

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-3-183-197>
УДК 621.762:666.3–492.2:537.874



Памяти ученого

Оригинальная статья

А. Ф. Ильющенко¹, С. Г. Барай^{1*}, А. И. Лецко¹, Н. В. Насонова²

¹*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь*

**РАЗРАБОТКА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Аннотация. Показана возможность создания радиопоглощающих материалов для высокотемпературного применения путем легирования диэлектрической матрицы на основе оксида алюминия или композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ резистивными материалами на основе титана Ti-Si-C и Ti-Al-C , жаростойкими сплавами на основе железа в системах FeCrNiAl и FeSiAlTi и интерметаллидом TiAl при содержании наполнителя 10–60 мас.%. Резистивные материалы и интерметаллид синтезированы методом механоактивированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Жаростойкие сплавы получены газовым распылением расплава исходных компонентов. Легирование проводилось в планетарной шаровой мельнице. Основные рефлексные композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti-Al-C}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti-Si-C}$ идентифицированы линиями $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, МАХ-фаз Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC и Ti_3SiC_2 соответственно. Композиция $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$ содержала $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, TiO_2 и Ti_3Al . У композиций, легированных жаростойкими сплавами, кроме содержания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, установлены линии твердого раствора на основе железа $\text{Cr}_{0,03}\text{Fe}_{0,97}$ у $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrNiAl}$, а также линии $\alpha\text{-Fe}$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, TiAl и незначительно Fe_2SiO_4 у $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$. Основным параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 0,14\text{--}36,5$ мкм. Полученные радиопоглощающие материалы на основе Al_2O_3 с проводящими и магнитными наполнителями в диапазоне 8–12 ГГц характеризуются ростом диэлектрической проницаемости $\epsilon' \approx 5,6\text{--}25,0$ и $\epsilon'' \approx 0,5\text{--}7,9$ при увеличении доли наполнителя до 50–60 мас.% и достижением максимальных потерь: $\text{tg}\delta_\epsilon = 0,34$ (8,7 ГГц) и $\text{tg}\delta_\mu = 0,69 \pm 0,08$ для магнитосодержащих композиций $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ при 50 мас.% наполнителя. При концентрациях порядка 35–40 мас.% проявляются признаки перколяционного механизма усиления потерь. Разработанные композиционные материалы рекомендуется использовать в качестве радиопоглощающих покрытий, которые наносятся методами плазменного и газопламенного напыления на элементы техники, эксплуатируемые при температурах до 1000 °С.

Ключевые слова: диэлектрическая матрица, резистивные материалы, жаростойкие сплавы, интерметаллид, радиопоглощающие материалы

Благодарности: работа выполнена в рамках задания 5.4.05 «Разработка и исследование композиционных керамических эрозионностойких высокотемпературных радиопоглощающих материалов и покрытий для работы в микроволновом диапазоне частот» и задания 5.4.12 «Синтез легированных керамических радиопоглощающих материалов СВЧ диапазона и разработка процесса получения на их основе радиопоглощающих покрытий методом газотермического напыления» Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» на 2016–2020 годы, подпрограмма «Композиционные материалы».

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии доктор технических наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси А. Ф. Ильющенко.

Информация об авторах: Ильющенко Александр Федорович – доктор технических наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси, генеральный директор Государственного научно-производственного

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

объединения порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси – директор Института порошковой металлургии имени академика О. В. Романа Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0001-7848-5237>; *Барай Сергей Георгиевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий группой керамики Института порошковой металлургии имени академика О. В. Романа Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0002-4295-1416>, e-mail: baraysg@yahoo.com; *Лецко Андрей Иванович* – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института порошковой металлургии имени академика О. В. Романа Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0003-1899-3186>; *Насонова Наталья Викторовна* – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, <https://orcid.org/0009-0005-9033-3582>, e-mail: nasonovan@bsuir.by

Вклад авторов: *Ильющенко Александр Федорович* – концептуализация всей темы работы, формулировка выводов, редактирование текста рукописи; *Барай Сергей Георгиевич* – подготовка, исследование и характеристика легированных материалов, обобщение результатов и написание рукописи; *Лецко Андрей Иванович* – синтез, исследование и характеристика порошков высокотемпературных наполнителей; *Насонова Наталья Викторовна* – исследование и характеристика электромагнитных свойств композитов.

Для цитирования: Разработка радиопоглощающих материалов для высокотемпературного применения / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, А. И. Лецко, Н. В. Насонова // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 3. – С. 183–197. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-3-183-197>

Поступила в редакцию: 13.05.2026

Утверждена к публикации: 02.09.2026

Подписана в печать: 16.09.2026

In Memory of the Scientist

Original article

Aliaksandr Ph. Ilyushchanka¹, Siarhei G. Barai^{1*}, Andrey I. Letsko¹, Natalia V. Nasonova²

¹*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
41, Platonov St., 220005, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovka St., 220013, Minsk, Republic of Belarus*

DEVELOPMENT OF MICROWAVE ABSORBING MATERIALS FOR HIGH-TEMPERATURE APPLICATIONS

Abstract. The possibility of creating microwave absorbing materials for high-temperature applications by alloying a dielectric matrix based on alumina or $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ composite with resistive materials based on titanium Ti-Si-C and Ti-Al-C , heat-resistant iron-based alloys in the FeCrNiAl and FeSiAlTi systems, and the intermetallic compound TiAl with a filler content of 10–60 wt.% is demonstrated. The resistive materials and the intermetallic compound were synthesized by Mechanically Activated Self-propagating High-temperature Synthesis. The heat-resistant alloys were obtained by gas atomization of the initial components mixture. Alloying was performed in a planetary ball mill. The main reflections of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti-Al-C}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti-Si-C}$ compositions were identified by the lines of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, MAX-phases Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC and Ti_3SiC_2 , respectively. The $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$ composition contained $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, TiO_2 and Ti_3Al . In the composites alloyed with heat-resistant alloys, in addition to the $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ content, the lines of the iron-based solid solution $\text{Cr}_{0.03}\text{Fe}_{0.97}$ for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrNiAl}$, as well as the lines of $\alpha\text{-Fe}$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, TiAl and slightly Fe_2SiO_4 for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ were found. The main parameter of the particle size distribution was $d_{50} = 0.14\text{--}36.5\ \mu\text{m}$. The obtained Al_2O_3 -based MAMs with conductive and magnetic fillers in the 8–12 GHz range exhibit a concentration-driven increase of $\epsilon' \approx 5.6\text{--}25.0$ and $\epsilon'' \approx 0.5\text{--}7.9$ as the filler content rises to 50–60 wt.%, reaching maximum losses of $\text{tg}\delta_e = 0.38\text{--}0.55$ and $\text{tg}\delta_\mu = 0.69\text{--}0.80$ for magnetic $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ composites at 50 wt.% filler. At ~35–40 wt.% filler content a percolation-type loss enhancement is observed, accompanied by an increased contribution of ohmic losses. The developed composite materials are recommended for use as radar-absorbing coatings applied by plasma and gas flame spraying on equipment components operating at temperatures up to 1000 °C.

Keywords: dielectric matrix, resistive materials, heat-resistant alloys, intermetallic compound, microwave absorbing materials

Conflict of interest: the author's team includes the member of the Editorial Board Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus Aliaksandr Ph. Ilyushchanka.

Acknowledgements: the work was performed within the framework of Assignment 5.4.05 “Development and study of composite ceramic erosion-resistant high-temperature microwave absorbing materials and coatings for operation in the microwave frequency range” and Assignment 5.4.12 “Synthesis of alloyed ceramic microwave absorbing materials of the microwave range and development of a process for obtaining microwave absorbing coatings on their basis by the gas-thermal spraying method” of the State Scientific Research Program “Physical Materials Science, New Materials and Technologies” for 2016–2020, Subprogram “Composite Materials”.

Information about the authors: *Aliaksandr Ph. Ilyushchanka* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Director General at State Research and Production Powder Metallurgy Association of the National Academy of Sciences of Belarus – Director at O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0001-7848-5237>; *Sergey G. Baray* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Ceramic Group at O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-4295-1416>, e-mail: baraysg@yahoo.com; *Andrey I. Letsko* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director at O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0003-1899-3186>; *Natalia V. Nasonova* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher of Research Laboratory “Materials and Elements of Electronic and Superconducting Technology” at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, <https://orcid.org/0009-0005-9033-3582>, e-mail: nasonovan@bsuir.by

Contribution of the authors: *Aliaksandr Ph. Ilyushchanka* – conceptualization of the overall topic of the work, formulation of conclusions, editing of the manuscript; *Siarhei G. Barai* – preparation, investigation and characterization of alloyed materials, generalization of results and manuscript writing; *Andrey I. Letsko* – synthesis, investigation and characterization of filler powders; *Natalia V. Nasonova* – investigation and characterization of electromagnetic properties.

For citation: Ilyushchanka A. Ph., Barai S. G., Letsko A. I., Nasonova N. V. Development of microwave absorbing materials for high-temperature applications. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 3, pp. 183–197 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-3-183-197>

Received: 13.05.2026

Approved for publication: 02.09.2026

Signed to the press: 16.09.2026

Введение. В последние годы быстрое развитие и широкое применение микроволн для электронных и радарных систем в различных областях значительно повысило спрос на радиопоглощающие материалы (РПМ) и покрытия на их основе для уменьшения электромагнитных помех и защиты от обнаружения современными радиолокационными системами. Сложный механизм распространения и поглощения электромагнитных волн (ЭМВ), а также технологические сложности синтеза материалов с заранее заданными электрофизическими свойствами в требуемом диапазоне частот обуславливают большое разнообразие существующих РПМ [1–4].

Наиболее полно поглощение ЭМВ в микроволновом диапазоне частот достигается за счет использования материалов, которые обеспечивают сочетание всех видов потерь: диэлектрических, магнитных и потерь на проводимость. Требования к материалам-поглотителям определяются их способностью эффективно поглощать СВЧ-энергию, высокой теплопроводностью для отвода поглощенной энергии после превращения ее в тепловую, механической прочностью, структурной стабильностью, стойкостью к окислению при нагреве на воздухе и предельно высокой температурой применения.

В то же время из-за трансформации при повышенных температурах большинство магнитных материалов резко снижает или полностью теряет устойчивость к микроволновому излучению и свою поглощающую способность, что ограничивает область их применения. Чтобы преодолеть эту проблему, особое внимание уделяется разработке композиционных РПМ, содержащих проводящие частицы наполнителя, диспергированные в матрице подходящего термостойкого изоляционного материала, которые наиболее подходят для высокотемпературного применения [2; 4; 5].

Перспективными с этой точки зрения являются керметы, состоящие из диэлектрической матрицы и высокотемпературного проводника (коррозионно-стойкие материалы и сплавы с формируемым на поверхности в процессе пассивации защитным слоем в виде оксидной пленки), имеющие высокую рабочую температуру и превосходную эрозионную стойкость. Пригодность таких поглощающих материалов определяется их высокой стойкостью к окислению при нагревании на воздухе, структурной стабильностью, высокими механической прочностью и теплопроводностью, что особенно актуально для обеспечения скрытности в высокотемпературных зонах объектов различного назначения. В керметах характеристики микроволнового поглощения определяются диэлектрическими потерями в керамической матрице, магнитными потерями и потерями на проводимость в металлическом компоненте, а также многократным внутренним переотражением падающих ЭМВ [6].

Целью настоящей работы являлось создание радиопоглощающих материалов для работы в микроволновом диапазоне частот при температурах до 1000 °С.

В ходе исследований авторами решались следующие задачи:

выбрать материалы, используемые в качестве диэлектрической матрицы и высокотемпературных наполнителей при разработке радиопоглощающих керметов;

провести синтез резистивных материалов, жаростойких сплавов и интерметаллида, разработать на их основе легированные керамические материалы и исследовать их состав, структуру и электромагнитные свойства в диапазоне частот 8–12 ГГц.

Выбор материалов и методик исследований. Выбор материалов осуществляли на основе ранее разработанных принципов создания высокотемпературных композиционных материалов для поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона [7]. При разработке керметов в качестве высокотемпературного диэлектрика использовался оксид алюминия, который может обеспечить работоспособность радиопоглощающего материала до температуры 1400 °С, теплопроводность 25–30 Вт/(м · К), диэлектрическую проницаемость 9,5–9,7 и предел прочности при изгибе 260–350 МПа. Материалу присущи также относительно низкая плотность 3,6–3,8 г/см³ и высокая твердость 82–84 HRA [8]. В отдельных случаях в исходный порошок оксида алюминия добавляли диоксид титана, который является важным полупроводником и характеризуется высокой относительной диэлектрической постоянной 86–173, низкой плотностью 4,23 г/см³ и поэтому перспективен для использования в качестве диэлектрического материала для микроволнового поглощения и высокотемпературного применения (до 1100 °С) [9]. Al₂O₃ применяли в виде порошка электрокорунда марки 25А зернистостью F2000 по ТУ 3988-075-00224450-99¹, а TiO₂ – в виде рутила по ТУ 6-09-3811-79².

В качестве высокотемпературных наполнителей использовали:

1) резистивные материалы с МАХ-фазами на основе титана TiSiC и TiAlC, которые являются проводниками высокого удельного сопротивления (более $3,0 \cdot 10^{-4}$ Ом · м), имеют электропроводность $\approx 4,5 \cdot 10^6$ Ом · м⁻¹, превосходную стойкость к высокотемпературному окислению за счет пассивирования с образованием защитного оксидного слоя, состоящего из внешнего слоя на основе Al₂O₃ и TiO₂ и внутреннего слоя на основе TiO₂ и SiO₂. Они обладают малой плотностью, высокими значениями теплопроводности, прочности и достаточно стабильны при температурах до 1100 °С и выше [10; 11];

2) жаростойкие сплавы на основе железа, содержащие в своем составе хром, никель, алюминий, в некоторых случаях – титан, кремний. В связи с формированием плотного и сплошного защитного слоя оксида алюминия на поверхности сплава при воздействии высоких температур эти сплавы имеют превосходную стойкость к высокотемпературному окислению, что может быть использовано при температурах выше 1000–1200 °С. Кроме того, они обладают магнитными свойствами, обуславливающими магнитные потери РПМ [11; 12];

3) интерметаллиды – химические соединения двух или более металлов, имеющие сложную кристаллическую структуру с наличием в межатомных связях до 30 % ковалентной составляющей, что определяет их уникальные физико-механические свойства (высокие жаропрочность и жаростойкость, низкая плотность, высокая износостойкость). Среди интерметаллидных соединений значительный интерес представляет система TiAl [13].

Порошки всех наполнителей получены в Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа. Тройные соединения Ti–Si–C с МАХ-фазой Ti₃SiC₂, Ti–Al–C с МАХ-фазами Ti₃AlC₂ и Ti₃AlC, а также интерметаллид TiAl синтезированы методом механоактивированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (МАСВС). Жаростойкие сплавы FeCrNiAl и FeSiAlTi получены методом газового распыления смеси исходных компонентов. Для обеспечения требуемых свойств разрабатываемых РПМ проводили легирование диэлектрического материала различными наполнителями. Для этого в керамическую матрицу вводили

¹ ТУ 3988-075-00224450-99. Микрошлифопрошки из белого электрокорунда. URL: <https://technokeramika.ru/upload/iblock/8dc/8crtzd8myuiez05o7hmdz5fzytmteh3/TU-3988-075-00224450-99.pdf>

² ТУ 6-09-3811-79. Титан (IV) оксид для оптического стекловарения (титан (IV) окись). URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/3215265.aspx>

поглотители в виде порошков синтезированных материалов и создавали композиты матрица/наполнитель с различным соотношением компонентов. Высокое содержание наполнителя в большинстве случаев не рассматривалось, поскольку при объемном содержании его более 0,6 образуется металлический каркас, от которого ЭМВ полностью отражается.

Высокоэнергетическую механическую обработку и смешивание порошков осуществляли в планетарной шаровой мельнице PM400MA (Германия). МАСВС проводили на воздухе в шахтной печи с рабочей температурой не менее 1000 °С. В качестве поджигающего состава использовали чистый титановый порошок марки ПТОМ по ТУ 14-22-57-92¹. Дробление спека осуществляли в щековой дробилке с последующим сухим измельчением в атриторе А-4,5 и мокрым измельчением смеси в планетарной мельнице. Газовое распыление смеси исходных компонентов при получении порошков жаростойких сплавов проводили на установке вакуумной индукционной плавки JT-QWH-25KG (Китай).

Гранулометрический состав порошков и композиций определяли на приборе Mastersizer 2000 Hydro 2000S (Великобритания) методом лазерной дифракции системы; анализ химического состава порошков – на рентгенофлуоресцентном спектрометре ED 2000 (Великобритания), рентгенофазовый анализ – на дифрактометре ULTIMA IV (Япония). Морфологию и микроструктуру порошковых частиц исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа MIRA-3 (Чехия), элементный состав – на этом же микроскопе с использованием рентгеноспектрального анализатора.

Электрофизические свойства в диапазоне частот 8–12 ГГц изучали с использованием векторного анализатора цепей VNA MS4644B Anritsu (Япония) с волноводным измерительным трактом и диапазоном измерений от 10 МГц до 40 ГГц. Значения действительной и мнимой частей диэлектрической и магнитной проницаемостей определяли путем измерения векторных характеристик коэффициентов передачи и отражения волноводного тракта с образцом, установленным в измерительной ячейке. Алгоритм Николсона–Росса–Вейра использовали для извлечения электромагнитных параметров из комплексных коэффициентов отражения и передачи.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Исследование матричных порошков диэлектрических материалов. Промышленный порошок электрокорунда плавленного зернистостью F2000 состоит в основном из α - Al_2O_3 – 81,7 % и β - Al_2O_3 – 18,3 %, имеет размер частиц от 0,4 до 4,0 мкм с центром $\sim 1,0$ мкм. Основной параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 1,1$ мкм. Порошок диэлектрического материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ содержит фазы исходных компонентов: α - и β - Al_2O_3 , а также TiO_2 в форме рутила. Гранулометрический состав характеризуется содержанием частиц порошка в пределах 0,03–2,0 мкм с двумя пиками – на 0,15 и 0,70 мкм. Основной параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 0,16$ мкм. Форма частиц у порошка Al_2O_3 осколочная с четко выраженными гранями, у порошка TiO_2 – округленная, грани сглажены [9].

Исследование порошков синтезированных высокотемпературных наполнителей. При синтезе и исследовании фазового состава тройного соединения Ti–Al–C с МАХ-фазами Ti_3AlC_2 и Ti_3AlC , полученного из механоактивированной реакционной смеси состава 2Ti–1,25Al–1C, установлено, что увеличение концентрации алюминия в шихте до 25 % относительно стехиометрического приводит к образованию МАХ-фаз с общим содержанием порядка 98 %, где доли Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 составили ~ 21 и 77 % соответственно. Содержание TiC ≈ 2 % [11; 14]. Гистограмма распределения порошка с размером от 0,35 до 7,0 мкм с двумя центрами – около 0,7 мкм и 3,0 мкм. Основной параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 1,78$ мкм.

Для порошка тройного соединения Ti–Si–C, полученного из реакционной смеси 5Ti–2SiC–1C, практически все основные пики хорошо идентифицируются линиями МАХ-фазы Ti_3SiC_2 и карбида титана TiC при соотношении порядка 80 и 15 % соответственно. Отмечено также незначительное количество фазы TiSi_2 . Содержание TiC невелико, а его электропроводность ($1,6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$) ниже, чем у Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 . Поэтому основное влияние на электромагнитные характеристики оказывают МАХ-фазы. Гранулометрический состав измельченного порошка характеризуется содержанием частиц в пределах 0,03–20,0 мкм с центром на 0,45 мкм.

¹ ТУ 14-22-57-92. Порошок титановый. Технические условия. URL: <https://rostitan.com/gostyi-tu/tu-14-22-57-92>.

Основной параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 3,3$ мкм [11; 15]. Крупные зерна Ti_3SiC_2 имеют характерную ламеллярную слоистую морфологию, присущую МАХ-фазам. Слои толщиной 2,0–2,4 мкм, в свою очередь, состоят из очень тонких пластинчатых структур (чешуек) толщиной 90–130 нм [16; 17].

При синтезе порошков металлических сплавов методом распыления расплавленной смеси составляющих компонентов подбирали составы на основе железа с рекомендуемым содержанием химических элементов, чтобы обеспечить высокую температуру их применения. У порошка FeCrNiAl идентифицированы линии твердого раствора на основе железа с параметром решетки $a = 0,28852 \pm 0,000003$ нм. По угловому положению они наиболее близки к стандартным линиям $\text{Fe}_{0,97}\text{Cr}_{0,03}$. Согласно рентгенофазовому анализу содержание твердого раствора составляет 100 % [18; 19]. У порошка FeSiTiAl кроме твердого раствора на основе железа с параметром решетки $a = 0,28852 \pm 0,000007$ нм и средним размером кристаллитов ≈ 49 нм идентифицирован силицид Fe_2SiTi . Исходя из результатов рентгенофазового анализа содержание силицида составляет 27 % [20].

После синтеза у распыленных порошков нами выделена фракция менее 50 мкм, выход которой после плавки колеблется в пределах 28–38 %. Основной параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 26,3$ мкм для порошка FeCrNiAl и $d_{50} = 36,5$ мкм – для FeSiTiAl . СЭМ-морфология поперечного сечения распыленных порошков подтверждает их однофазный состав. Форма частиц близкая к сферической. Около 72 % имеют фактор формы в интервале 0,85–1,0.

При синтезе интерметаллида TiAl использовали исходные компоненты, содержащие минимальное количество примесей, чтобы обеспечить их высокую температуру применения. Основные рефлексы композиции TiAl идентифицируются линиями Titanium Aluminide (Ti_3Al) – 76 % и Aluminum Titanium ($\text{Al}_{11,1}\text{Ti}_{0,9}$) – 18 %. В незначительном количестве присутствуют Zeolite [$(\text{SiAl})\text{O}_4$] – % и Osbornite (TiN) – 1 %. То есть фактически получен интерметаллид в количестве 94 % в двух его высокотемпературных модификациях. По химическому составу порошок состоит из 86,2 % Ti и 13,8 % Al. У синтезированного порошка TiAl основной параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 0,26$ мкм [21].

Исследование порошкового легированного материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}-\text{Al}-\text{C}$ с МАХ-фазами Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC . На рис. 1, а представлена рентгенограмма порошка композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}-\text{Al}-\text{C}$ с МАХ-фазами Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC . Основные рефлексы идентифицируются линиями оксида алюминия (~ 43 %), МАХ-фаз Ti_3AlC_2 (~ 24 %) и Ti_2AlC (~ 31 %).

Гранулометрический состав композиции характеризуется содержанием частиц порошка от 0,45 до 40,0 мкм с двумя пиками по центрам на 0,8 и 5,0 мкм (см. рис. 1, б). Основным параметром распределения частиц по размерам $d_{50} = 1,9$ мкм. Форма отдельных частиц порошка осколочная с четко выраженными гранями, что характерно для корунда. Порошок содержит множество мелких частиц размером 1 мкм и менее, которые равномерно распределены по объему и в основном определяют удельную поверхность порошковой системы 0,475 м²/г. Мелкие частицы способны образовывать агломераты, которые хорошо видны на рис. 1, с, d.

В процессе исследования электрофизических свойств на примере композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}-\text{Al}-\text{C}$ показано, что диэлектрические потери возрастают с увеличением массовой доли наполнителя, что согласуется с усилением механизмов поляризации и рассеяния энергии в неоднородной среде. Из рис. 1, е видно, что в диапазоне частот 8,0–12,0 ГГц наблюдается слабо зависящее от частоты поведение диэлектрической проницаемости: действительная часть составляет $\epsilon' = 16,3 \pm 4$ %, мнимая – $\epsilon'' = 3,7 \pm 8$ %. Соответственно, значения тангенса угла диэлектрических потерь сохраняются на уровне $\text{tg}\delta \approx 0,23 \pm 10$ % (см. рис. 1, f). Относительно постоянные значения ϵ' и ϵ'' в указанной полосе частот и отсутствие выраженных релаксационных максимумов в пределах 8–12 ГГц указывают на стабильность доминирующего механизма потерь. При этом ϵ'' и $\text{tg}\delta$ являются достаточно высокими для рассматриваемого диапазона, что может быть интерпретировано как признак существенного вклада проводимости, межфазной поляризации и потерь на межфазных границах, усиливающихся при росте содержания наполнителя.

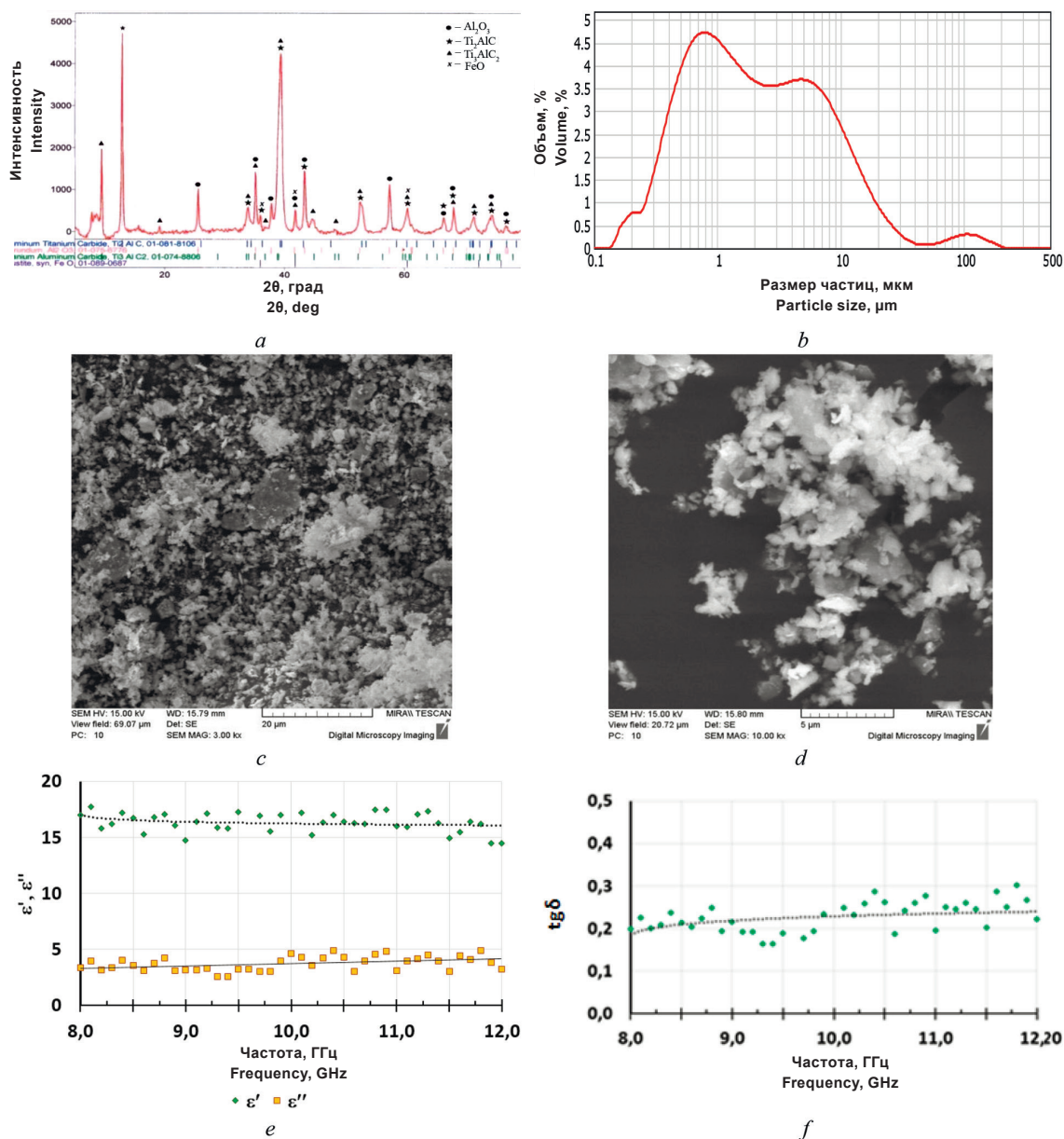


Рис. 1. Фазовый (a) и гранулометрический (b) состав, СЭМ-морфология и размер частиц (c, d), действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') части диэлектрической проницаемости (e), тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ (f) композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/50 \text{ мас.}\% \text{ Ti–Al–C}$ в диапазоне частот 8,0–12,0 ГГц

Fig. 1. XRD pattern (a) and particle size distribution (b), SEM morphology and particle size (c, d), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') permittivity (e), dielectric loss tangent $\text{tg}\delta$ (f) of the $\text{Al}_2\text{O}_3/50 \text{ wt.}\% \text{ Ti–Al–C}$ composite over frequency range 8.0–12.0 GHz

Исследование порошкового легированного материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti–Si–C}$ с MAX-фазой Ti_3SiC_2 .
 Фазовый состав легированного материала представлен на рис. 2, a. Основные рефлексы идентифицируются линиями $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, MAX-фазы Ti_3SiC_2 и TiC . Отмечены также линии фазы $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, наложенные на основную фазу $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, и линии фазы TiSi_2 . Установлено, что интенсивное измельчение композиции в процессе легирования приводит к уменьшению размера частиц порошков, что способствует фазовым превращениям, выраженным в уменьшении интенсивности и увеличении полуширины дифракционных пиков основных фаз. Необходимо также отметить, что количество TiC увеличилось, что, скорее всего, связано с разложением MAX-фазы.

Гранулометрический состав композиции (см. рис. 2, b) характеризуется содержанием частиц порошка от 0,2 мкм до 56,2 мкм с двумя пиками по центрам на 0,1 и 2,0 мкм. Основным параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 1,88 \text{ мкм}$. Микроструктура частиц композиционного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti–Si–C}$ образовалась в процессе дробления спека после MACBC-синтеза

и дальнейшего мокрого измельчения и смешивания композиции и характеризуется наличием множества мелких частиц, которые формируют отдельные конгломераты размером 15–20 мкм (см. рис. 2, *c*). EDX микроанализ (см. рис. 2, *d*) показывает распределение химических элементов композиции по спектрам 1 и 2 и подтверждает наличие основных элементов Al, Ti и Si.

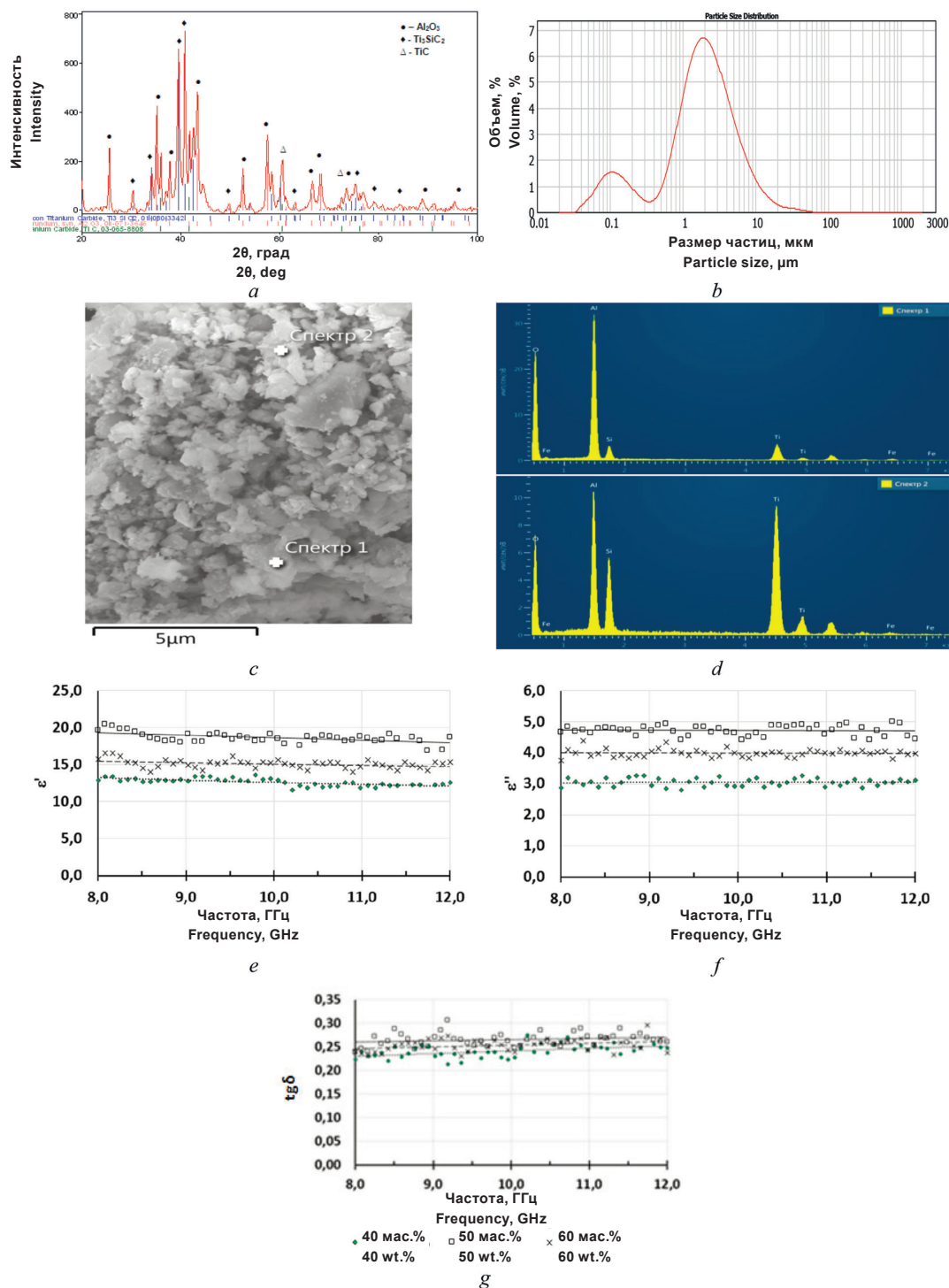


Рис. 2. Фазовый (*a*) и гранулометрический (*b*) состав, СЭМ-морфология частиц порошка (*c*), EDX спектров 1 и 2 (*d*), действительная ϵ' (*e*) и мнимая ϵ'' (*f*) части диэлектрической проницаемости, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ (*g*) композиции Al₂O₃/Ti-Si-C в диапазоне частот 8,0–12,0 ГГц

Fig. 2. XRD pattern (*a*) and particle size distribution (*b*), SEM morphology of powder particle size (*c*), EDX spectra 1 and 2 (*d*), real ϵ' (*e*) and imaginary ϵ'' (*f*) permittivity, dielectric loss tangent $\text{tg}\delta$ (*g*) of the Al₂O₃/Ti-Si-C composite over frequency range 8.0–12.0 GHz

В процессе исследования электрофизических свойств композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti-Si-C}$ с различным содержанием (40–60 мас.%) наполнителя Ti-Si-C установлено увеличение действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, что указывает на рост поляризационного отклика и потерь в исследуемой полосе частот. Для 40/50/60 мас.% получены значения $\epsilon' = 12,6 \pm 3 \text{ \%}/15,1 \pm 3 \text{ \%}/18,6 \pm 3 \text{ \%}$ и $\epsilon'' = 3,0 \pm 3 \text{ \%}/4,0 \pm 2 \text{ \%}/4,7 \pm 3 \text{ \%}$ соответственно, тогда как $\text{tg}\delta$ сохраняется на уровне 0,23–0,24 и слабо зависит от концентрации, что свидетельствует о неизменности преобладающего механизма потерь. Отсутствие заметных изменений $\text{tg}\delta$ можно объяснить тем, что система находится вблизи эффективного порога перколяции проводящих «каналов»: при повышении содержания наполнителя ϵ' и ϵ'' увеличиваются относительно пропорционально без появления нового релаксационного механизма в рассматриваемом диапазоне (см. рис. 2, g).

Исследование порошкового легированного материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrNiAl}$. На рис. 3, а представлен фазовый состав порошкового легированного керамического материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrNiAl}$. Основные рефлексы идентифицируются линиями $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (~ 61,0 %) и твердого раствора на основе железа $\text{Cr}_{0,03}\text{Fe}_{0,97}$ (~ 39,0 %). Гранулометрический состав (см. рис. 3, b) характеризуется содержанием частиц порошка от 0,3 до 100,0 мкм с пиком на 10,0 мкм. Основным параметром распределения частиц по размерам $d_{50} = 3,37$ мкм. Композиционный порошок тонкодисперсный. Большинство частиц имеют размер меньше 1,0 мкм. Мелкие частицы образуют агломераты или прилипают к крупным частицам металлического наполнителя (см. рис. 3, c). Форма частиц порошков фрагментирована с четкими краями, местами округлена. EDX анализ химического состава композиции установил (см. рис. 3, d), что более светлые – это частицы FeCrNiAl (спектры 3 и 4), более мелкие и темные – в основном частицы Al_2O_3 (спектры 1 и 2).

Как показывают результаты исследований электрофизических свойств композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/(10\text{--}50 \text{ мас.}\%) \text{FeCrNiAl}$, в диапазоне 8,0–12,0 ГГц увеличение массовой доли FeCrNiAl в композиции сопровождается ростом комплексной диэлектрической проницаемости: средние значения ϵ' возрастают с 6,04 (10 мас.%) по 24,98 (50 мас.%), а ϵ'' в целом увеличивается с 0,49 по 7,91. Таким образом, при повышении содержания наполнителя усиливаются как накопление энергии в материале (рост ϵ'), так и диссипация (рост ϵ''), причем наиболее резкое увеличение ϵ'' проявляется в области высоких концентраций (40–50 мас.%) (см. рис. 3, e). Концентрационная зависимость $\text{tg}\delta_\epsilon$ подтверждает смену режима потерь при росте массовой доли наполнителя: для 10–30 мас.% величина $\text{tg}\delta_\epsilon$ небольшая и частотные характеристики практически равномерны (примерно 0,05–0,13), тогда как при 40 мас.% наблюдается выраженный рост $\text{tg}\delta_\epsilon$ с частотой (0,12–0,25), а при 50 мас.% значения $\text{tg}\delta$ высокие, приближаются к величинам для проводников и характеристика равномерна в исследованной полосе частот ($0,32 \pm 3\%$) (см. рис. 3, f). Такое поведение характеристик согласуется с достижением эффективного порога перколяции межфазных/проводящих путей в интервале 35–40 мас.%, хотя точная оценка по этим точкам требует пересчета к объемной доле и учета морфологии наполнителя.

При проведении исследований также установлено, что близкие значения действительной магнитной проницаемости наблюдаются во всем исследованном диапазоне частот, в то время как значения мнимой части магнитной проницаемости существенно повышаются с увеличением концентрации наполнителя из-за более высоких магнитных потерь, обусловленных механизмом спиновой релаксации и вихревыми токами при воздействии внешнего электромагнитного поля. Таким образом, значения тангенса угла магнитных потерь (до 0,6) оказываются выше у образца, содержащего 50 мас.% магнитного сплава [19].

Исследование порошкового легированного материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$. На основании рентгенофазового анализа (рис. 4, a) установлено, что основные рефлексы идентифицируются линиями $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (~ 50,0 %), $\alpha\text{-Fe}$ (~ 44,0 %), а также интерметаллида TiAl (~ 1,0 %) и соединения железа–гематита (~ 3,0 %) и незначительно фаялита Fe_2SiO_4 . Анализ гранулометрического состава показывает содержание частиц порошка в интервале от 0,03 до 20,0 мкм с тремя пиками – на 0,13 мкм, 0,7 и 7–8 мкм (см. рис. 4, b). Основным параметром распределения частиц по размерам $d_{50} = 0,17$ мкм. Все мелкие частицы образуют конгломераты или налипают на более крупные. Частицы имеют разветвленную форму с заостренными краями.

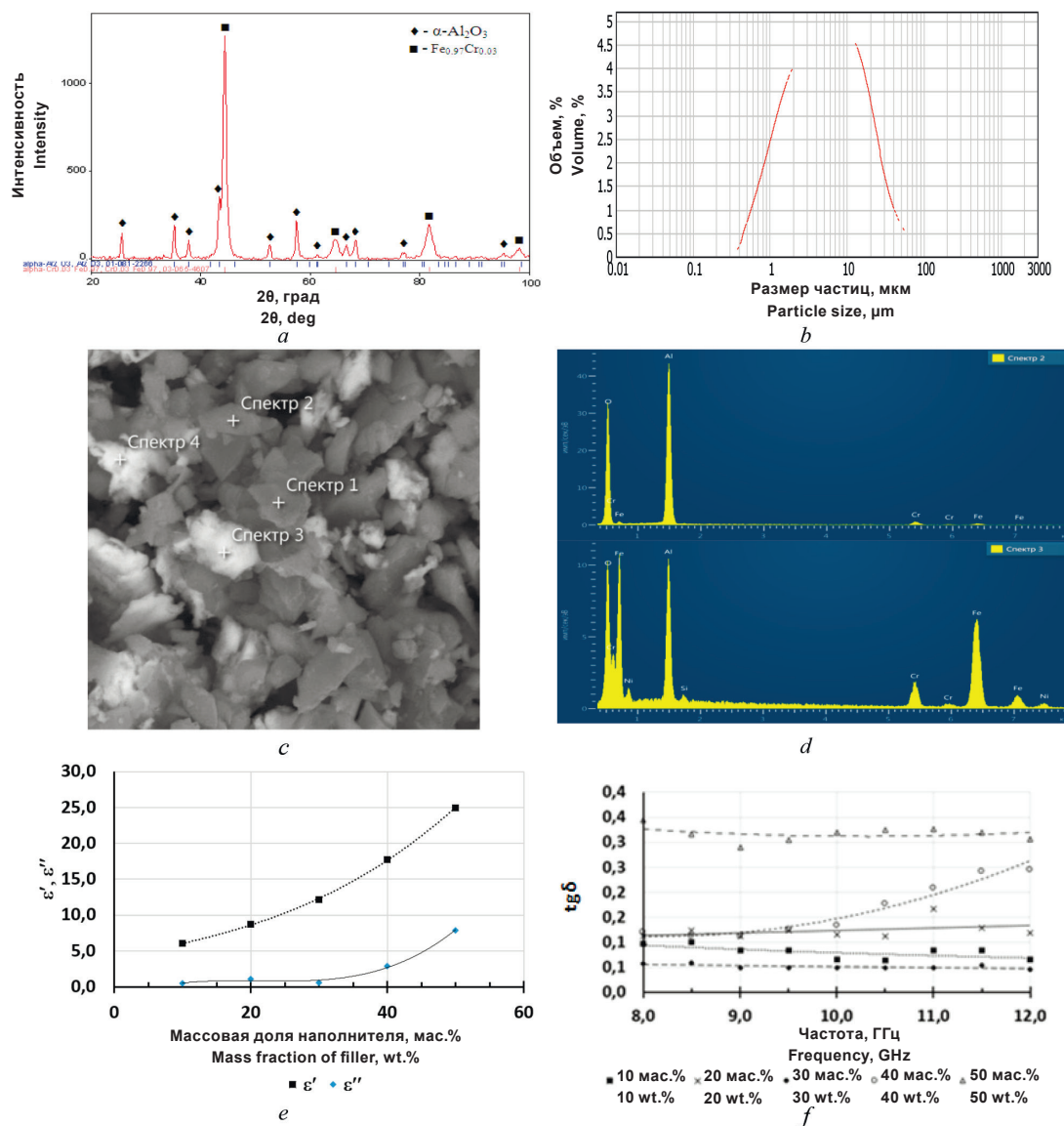


Рис. 3. Фазовый (а) и гранулометрический (b) состав, СЭМ-морфология частиц порошка (c), EDX спектров 2 и 3 (d), действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') части диэлектрической проницаемости (e), тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ (f) композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrNiAl}$ в диапазоне частот 8,0–12,0 ГГц

Fig. 3. XRD pattern (a) and particle size distribution (b), SEM morphology of powder particle size (c), EDX spectra 2 and 3 (d), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') permittivity (e), dielectric loss tangent $\text{tg}\delta$ (f) of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrNiAl}$ composite over frequency range 8.0–12.0 GHz

При исследовании электромагнитных характеристик материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ установлено, что в диапазоне 8,0–12,0 ГГц средние значения комплексной диэлектрической проницаемости возрастают с увеличением доли наполнителя с 10 до 50 мас.%. ϵ' увеличивается с $5,57$ по $23,47 \pm 8\%$, а ϵ'' – с $0,68$ по $7,75 \pm 8\%$; наиболее выражен рост диэлектрических потерь в области 40–50 мас.% (см. рис. 4, c). Это согласуется с гетерофазной структурой материала, в которой проводящая и магнитная компоненты наполнителя диспергированы в диэлектрической керамической матрице Al_2O_3 с развитой межфазной поверхностью и широким распределением размеров частиц, что интенсифицирует межфазные эффекты и повышает уровень поглощения электромагнитной энергии. Действительная часть магнитной проницаемости μ' изменяется от $1,05$ до $1,38 \pm 11\%$, а ее мнимая часть μ'' – от $0,17$ до $0,94 \pm 11\%$, что отражает усиление магнитного отклика по мере увеличения концентрации FeSiTiAl . Наличие магнитной составляющей обеспечивает дополнительный механизм потерь, что в совокупности с диэлектрическими потерями повышает потенциальную эффективность радиопоглощения в СВЧ-диапазоне [20].

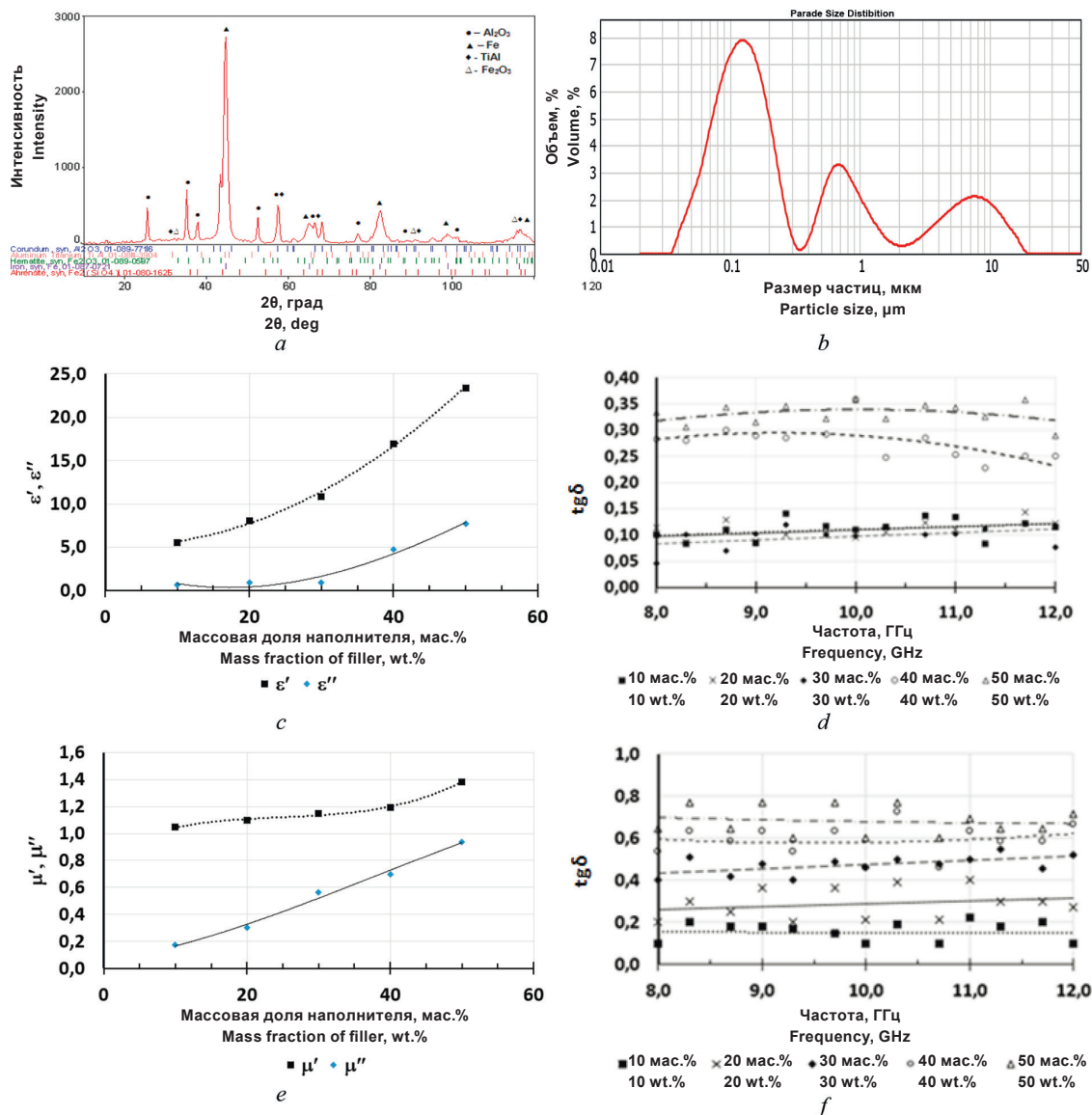


Рис. 4. Фазовый (a) и гранулометрический (b) состав, действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') части диэлектрической проницаемости (c), действительная (μ') и мнимая (μ'') части магнитной проницаемости (e), тангенс диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta_\epsilon$) (d) и тангенс магнитных потерь ($\text{tg}\delta_\mu$) (f) композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ в диапазоне частот 8,0–12,0 ГГц

Fig. 4. XRD pattern (a) and particle size distribution (b), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') permittivity (c), real (μ') and imaginary (μ'') permeability (e), dielectric loss tangent ($\text{tg}\delta_\epsilon$) (d) and magnetic loss tangent $\text{tg}\delta_\mu$ (f) of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ composite over frequency range 8.0–12.0 GHz

Частотные зависимости тангенса диэлектрических потерь характеризуются двумя участками: при 10–30 мас.% значения $\text{tg}\delta_\epsilon$ находятся на уровне $0,1 \pm 0,04$ без выраженной дисперсии, тогда как при 40–50 мас.% $\text{tg}\delta_\epsilon$ выше ($0,3 \pm 0,06$) (см. рис. 4, d). Тангенс магнитных потерь $\text{tg}\delta_\mu$ (см. рис. 4, f) монотонно возрастает с концентрацией и достигает $0,68 \pm 0,08$ для 50 мас.% (при 10 мас.% порядка $0,16 \pm 0,06$).

Совокупность результатов по электрофизическим и магнитным характеристикам исследованной композиции указывает на вероятное прохождение перколяционного перехода при увеличении доли FeSiTiAl: в области 40–50 мас.% наблюдается согласованное увеличение ϵ'' , μ'' и рост $\text{tg}\delta_\epsilon$ и $\text{tg}\delta_\mu$, что характерно для формирования связной сети проводящей фазы и резкого увеличения вклада межфазной поляризации и эффективной проводимости. Аналогичные закономерности для композитов данного класса отмечались ранее в [12; 20; 22]. Вероятный интервал порога перколяции располагается между 30 и 40 мас.%.

Исследование порошкового легированного материала $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$. На основании рентгенофазового анализа (рис. 5, *a*) установлено, что основные рефлексы композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$ идентифицируются линиями $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (~ 41,0 %), TiO_2 (~ 13,0 %), Ti_3Al (~ 43,0 %), то есть композиция максимально содержит альфа-оксид алюминия и алюминид титана. Анализ гранулометрического состава (см. рис. 5, *b*) показывает содержание частиц порошка в интервале от 0,03 до 12,0 мкм с тремя центрами – на 0,12 мкм, 0,7 и 5,0 мкм. Основным параметр распределения частиц по размерам $d_{50} = 0,14$ мкм. Частицы имеют разветвленную форму с заостренными краями (см. рис. 5, *c*). EDX микроанализ (см. рис. 5, *d*) показывает распределение химических элементов по спектрам 1 и 4 и подтверждает наличие основных элементов Al, Ti и O. Более светлые частицы на рисунке – это TiAl , более мелкие и темные – Al_2O_3 .

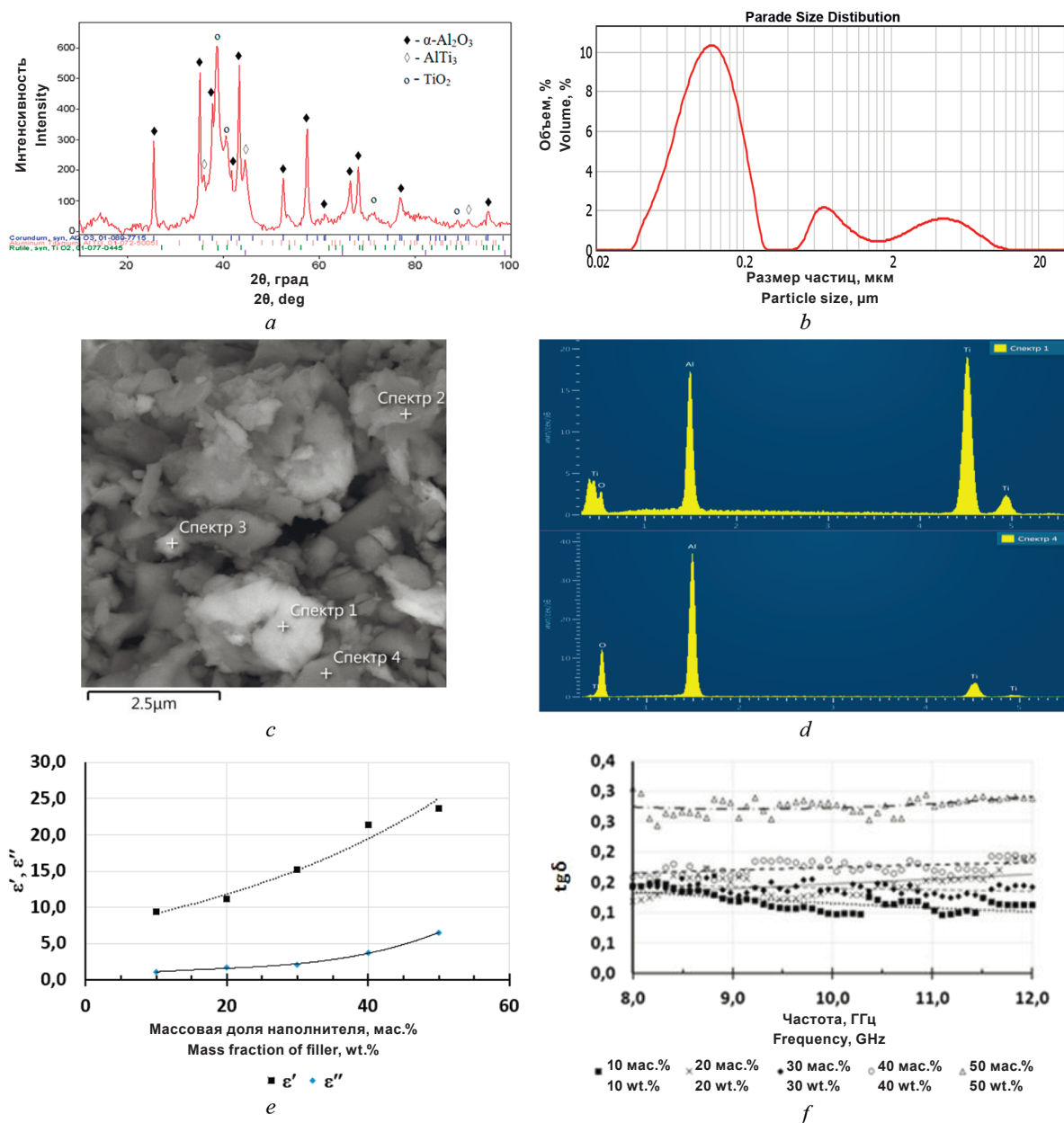


Рис. 5. Фазовый (*a*) и гранулометрический (*b*) состав, СЭМ-морфология частиц порошка (*c*), EDX спектров 1 и 4 (*d*), действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') части диэлектрической проницаемости (*e*), тангенс диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) (*f*) композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$ в диапазоне частот 8,0–12,0 ГГц

Fig. 5. XRD pattern (*a*) and particle size distribution (*b*), SEM morphology of powder particle size (*c*), EDX spectra 1 and 4 (*d*), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') permittivity (*e*), dielectric loss tangent ($\text{tg}\delta$) (*f*) of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$ composite over frequency range 8.0–12.0 GHz

Как показали результаты исследований для композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$, в диапазоне 8,0–12,0 ГГц фиксируется рост комплексной диэлектрической проницаемости при увеличении содержания TiAl: ϵ' возрастает с 9,34 (10 мас.%) по 23,62 (50 мас.%), а ϵ'' – с 1,09 по 6,52, причем наиболее существенное усиление потерь наблюдается в диапазоне 40–50 мас.% (3,72–6,52) (см. рис. 5, е). Такая динамика согласуется с формированием и уплотнением квазипроводящей сетки включений и приближением к перколяционному режиму, когда вклад эффективной проводимости и межфазной поляризации на границах фаз резко возрастает, что приводит к ускоренному росту ϵ'' при высоких долях наполнителя.

Поведение $\text{tg}\delta$ в полосе 8–12 ГГц подтверждает концентрационно обусловленное усиление потерь: при 10–40 мас.% значения $\text{tg}\delta$ находятся в диапазоне порядка 0,10–0,19, тогда как при 50 мас.% $\text{tg}\delta$ выше и составляет 0,24–0,30 с умеренной частотной дисперсией (см. рис. 5, ф). Это указывает на возрастание вклада механизмов омических потерь, что проявляется синхронным ростом ϵ'' и $\text{tg}\delta$.

Заключение. Показано, что композиционные материалы на основе диэлектрической матрицы из Al_2O_3 и композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, легированные резистивными материалами с МАХ-фазами на основе титана Ti–Si–C и Ti–Al–C, жаростойкими сплавами на основе железа в системах FeCrNiAl и FeSiAlTi, интерметаллидом TiAl могут применяться в качестве радиопоглощающих материалов для работы в микроволновом диапазоне частот. Установлено, что зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в диапазоне частот 8–12 ГГц носят концентрационно обусловленный характер и составляют $\epsilon' \approx 5,6\text{--}25,0$; $\epsilon'' \approx 0,5\text{--}7,9$, $\mu' \approx$ от 1,05 до $1,38 \pm 11\%$, μ'' – от 0,17 до $0,94 \pm 11\%$. Максимальные диэлектрические и магнитные потери зафиксированы для композиции $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ при 50 мас.% наполнителя и составляют $\text{tg}\delta_\epsilon = 0,38$ (8,7 ГГц) и $\text{tg}\delta_\mu = 0,69 \pm 0,08$. Признаки перколяционного механизма усиления потерь проявляются при концентрациях порядка 35–40 мас.% и связаны с ростом омической составляющей.

Разработанные РПМ рекомендуется использовать в качестве радиопоглощающих покрытий, наносимых методами плазменного и газопламенного напыления на элементы техники, эксплуатируемые при температурах до 1000 °С.

Список использованных источников

1. Saville, P. Review of radar absorbing materials. Technical memorandum DRDC Atlantic TM 2005-003 / P. Saville. – Dartmouth, Nova Scotia: Defence R&D Canada – Atlantic, 2005. – URL: <https://scispace.com/pdf/review-of-radar-absorbing-materials-2bqlhud4r2.pdf>
2. Research Progress of High Temperature Absorbing Materials / Jun-Jie Xu, Ling Wang, Xiao-Meng Wang, Hai-Peng Qiu // *Advanced Ceramics*. – 2024. – Vol. 45, № 3. – P. 189–205. <https://doi.org/10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2024.03.001>
3. Research Progress on Nanostructured Radar Absorbing Materials / Yanmin Wang, Tingxi Li, Lifeng Zhao [et al.] // *Energy and Power Engineering*. – 2011. – Vol. 3, № 4. – P. 580–584. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.34072>
4. Characterization and performance evaluation of radar absorbing materials / S. Padhy, S. Sanyal, R. S. Meena [et al.] // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2013. – Vol. 27, iss. 2. – P. 191–204. <https://doi.org/10.1080/09205071.2013.743447>
5. Kaur, R. Review on Microwave Absorbing Material using Different Carbon Composites / R. Kaur, G. D. Aul // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. – 2014. – Vol. 3, iss. 5. – P. 160–167.
6. Grechko, L. G. Dielectric function of aggregates of small metallic particles embedded in host insulating matrix / L. G. Grechko, V. N. Pustovit, K. W. Whites // *Applied Physics Letters*. – 2000. – Vol. 76. – P. 1854–1856. <https://doi.org/10.1063/1.126190>
7. Ильющенко, А. Ф. Научные подходы к созданию радиопоглощающих материалов СВЧ диапазона для работы при повышенных температурах / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Н. В. Насонова // *Порошковая металлургия: респ. сб. науч. тр.* – Мн.: Бел. наука, 2014. – Вып. 37. – С. 6–13.
8. Балкевич, В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
9. Структура и свойства порошкового радиопоглощающего материала в системе $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$ / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Е. В. Жук [и др.] // *Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–11 сент. 2020 г.* – Мн.: Бел. наука, 2020. – С. 357–363.
10. Сметкин, А. А. Свойства материалов на основе МАХ-фаз (обзор) / А. А. Сметкин, Ю. К. Майорова. – Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 120–137. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2015.4.09>
11. Выбор и исследование высокотемпературных наполнителей порошковых радиопоглощающих материалов / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Е. В. Жук [и др.] // *Порошковая металлургия: респ. сб. науч. тр.* – Мн.: Бел. наука, 2017. – Вып. 40. – С. 31–41.

12. Plasma sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$ composite coatings for electromagnetic wave absorption application / Liang Zhou, Wancheng Zhou, Jinbu Su [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258, iss. 7. – P. 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.119>
13. Гринберг, Б. А. Интерметаллиды Ni_3Al и TiAl : микроструктура, деформационное поведение / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 358 с.
14. Возможность использования MAX-фаз при создании радиопоглощающих материалов / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, А. И. Лецко, Н. В. Насонова // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы докл. 12-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 мая 2016 г. – Мн.: Бел. наука, 2016. – С. 68–71.
15. Разработка и исследование порошкового радиопоглощающего материала в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Е. В. Жук [и др.] // Порошковая металлургия: респ. сб. науч. тр. – Мн.: Бел. наука, 2018. – Вып. 41. – С. 41–45.
16. Preparation of Ti-Si-C System and their Ceramic Composite Coatings using Gas Flame Spraying for High Temperature Microwave Absorbing Applications / A. Ph. Ilyushchanka, S. G. Baray, A. I. Letsko [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 405. – Art. ID 126631 (10 p.). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126631>
17. Effect of Ti_3SiC_2 addition on microwave absorption property of $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{cordierite}$ coatings / Jinbu Su, Wancheng Zhou, Yi Liu [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 270. – P. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03021>
18. Использование жаростойкого сплава в качестве поглотителя ЭМИ микроволнового диапазона / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Е. В. Жук [и др.] // Порошковая металлургия: респ. сб. науч. тр. – Мн.: Бел. наука, 2019. – Вып. 42. – С. 27–35.
19. High-temperature-resistant, mechanically stable $\text{FeCrNiAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$ thermally sprayed thick ceramic coatings for stealth applications over X-band / A. Ph. Ilyushchanka, S. G. Baray, A. I. Letsko [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 24, iss. 10. – Art. ID 2200169 (12 p.). <https://doi.org/10.1002/adem.202200169>
20. Composition $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ for High Temperature Microwave Absorbing Application / A. Ph. Ilyushchanka, S. G. Baray, A. I. Letsko [et al.] // *Proceeding of the Euro PM2021 virtual Congress and Exhibition*, 18–22 October 2021. – 2021. – P. 201–206.
21. Разработка и исследование высокотемпературного радиопоглощающего материала $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiAl}$ / А.Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, А. И. Лецко [и др.] // Порошковая металлургия: респ. сб. науч. тр. – Мн.: Бел. наука, 2019. – Вып. 42. – С. 93–100.
22. Dielectric and microwave absorption properties of low power plasma sprayed $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3$ coatings / Liang Zhou, Fa Luo, Shan Cui, Yong Zhang // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2015. – Vol. 26. – P. 3853–3860. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2911-9>

References

1. Saville P. *Review of radar absorbing materials. Technical memorandum DRDC Atlantic TM 2005-003*. Dartmouth, Nova Scotia Defence R&D Canada – Atlantic, 2005. Available at: <https://scispace.com/pdf/review-of-radar-absorbing-materials-2bqlhud4r2.pdf>
2. Jun-Jie Xu, Ling Wang, Xiao-Meng Wang, Hai-Peng Qiu. Research Progress of High Temperature Absorbing Materials. *Advanced Ceramics*, 2024, vol. 45, no. 3, pp. 189–205. <https://doi.org/10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2024.03.001>
3. Yanmin Wang, Tingxi Li, Lifeng Zhao, Zuwang Hu, Yijie Gu. Research Progress on Nanostructured Radar Absorbing Materials. *Energy and Power Engineering*, 2011, vol. 3, no. 4, pp. 580–584. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.34072>
4. Padhy S., Sanyal S., Meena R. S., Chatterjee R., Bose A. Characterization and performance evaluation of radar absorbing materials. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, vol. 27, iss. 2, pp. 191–204. <https://doi.org/10.1080/09205071.2013.743447>
5. Kaur R., Aul G. D. Review on Microwave Absorbing Material using Different Carbon Composites. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol. 3, iss. 5, pp. 160–167.
6. Grechko L. G., Pustovit V. N., Whites K. W. Dielectric function of aggregates of small metallic particles embedded in host insulating matrix. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 76, pp. 1854–1856. <https://doi.org/10.1063/1.126190>
7. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Nasonova N. V. Scientific approaches to the creation of microwave absorbing materials for operation at elevated temperatures. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers.]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, iss. 37, pp. 6–13 (in Russian).
8. Balkevich V. L. *Technical Ceramics*. Moscow, Stroyisdat Publ., 1984. 256 p. (in Russian).
9. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Zuk E. V., Letsko A. I., Reutenok Yu. A., Nasonova N. V. Structure and properties of microwave absorbing material in the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{TiAl}$ system. *Poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka: materialy 14-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 9–11 sentyabrya 2020 g.* [Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding: Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference, Minsk, September 9–11, 2020]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2020, pp. 357–363 (in Russian).
10. Smetkin A. A., Mayorova Yu. K. Properties of MAX-based materials (review). *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 120–137 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2015.4.09>

11. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Zuk E. V., Letsko A. I., Talako T. L., Jasenovitch A. S. Selection and investigation of high-temperature fillers for powder microwave absorbing materials. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, iss. 40, pp. 31–41 (in Russian).
12. Liang Zhou, Wancheng Zhou, Jinbu Su, Fa Luo, Dongmei Zhu, Yanli Dong. Plasma sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$ composite coatings for electromagnetic wave absorption application. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 258, iss. 7, pp. 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.119>
13. Grinberg B. A., Ivanov M. A. *Intermetallic Compounds Ni_3Al and TiAl : Microstructure, Deformation Behavior*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2002. 358 p. (in Russian).
14. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Letsko A. I., Nasonova N. V. The possibility of using MAX phases in the creation of radio-absorbing materials. *Novye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka: materialy dokladov 12-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 25–27 maya 2016 g.* [New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding: Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference, Minsk, May 25–27, 2016]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, pp. 68–713 (in Russian).
15. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Zuk E. V., Letsko A. I., Jasenovitch A. S., Nasonova N. V. Development and investigation of powder microwave absorbing material in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}_3\text{SiC}_2$ system. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2018, iss. 41, pp. 41–45 (in Russian).
16. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Letsko A. I., Talako T. L., Manoila Y. D., Janu Y., Chaudhary D., Chauhan V. S., Saini L., Patra M. K. Preparation of Ti–Si–C System and their Ceramic Composite Coatings using Gas Flame Spraying for High Temperature Microwave Absorbing Applications. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 405, art. ID 126631 (10 p.). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126631>
17. Jinbu Su, Wancheng Zhou, Yi Liu, Yuchang Qing, Fa Luo, Dongmei Zhu. Effect of Ti_3SiC_2 addition on microwave absorption property of $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{cordierite}$ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 270, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.021>
18. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Zuk E. V., Nasonova N. V., Puhir G. A. Using a heat-resistant alloy as an microwave absorber. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, iss. 42, pp. 27–35 (in Russian).
19. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Letsko A. I., Talako T. L., Manoila Y. D., Janu Y., Chauhan V. S., Patra M. K., Saini L. High-temperature-resistant, mechanically stable $\text{FeCrNiAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$ thermally sprayed thick ceramic coatings for stealth applications over X-band. *Advanced Engineering Materials*, 2022, vol. 24, iss. 10, art. ID 2200169 (12 p.). <https://doi.org/10.1002/adem.202200169>
20. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Letsko A. I., Patra M. K., Saini L. Composition $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeSiTiAl}$ for High Temperature Microwave Absorbing Application. *Proceeding of the Euro PM2021 virtual Congress and Exhibition, 18–22 October 2021*. 2021, pp. 201–206.
21. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Letsko A. I., Reutenok Yu. A., Nasonova N. V. Development and investigation of high-temperature microwave absorbing material $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAl}$. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, iss. 42, pp. 93–100 (in Russian).
22. Liang Zhou, Fa Luo, Shan Cui, Yong Zhang. Dielectric and microwave absorption properties of low power plasma sprayed $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3$ coatings. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, vol. 26, pp. 3853–3860. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2911-9>