по формуле

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения образца;  $l$  – расстояние между шинами.

В работе измерены диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) и тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ), а также коэффициенты прохождения ( $T$ ), отражения ( $R$ ) и поглощения ( $L$ ) мощности электромагнитного излучения (ЭМИ) (рис. 2) в диапазоне частот 25,86–37,5 ГГц (пересчет выполнен на трех частотах диапазона: 27; 30,5 и 34 ГГц). Измерения проводили в волноводном тракте сечением  $7,2 \times 3,4$  мм<sup>2</sup>, при этом образец в виде пластинки размером  $10 \times 30$  мм<sup>2</sup> и толщиной 0,2–0,3 мм помещали между волноводными фланцами. При помощи векторного анализатора цепей выполняли измерения коэффициентов матрицы рассеяния  $S_{12}/S_{22}$  и  $S_{21}/S_{11}$ .

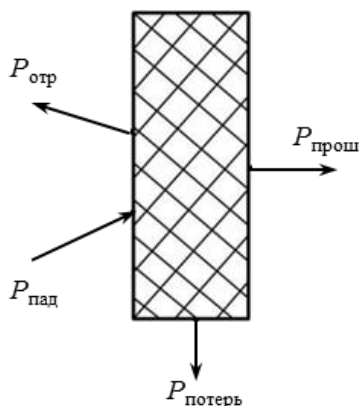


Рис. 2. Схема баланса мощностей при взаимодействии ЭМИ с образцом

Расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образца производили по формулам

$$\epsilon = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_\epsilon} \right)^2 + \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2; \quad (2)$$

$$\lambda_\epsilon = \frac{2\pi d}{\Delta\varphi}; \quad (3)$$

$$\text{tg}\delta = - \frac{\alpha \cdot \beta}{\beta^2 - \alpha^2 + \left( \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \right)^2}, \quad (4)$$

где  $\lambda_\epsilon$  – длина волны в образце;  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве;  $\lambda_{кр}$  – критическая длина волны в волноводе для одной и той же частоты;  $d$  – толщина образца в см;  $\Delta\varphi$  – набег фазы коэффициента  $S_{12}$  или  $S_{21}$  при помещении образца в волноводный тракт относительно пустого тракта;  $\alpha$  и  $\beta$  – действительная и мнимая части постоянной распространения, представляющие собой погонное затухание и фазовый набег, вычисленные по измеренным коэффициентам матрицы рассеяния [21].

Коэффициент ослабления ( $A$ , дБ) численно равен коэффициенту матрицы рассеяния  $S_{21}$  (или  $S_{12}$  при встречном включении) и представляет собой логарифм отношения мощности СВЧ-сигнала, прошедшей через измерительную ячейку с образцом, к падающей мощности:

$$A = -10 \log \frac{P_{\text{прош}}}{P_{\text{пад}}} = -10 \log T. \quad (5)$$

Коэффициент отражения ( $R'$ , дБ) численно равен коэффициенту матрицы рассеяния  $S_{11}$  (или  $S_{22}$  при встречном включении) и представляет собой логарифм отношения мощности СВЧ-сигнала, отраженной от измерительной ячейки с образцом, к падающей мощности:

$$R' = -10 \log \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}} = -10 \log R. \quad (6)$$

Относительный коэффициент потерь ( $L$ ) вычисляли по известным значениям коэффициентов  $R$  и  $T$  согласно соотношению

$$P_{\text{пад}} = P_{\text{прош}} + P_{\text{отр}} + P_{\text{потерь}}; \quad (7)$$

$$L = \frac{P_{\text{потерь}}}{P_{\text{пад}}}. \quad (8)$$

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены значения электрофизических характеристик образцов серии ГПКМ-1: омическое сопротивление между шинами ( $R$ ), коэффициенты пропускания ( $T$ ), отражения ( $R$ ) и поглощения ( $L$ ), величина диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) электромагнитного излучения (ЭМИ) на частотах ( $f$ ) 27; 30,54 и 34 ГГц – в сравнении с значениями этих характеристик для немодифицированного ПКМ, полученного аналогичным способом.

Таблица 1

Электрофизические характеристики образцов серии ГПКМ-1 с различной концентрацией (С) ФУНТ

Наноккомпозит	C, %	R, Ом	f, ГГц	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	T, %	R, %	L, %
Немодифицированный ПКМ	0	–	27,0	4,3	0,07	90	1,2	8,8
			30,5	5,0	0,14	96	1,0	3
			34,0	4,9	0,24	94	1,4	4,6
ГПКМ-1	8	$2,73 \cdot 10^4$	27,0	28,8	1,78	15,5	51,5	33
			30,5	22,7	1,57	16,8	50,6	32,6
			34,0	19,9	2,76	12,9	45,8	41,3
	4	$0,66 \cdot 10^6$	27,0	25,1	0,7	47,2	28,4	24,4
			30,5	20,6	0,75	47,2	26	26,8
			34,0	18,4	1,18	39,1	24,7	36,2
	1	$3,77 \cdot 10^7$	27,0	12,7	0,34	77,5	11,3	11,2
			30,5	11,1	0,41	75,2	14,1	10,7
			34,0	12,0	0,51	70,1	19,4	10,5

Как видно из приведенных данных, использование описанного ранее способа позволяет получить электропроводящие ГПКМ с удельной проводимостью вдоль плоскости укладки армирующего наполнителя  $5,8 \cdot 10^{-4}$  См·см при концентрации ФУНТ 3% относительно массы композиций. Пластина из такого композиционного материала толщиной 0,3 мм обладает коэффициентом отражения ЭМИ в диапазоне 27,0–34,0 ГГц (51,5–48,5%), пропуская при этом 15,5–12,9% падающей мощности, что отчетливо видно на графиках, представленных на рис. 3.

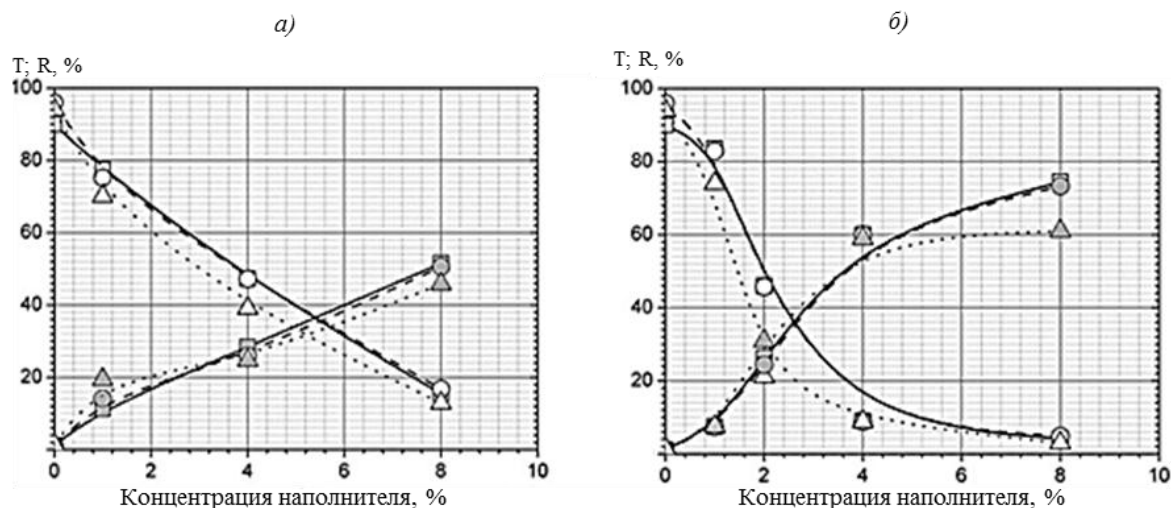


Рис. 3. Зависимость коэффициентов прохождения (Т – белые фигуры) и отражения (R – серые фигуры) образцов от концентрации наполнителя ГПКМ-1 (а) и ГПКМ-3 (б) при рабочей частоте 27 (□; ■); 30,5 (○; ●) и 34 ГГц (△; ▲)

С уменьшением концентрации ФУНТ проводимость ГПКМ-1 уменьшается, коэффициент отражения ЭМИ падает, а пропускание увеличивается.

В табл. 2 приведены электрофизические характеристики образцов серий ГПКМ-2 и ГПКМ-3.

Таблица 2

Электрофизические характеристики образцов серий ГПКМ-2 и ГПКМ-3

Наноккомпозит	C, %	R, Ом	f, ГГц	ε	tgδ	T, %	R, %	L, %
ГПКМ-2	8	$5,67 \cdot 10^3$	27,0	32,5	1,79	19,3	48,1	32,6
			30,5	33,5	1,83	19,8	43,1	37,1
			34,0	26,1	2,43	17	45	38
ГПКМ-3	8	$1,26 \cdot 10^3$	27,0	46,4	6,41	4,1	74,4	21,5
			30,5	40,1	3,47	4,8	73,3	21,9
			34,0	42,4	6,9	3,0	61	35,2
	4	$0,83 \cdot 10^5$	27,0	72,4	3,18	9,0	60,0	31,0
			30,5	49,6	4,36	8,8	60,0	31,2
			34,0	37,6	5,7	8,8	58,9	32,3
	2	$3,19 \cdot 10^7$	27,0	26,6	0,89	46,0	26,2	27,8
			30,5	20,3	0,99	45,7	24,4	29,9
			34,0	15,9	1,8	39,0	21,1	30,9
1	$3,86 \cdot 10^8$	27,0	7,2	0,26	83,6	7,5	8,9	
		30,5	6,4	0,26	82,9	7,4	9,7	
		34,0	6,9	0,49	74,0	7,4	18,6	

Как следует из представленных данных, электрофизические свойства образца серии ГПКМ-3 существенно отличаются от свойств образцов серий ГПКМ-1 и ГПКМ-2. Так, величина проводимости нанокompозита серии ГПКМ-3, при концентрации ФУНТ 8% (по массе) связующего, составляет  $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ , что почти на два порядка больше проводимости для нанокompозита серии ГПКМ-1. Однако при малых концентрациях ФУНТ (1% (по массе) связующего) проводимость композита серии ГПКМ-1 оказывается на порядок больше, чем проводимость композита серии ГПКМ-3:  $4,14 \cdot 10^{-7}$  и  $5,39 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  соответственно.

Диэлектрическая проницаемость композита серии ГПКМ-3 с концентрацией ФУНТ 8% (по массе) на частоте 27,0 ГГц составляет 46,4, в то время как для композитов серий ГПКМ-2 и ГПКМ-1 эта величина равна 32,5 и 28,8 соответственно. Тангенс угла диэлектрических потерь композита серии ГПКМ-3 (6,41 на частоте 27,0 ГГц) также оказывается существенно выше, чем для образцов серий ГПКМ-2 и ГПКМ-1 (1,79 и 1,78 соответственно).

Если величина коэффициента поглощения ЭМИ радиодиапазона для композита серии ГПКМ-1 монотонно уменьшается при уменьшении концентрации, то для композита серии ГПКМ-3 коэффициент поглощения вначале растет, достигает максимума (31%) при концентрациях ФУНТ 4%, а затем уменьшается. Данный эффект связан с увеличением глубины проникновения ЭМИ в объем образца с уменьшением концентрации углеродсодержащего носителя [22].

На рис. 4 представлены концентрационные зависимости величины электрического сопротивления при постоянном токе от концентрации наполнителя для образцов серий ГПКМ-1 и ГПКМ-3.

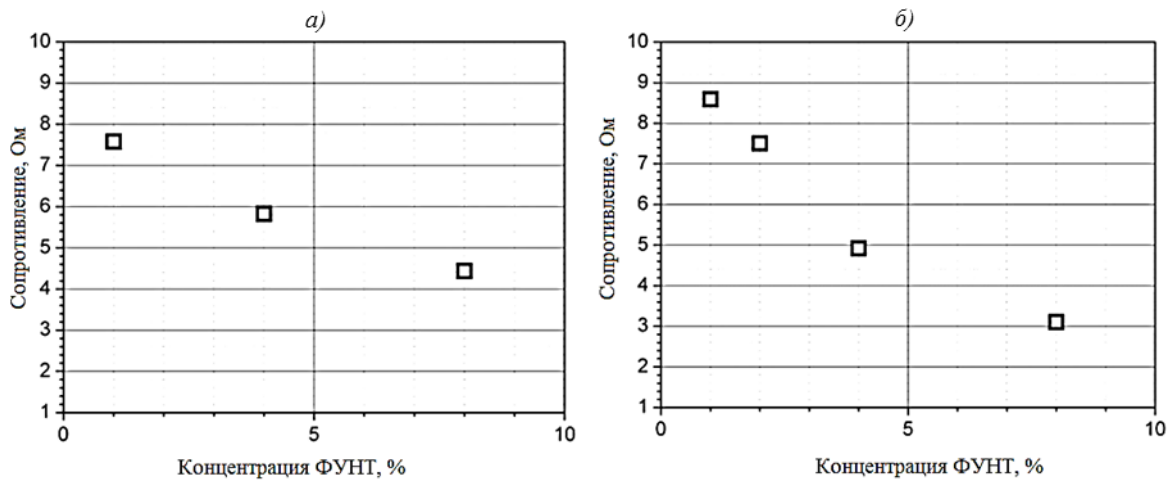


Рис. 4. Зависимость электросопротивления образцов от концентрации функционализированных углеродных нанотрубок (ФУНТ):  
 а – ГПКМ-1; б – ГПКМ-3

Характеры концентрационных зависимостей сопротивления, а также коэффициентов пропускания и отражения образцов серий ГПКМ-1 и ГПКМ-3 принципиально различны. В случае композита серии ГПКМ-1 наблюдается почти линейная зависимость исследованных параметров от концентрации, в то время как в случае композита серии ГПКМ-3 наблюдаются сильно нелинейные зависимости с пороговым характером (при концентрации 2%) и выходом на насыщение. Такой характер зависимости может проявляться в том случае, если при увеличении концентрации наполнителя в композите

серии ГПКМ-3 образуется «связная» структура проводников, при которой основной вклад в электропроводящие и электродинамические свойства начинают вносить области контакта частичек наполнителя. Такая структура является аналогом «плохого металла» и проявляет себя в увеличении коэффициента отражения и соответствующем уменьшении коэффициента пропускания. Коэффициент поглощения при этом практически не меняется (начиная с пороговой концентрации).

При отсутствии «связной» структуры частичек наполнителя (композит серии ГПКМ-2) увеличение концентрации (по крайней мере вплоть до 8%) приводит к реализации все более «плохого диэлектрика» со слабо нелинейным увеличением коэффициентов отражения и поглощения и уменьшением коэффициента пропускания.

На основании представленных данных можно сделать вывод о том, что возможной причиной различия электродинамических характеристик ГПКМ, имеющих один и тот же состав, является различная структурная организация функционального наполнителя.

Для получения информации об образовании покрытий проведено сравнительное изучение их морфологии. Для этого в чашки из алюминия налили дисперсии с разной концентрацией ФУНТ, которые использовали для получения препрегов ГПКМ.

На рис. 5 представлены данные о морфологии покрытий, которые образовались после испарения ацетона.

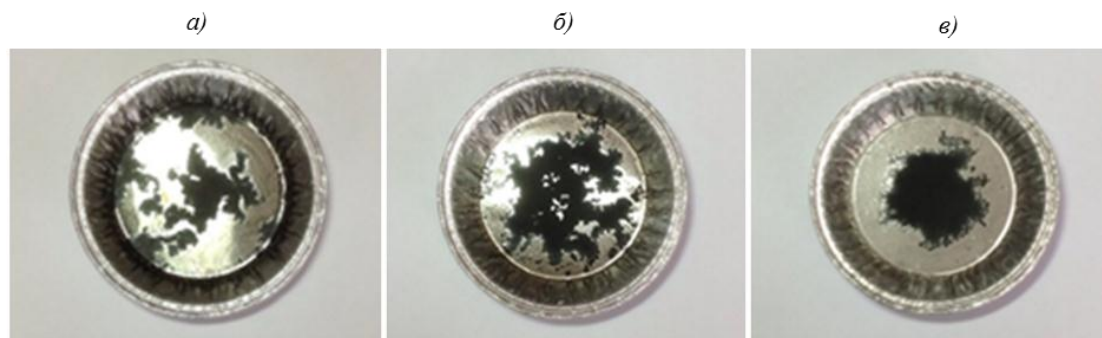


Рис. 5. Морфология покрытий после испарения ацетона из дисперсий с 2% ФУНТ:  
а – ГПКМ-1; б – ГПКМ-2; в – ГПКМ-3

Как видно из представленных фотографий, структура покрытий серий ГПКМ-1 и ГПКМ-2 имеет вид, характерный для спинодального распада дисперсий, в то время как покрытие серии ГПКМ-3 представляет собой сплошную пленку. Однако необходимо отметить, что при концентрациях ФУНТ  $\leq 3\%$  покрытие теряло сплошность, углеродные нанотрубки агрегировали в виде «червеобразных» отростков.

Различие в морфологии покрытий, вероятно, связано с различной силой взаимодействия ФУНТ/ФУНТ, ФУНТ/матрица для различных вариантов ГПКМ. В случае композита серии ГПКМ-3 силы взаимодействия между нанотрубками настолько велики, что препятствуют действию диффузионных потоков, которые возникают вследствие испарения растворителя и стремятся нарушить сплошность покрытия. В то время как более сильное взаимодействие ФУНТ/матрица в композиции серии ГПКМ-3 приводит к нарушению целостности покрытия.

Слабое взаимодействие ФУНТ с матрицей приводит к уменьшению толщины слоя полимера, который окружает нанотрубку, а следовательно, к уменьшению величины контактного сопротивления между ФУНТ и увеличению проводимости нанокompозита серии ГПКМ-3 по сравнению с композитами серий ГПКМ-1 и ГПКМ-2 [23].

Проведено сравнительное электронно-микроскопическое исследование поверхности электропроводящих покрытий серий ГПКМ-1–ГПКМ-3 (рис. 6). Как видно из представленных данных, поверхность покрытий имеет слоистую структуру. При этом



5. 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.
6. 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.
7. Краев И.Д., Образцова Е.П., Юрков Г.Ю. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 10–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S2-10-14.
8. Lubineau G., Rahaman A. A review of strategies for improving the degradation properties of laminated continuous-fiber/epoxy composites with carbon-based nanoreinforcements // *Carbon*. 2012. Vol. 50. P. 2377–2395.
9. Chakravarthi D.K., Khabashesku V.N., Vaidyanathan R. et al. Carbon Fiber–Bismaleimide Composites Filled with Nickel-Coated Single-Walled Carbon Nanotubes for Lightning-Strike Protection // *Advanced Functional Materials*. 2011. Vol. 21. P. 2527–2533.
10. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 277–286.
11. Popkov O.V., Yurkov G.Yu., Fionov A.S. Stabilization of nanoparticles on the surface of detonation nanodiamond // *Physics, chemistry and application of nanostructures* Singapore: World Scientific, 2009. P. 369–372.
12. Фионов А.С., Юрков Г.Ю., Колесов В.В. и др. Композиционный материал на основе железосодержащих наночастиц для применения в задачах электромагнитной совместимости // *Радиотехника и электроника*. 2012. Т. 57. №5. С. 597–608.
13. Таратанов Н.А., Юрков Г.Ю., Фионов А.С. и др. Молибденсодержащие наноматериалы на основе полиэтилена: получение и физические свойства // *Радиотехника и электроника*. 2009. Т. 54. №8. С. 986–995.
14. Таратанов Н.А., Юрков Г.Ю., Фионов А.С. и др. Свинцовсодержащие композиционные наноматериалы на основе полиэтилена // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2009. Т. 52. №7. С. 72–75.
15. Yurkov G.Yu., Fionov A.S., Kozinkin A.V. et al. Synthesis and physicochemical properties of composites for electromagnetic shielding applications: a polymeric matrix impregnated with iron- or cobalt-containing nanoparticles // *Journal of nanophotonics*. 2012. Vol. 6 (1). P. 061717-1-061717-21.
16. Reia da Costa E.F., Skordos A.A., Partridge I.K., Rezai A. RTM processing and electrical performance of carbon nanotube modified epoxy/fibre Composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012. Vol. 43. Issue 4. P. 593–602.
17. Garcia E.J., Wardle B.L., Hart A.J., Yamamoto N. Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown In Situ // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68. P. 2034–2041.
18. Singh B.P., Bharadwaj P., Choudhary V., Mathur R.B. Enhanced microwave shielding and mechanical properties of multiwall carbon nanotubes anchored carbon fiber felt reinforced epoxy multiscale composites // *Applied Nanoscience*. DOI: 10.1007/s13204-013-0214-0.
19. Bourlinos A.B., Georgakilas V., Boukos N. et al. Silicone-functionalized carbon nanotubes for the production of new carbon-based fluids // *Carbon*. 2007. Vol. 45. P. 1583–1595.
20. Gojny F.H., Nastalczyk J., Roslaniec Z., Schulte K. Surface modified multi-walled carbon nanotubes in CNT/epoxy-composites // *Chemical Physics Letters*. 2003. Vol. 370. P. 820–824.
21. Boehm H.P. Chemical identification of surface groups // *Advances in catalysis and related subjects*. 1996. No. 16. P. 179–274.
22. Von Hippel A.R. *Dielectric Materials and Applications*. N.Y.: The Technology Press of MIT and John Wiley and Sons, 1954. 361 p.
23. Al-Saleh M.H., Sundararaj U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites // *Carbon*. 2009. Vol. 47. 1738–1746.
24. Zeng Y., Liu P., Du J., Zhao L., Ajayan P.M., Cheng H.-M. Increasing the electrical conductivity of carbon nanotube/polymer composites by using weak nanotube–polymer interactions // *Carbon*. 2010. Vol. 48. P. 3551–3558.