

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-10-14

*И.Д. Краев<sup>1</sup>, Е.П. Образцова<sup>1</sup>, Г.Ю. Юрков<sup>1</sup>*

## ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ МАГНИТНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Рассматривается возможность применения магнитных наполнителей различной морфологии в радиопоглощающих покрытиях. Приведены результаты анализа порошковых частиц никеля разных марок и выявлены их структурные различия. Проведены экспериментальные исследования образцов на основе частиц никеля с целью определения радиопоглощающих свойств материала. Показаны зависимости коэффициента отражения данных образцов от частоты электромагнитного излучения при различных концентрациях наполнителя.*

**Ключевые слова:** радиопоглощающие материалы, магнитная проницаемость, коэффициент деполаризации, функциональные частицы, морфология, коэффициент отражения.

*The article considers a possibility of using magnetic fillers of different morphology in radar-absorbing coatings. Results of analysis of nickel powder particles of different brands are given and their structural differences have been revealed. Experimental studies of samples on a base of nickel particles were carried out aimed at determination of radar-absorbing properties of the material. Dependency of the present samples reflectance from electromagnetic radiation frequency with different concentrations of filler are shown.*

**Keywords:** radar-absorbing materials, magnetic permeability, depolarization factor, functional particles, morphology, reflectance.

<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

### Введение

Конструкционные и функциональные полимерные материалы, армированные наполнителями различной природы и морфологии, находят все большее применение во многих отраслях промышленности [1]. Среди приоритетных стратегических направлений развития материалов и технологий существенная роль отведена разработке полимерных композиционных материалов [2–4].

Радиопоглощающие полимерные покрытия (РПП) являются одним из видов функциональных композиционных материалов. Основу радиопоглощающих материалов составляют органические или неорганические вещества, в которые в качестве активного поглощающего компонента вводят порошки карбидов, графита, углеродсодержащие волокна, ферромагнитные порошки [5].

### Материалы и методы

В настоящее время при создании радиопоглощающих покрытий в качестве наполнителей магнитного типа используют карбонильное железо различных марок, а также ферриты [6]. Покрытия на основе карбонильного железа способны поглощать электромагнитные волны в достаточно широкой полосе частот в зависимости от концентрации и толщины покрытия [7]. Однако весовые характеристики радиопоглощающих покрытий достаточно велики, что в значительной степени увеличивает массу конструкции [8].

По магнитным характеристикам наиболее подходящими для создания РПП являются порошки триады железа: железо, никель, кобальт. Для обеспечения радиопоглощающих характеристик ферромагнитные частицы должны быть микро-, субмикро- или наноразмеров [9].

Еще одним основополагающим параметром частиц магнитного типа является их морфология, в частности их форма. Функциональные частицы карбонильного железа марки Р-10 имеют форму, близкую к сферической. Такая форма обеспечивает изотропию радиопоглощающих свойств [10], но в каждой отдельной частице создается относительно небольшой магнитный момент, поэтому для усиления суммарного магнитного момента, созданного всеми частицами, их объемная концентрация должна превышать 30%.

Очевидно, что для снижения массы покрытия необходимо либо изменение формы наполнителя, либо полная его замена, что подтверждено ранее проведенными работами по получению порошковых частиц, имеющих форму чешуек, объемное содержание которых сокращается на 30% и более при сохранении радиопоглощающих характеристик композиции покрытия [11]. Значение магнитной проницаемости каждой отдельной чешуйчатой частицы превышает значение магнитной проницаемости сферической частицы, что и обеспечивает снижение концентрации магнитного наполнителя в РПП.

Известно, что каждой форме частиц ферромагнитного наполнителя соответствует определенное значение ослабления внешнего электромагнитного излучения, которое характеризуется магнитным коэффициентом деполяризации. Для сферической формы частиц его значение достигает максимума и равно 0,33. Для частиц с вытянутой формой с ростом длины частицы ( $l$ ) по отношению к ее диаметру ( $d$ ) значение магнитного коэффициента деполяризации уменьшается, согласно формуле [12]:

$$K_d \approx (d/l)^2.$$

С уменьшением величины магнитного коэффициента деполяризации увеличивается результирующий магнитный момент частицы. При этом объемное содержание магнитного наполнителя с частицами вытянутой формы значительно меньше объемного содержания наполнителя другой формы при сохранении радиопоглощающих характеристик. Целью данной статьи является рассмотрение возможности снижения весовых характеристик радиопоглощающих покрытий.

В связи с исследованием влияния формы порошковых частиц магнитного типа на радиопоглощающие свойства покрытий рассмотрены четыре порошка карбонильного никеля различных марок: ПНК-1Л5, ПНК-1Л6, ПНК-1Л8(1) – зарубежного производства; ПНК-1Л8(2) – российского производства. Согласно данным рентгенофазового анализа порошков, их химический состав практически не отличается. Рентгенофазовый анализ осуществлялся на рентгеновском дифрактометре Shimadzu LabX XRD-6000 на  $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении. Рентгеновская дифракция двух порошков никеля марки ПНК-1Л8 различной формы представлена на рис. 1.

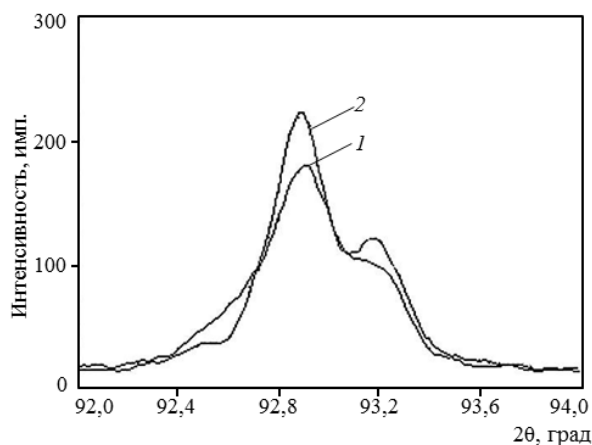


Рис. 1. Рентгеновская дифракция порошков никеля марок: 1 – ПНК-1Л8(2); 2 – ПНК-1Л8(1)

Радиопоглощающие микронаполнители невозможно исследовать стандартными методами металлографии [13]. Для характеристики формы частиц никеля в данной работе использовалась просвечивающая электронная микроскопия (электронный микроскоп JEOL JSM 6380-LA), с

помощью которой проводилось определение размеров и морфологии никелевых частиц. Микрофотографии порошковых частиц карбонильного никеля представлены на рис. 2.

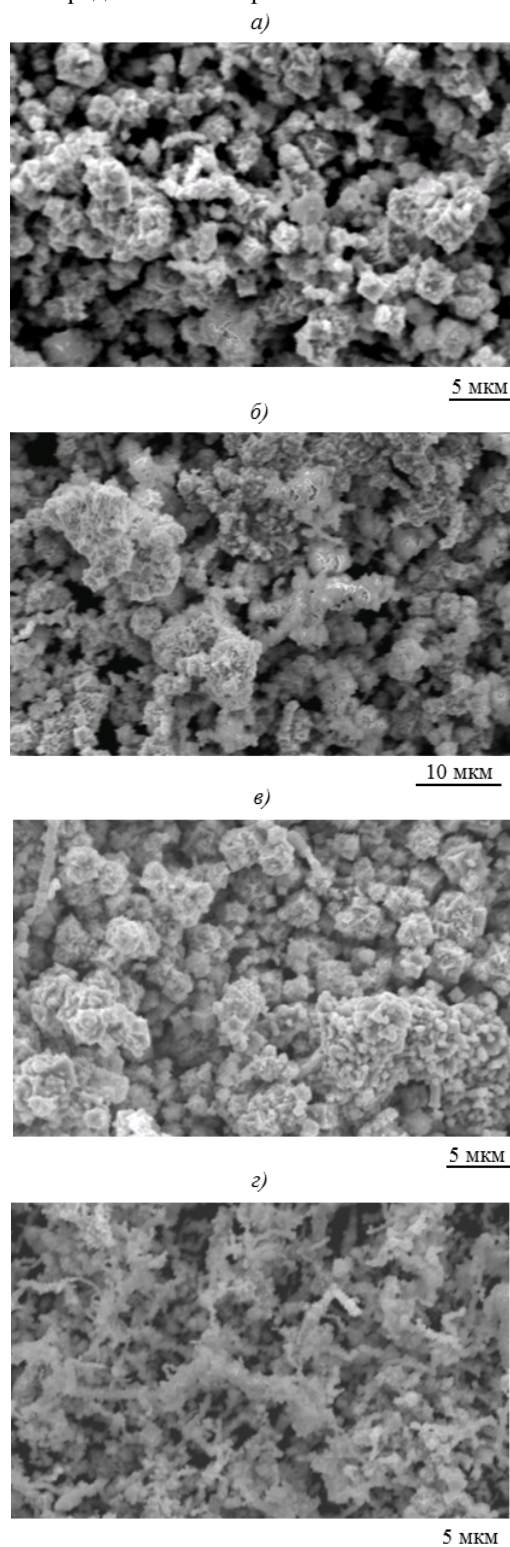


Рис. 2. Структура порошковых частиц карбонильного никеля марок: а – ПНК-1Л5; б – ПНК-1Л6; в – ПНК-1Л8(1); г – ПНК-1Л8(2)

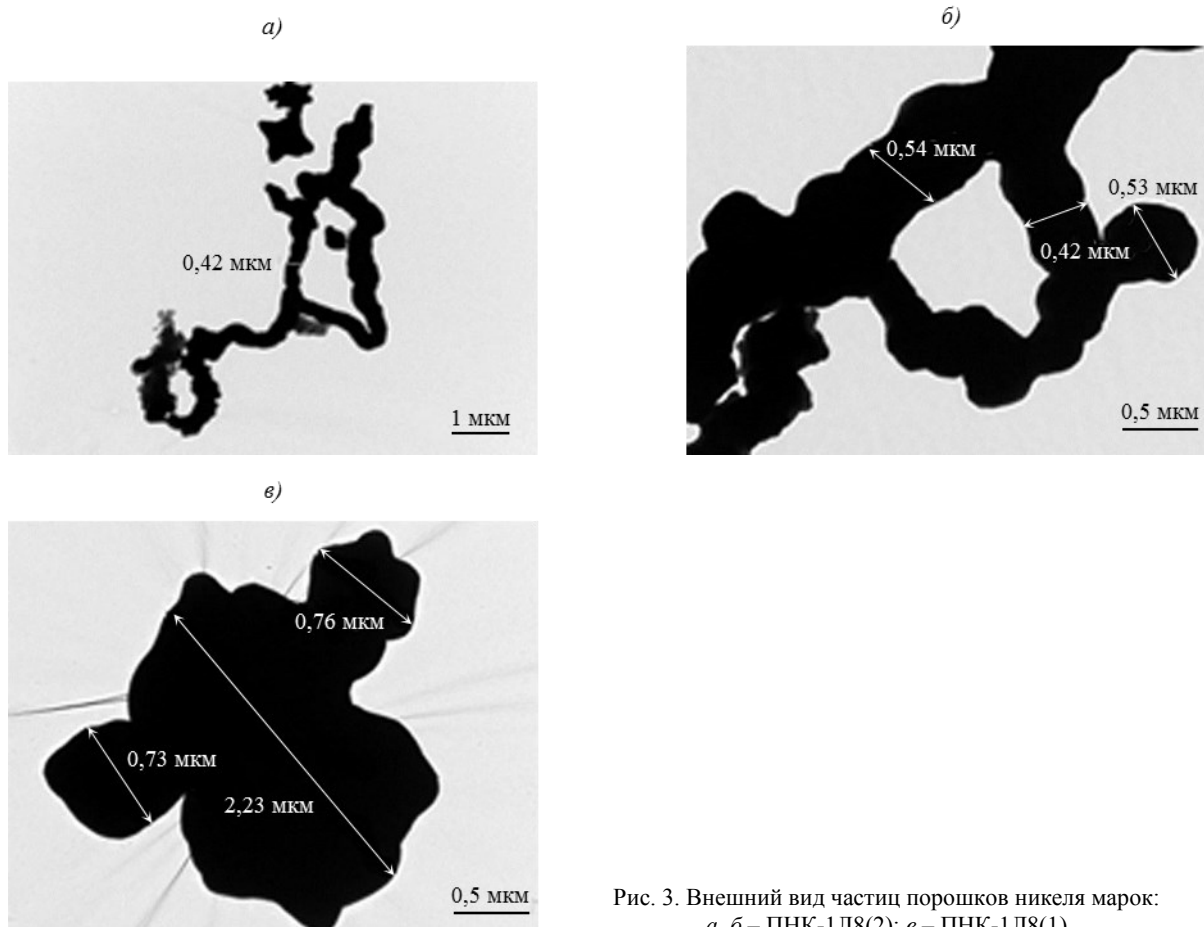


Рис. 3. Внешний вид частиц порошков никеля марок: *a, б* – ПНК-1Л8(2); *в* – ПНК-1Л8(1)

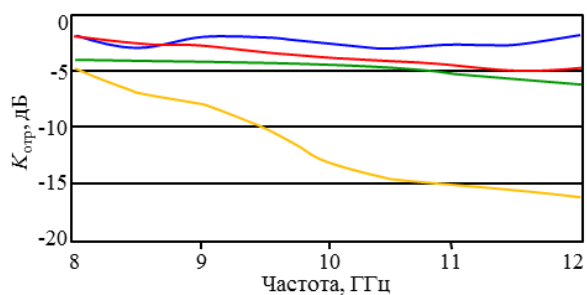


Рис. 4. Зависимость коэффициентов отражения  $K_{отр}$  от частоты электромагнитного излучения при содержании порошков карбонильного никеля не более 10% различных марок и морфологий: ПНК-1Л5 (—); ПНК-1Л6 (—); ПНК-1Л8(1) (—); ПНК-1Л8(2) (—)

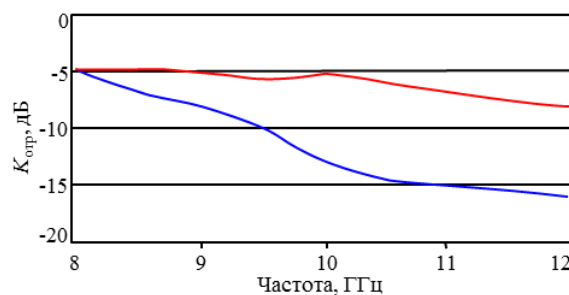


Рис. 5. Зависимость коэффициентов отражения  $K_{отр}$  от частоты электромагнитного излучения при содержании порошков карбонильного никеля марки ПНК-1Л8(2) не более 15 (—) и 10% (—)

**Значения коэффициентов отражения для экспериментальных образцов с магнитным наполнителем на основе порошков карбонильного никеля**

Наполнитель	Значение коэффициента отражения, дБ, в диапазоне частот, ГГц								
	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
С содержанием не более 10% карбонильного никеля									
ПНК-1Л5	-2	-3	-2	-2	-2,7	-3,1	-2,6	-2,8	-1,8
ПНК-1Л6	-2	-2,5	-2,8	-3,5	-3,8	-4	-4,5	-5	-4,7
ПНК-1Л8(1)	-4	-4,2	-4,2	-4,3	-4,5	-4,7	-5,3	-5,8	-6,2
ПНК-1Л8(2)	-5	-7	-8	-10	-13	-14,5	-15	-15,5	-16
С содержанием не более 15% карбонильного никеля									
ПНК-1Л5	-3	-3,3	-3,6	-4,5	-5,1	-4,8	-5,2	-5,7	-4,8
ПНК-1Л6	-4	-6	-8	-7	-7,2	-7,5	-8,5	-8,5	-8,7
ПНК-1Л8(1)	-5	-5,3	-4,6	-4,7	-5,6	-6,2	-8	-8,2	-7,9
ПНК-1Л8(2)	-5	-4,9	-5,2	-5,8	-5,4	-6,1	-6,9	-7,6	-8,2

Исходя из детального рассмотрения структуры данных порошков необходимо отметить отличительные особенности внешней формы функциональных частиц каждого вида наполнителя. Для частиц никеля марок ПНК-1Л5 и ПНК-1Л6 свойственна мелкозернистая и крупнозернистая соответственно глобулярная неравномерная форма, для порошка марки ПНК-1Л8(2) характерно наличие частиц вытянутой формы.

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных изучению вытянутых функциональных частиц, в частности аморфного магнитного микропровода, свойства которого описаны в источнике [14]. Для более точного определения формы функциональной частицы проведены дополнительные исследования с использованием просвечивающей электронной микроскопии [15]. Микрофотографии частиц двух порошков никеля марки ПНК-1Л8 представлены на рис. 3. Видно, что порошкам никеля импортного и российского производства соответствует различная форма частиц, порошковым частицам никеля марки ПНК-1Л8(2) характерна более вытянутая форма.

### Результаты

Для сравнения радиопоглощающих характеристик композитов на основе никельсодержащих наполнителей, изучаемых в работе, изготовлены экспериментальные образцы (пластины 100×100 мм) толщиной ≤0,9 мм с объемным содержанием наполнителя не более 10 и 15% функциональных частиц на основе полиуретановой матрицы. Полиуретановые покрытия получают из одно- и двухкомпонентных систем, которые способны длительно сохранять диэлектрические свойства [16].

Радиотехнические свойства данных образцов определялись на измерителе КСВН панорамном

Р2-61 с рупорной антенной с размером апертуры 80×80 мм. Значения коэффициентов отражения для образцов в полосе частот от 8 до 12 ГГц представлены в таблице.

Коэффициент отражения зависит от магнитной проницаемости, определение которой аналогично методу измерения диэлектрической проницаемости, описанному в работе [17]. Влияние магнитной проницаемости на радиопоглощающие свойства композиционных материалов описано в работе [18].

Графические зависимости коэффициентов отражения  $K_{отр}$  от частоты электромагнитного излучения для всех перечисленных образцов представлены на рис. 4 и 5. Исходя из приведенных зависимостей коэффициентов отражения от частоты следует отметить, что радиопоглощающие характеристики образцов с содержанием наполнителя ≤10% марки ПНК-1Л8(2) вытянутой структуры заметно выше тех же характеристик образцов других марок в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. Дальнейшее увеличение концентрации порошка марки ПНК-1Л8(2) неэффективно, что, вероятно, связано с ростом коэффициента отражения, о чем свидетельствует рис. 5.

Согласно результатам проведенной работы, сокращение весовых характеристик радиопоглощающих материалов возможно при использовании магнитных частиц вытянутой формы. Такая структура магнитного наполнителя позволит заметно сократить его объемное содержание в композите при сохранении радиопоглощающих характеристик.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований и написании статьи к.т.н. А.А. Ашмарину, к.ф.-м.н. С.В. Кондрашову, А.А. Беляеву.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А.И. Исследование полимерных материалов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 04 (viam-works.ru).
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
5. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 53–55.
6. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Инстр. лит. 1956. 784 с.
7. Толмасский И.С. Карбонильные ферромагнетики. М.: Металлургия. 1976. 240 с.
8. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. 1957. 256 с.
9. Yurkov G., Fionov A., Popkov O. et al. Polymer nanocomposites: synthesis and physical properties //Advances in Composite Materials. 2011. С. 6–8.
10. Розанов К.Н., Старостенко С.Н. Влияние дисперсии магнитной проницаемости на широкополосность магнитных поглотителей //Радиотехника и электроника. 2009. Т. 48. №6. С. 715–723.
11. Drmota A., Koselj J., Drofènik M., Znidarsic A. Electromagnetic wave absorption of polymeric nanocomposites based on ferrite with a spinel and hexagonal crystal structure //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 324. P. 1225–1229.
12. Тамм И.Е. Основы теории электричества. 10-е изд., испр. М.: Наука. 1989. 504 с.
13. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Тенденции развития в области комфортных покрытий для влагозащиты и электроизоляции плат печатного монтажа и элементов радиоэлектронной аппаратуры //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 50–52.
14. Старостенко С.Н., Розонов К.Н., Осипов А.В. Сверхвысокочастотные спектры композитов с упорядоченным аморфным микропроводом //Радиотехника и электроника. 2009. Т. 49. №12. С. 1500–1540.
15. Устименко Л., Хандогина Е., Владимиров Д. Наноматериалы для поглотителей электромагнитных волн и защиты информации //Компоненты и технологии. 2010. №12. С. 144–145.
16. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
17. Акатенков Р.В., Аношкин И.В., Беляев А.А. и др. Влияние структурной организации углеродных нанотрубок на радиоэкранирующие и электропроводящие свойства нанокомпозитов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 35–42.
18. 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. С. 597–608.