

Оригинальная статья

УДК 678.01;537.86;538.9

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-2(56)-9-18

МИКРОВОЛНОВЫЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОНАПОЛНЕННОГО СИЛИКОНОВОГО КОМПОЗИТА SILCOTIN 25/P-10 С НАНОПОРОШКОМ SiO_2 (ТАРКОСИЛ)

© 2026 г. И. А. Южаков, Б. З. Гармаев, Д. Г. Цыдыпов, А. В. Номоев

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (670047, Россия, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

Аннотация. Радиопоглощающие материалы для электромагнитной совместимости и снижения отражений электромагнитных волн используются в радиоэлектронной аппаратуре. При практическом применении материалов в виде покрытий и прокладок важно учитывать механические свойства вследствие возможных совместных изменений микроволновых и механических характеристик. Исследовано влияние введения нанопорошка диоксида кремния (таркосила) на микроволновые характеристики и реологические свойства высоконаполненного композита на основе силиконового связующего SilcoTin 25 и микрочастиц карбонильного железа марки Р-10. Образцы изготовлены по методике получения высоконаполненных композитов с содержанием 80 мас. % микропорошка Р10, ранее апробированной для различных марок карбонильного железа. Микроволновые измерения выполнены методом прохождения/отражения в коаксиальной ячейке по S -параметрам с вычислением коэффициентов отражения, прохождения и поглощения в режиме «на просвет» слоя толщиной 2 мм без металлической подложки. Диапазон частотных измерений составляет 0,5 – 18,0 ГГц. Показано, что введение таркосила (1 – 3 мас. %) в композит с микропорошком Р10 приводит к неоднозначной перестройке баланса поглощения, отражения и прохождения. При умеренном изменении поглощения наблюдается рост отражения. По частотным зависимостям комплексных значений диэлектрической ϵ^* и магнитной μ^* проницаемостей рассчитаны диэлектрический и магнитный тангенсы угла потерь, а также модуль нормированного импеданса. Показано, что рост отражения связан преимущественно с ухудшением импедансного согласования при сохранении значительных магнитных потерь. Реологические испытания при деформации сдвига 0,001 – 1,000 % выявили рост комплексных динамических модулей сдвига. Введение таркосила повышает модуль сдвига высоконаполненного композита с микропорошком Р10, причем наиболее выраженный рост наблюдается при введении 1 и 2 мас. % нанопорошка таркосил, что интерпретировано как структурирование системы полимер – SiO_2 – СР, связанное с изменением согласования и коэффициента отражения. Наиболее вероятно, происходит усиление межфазных взаимодействий в композите. Такая микроструктурная перестройка, вероятно, усиливает межфазную поляризацию типа Максвелла – Вагнера – Силларса и проявляется в изменении комплексной диэлектрической проницаемости и импедансного согласования слоя.

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы, карбонильное железо Р10, таркосил, S -параметры, импедансное согласование, реология

Для цитирования: Южаков И.А., Гармаев Б.З., Цыдыпов Д.Г., Номоев А.В. Микроволновые и реологические свойства высоконаполненного силиконового композита SilcoTin 25/P-10 с нанопорошком SiO_2 (таркосил). *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;2(56):9–18. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-9-18)

*Original article***MICROWAVE AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HIGH-LOADED SILCOTIN 25/R-10 SILICONE COMPOSITE WITH SiO₂ NANOPOWDER (TARKOSIL)**

© 2026 I. A. Yuzhakov, B. Z. Garmaev, D. G. Tsydypov, A. V. Nomoev

Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Sakhyanovoy Street 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation)

Abstract. Radio-absorbing materials for electromagnetic compatibility and reduction of electromagnetic wave reflections are used in radio electronic equipment. In the practical application of materials in the form of coatings and gaskets, it is important to take into account the mechanical properties due to possible joint changes in microwave and mechanical characteristics. The effect of the introduction of silicon dioxide (tarkosil) nanopowder on the microwave characteristics and rheological properties of a highly filled composite based on the silicone binder SilcoTin 25 and microparticles of carbonyl iron grade P-10 has been studied. The samples were made according to the method of obtaining highly filled composites with a content of 80 wt. % of micro-powder P10, previously tested for various grades of carbonyl iron. Microwave measurements were performed using the transmission/reflection method in a coaxial cell using S-parameters with the calculation of reflection, transmission, and absorption coefficients in the "lumen" mode of a 2 mm thick layer without a metal substrate. The frequency measurement range is 0.5 – 18.0 GHz. It has been shown that the administration of tarkosil (1 – 3 wt. %) in a composite with micro-powder P10 leads to an ambiguous restructuring of the balance of absorption, reflection and transmission. With a moderate change in absorption, an increase in reflection is observed. The dielectric and magnetic tangents of the loss angle, as well as the modulus of the normalized impedance, are calculated from the frequency dependences of the complex values of the dielectric ϵ^* and magnetic μ^* permittivity. It is shown that the increase in reflection is mainly associated with a deterioration in impedance matching while maintaining significant magnetic losses. Rheological tests with a shear strain of 0.001 – 1,000 % revealed an increase in complex dynamic shear modulus. The introduction of tarkosil increases the shear modulus of a highly filled composite with micro-powder P10, with the most pronounced increase observed with the introduction of 1 and 2 wt. % of the tarkosil nanopowder, which is interpreted as structuring of the polymer – SiO₂ – CIP system associated with a change in matching and reflection coefficient. Most likely, there is an increase in interphase interactions in the composite. Such a microstructural rearrangement probably enhances Maxwell – Wagner – Sillars type interphase polarization and manifests itself in a change in the complex dielectric constant and impedance matching of the layer.

Keywords: microwave absorber, carbonyl iron R10, complex permittivity, complex permeability, S-parameters, impedance matching, rheology

For citation: Yuzhakov I.A., Garmaev B.Z., Tsydypov D.G., Nomoev A.V. Microwave and rheological properties of highly filled silicone composite SilcoTin 25/P-10 with SiO₂ nanopowder (tarkosil). *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;2(56):9–18. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-9-18)

Введение

Разработка радиопоглощающих материалов для задач электромагнитной совместимости и снижения отражений электромагнитных волн в радиоэлектронной аппаратуре остается актуальным [1]. В качестве магнитного наполнителя широко применяются микрочастицы карбонильного железа (CIP), обеспечивающие значимый вклад магнитных потерь μ'' в СВЧ-диапазоне; при этом эффективность поглощения определяется совместно внутренними потерями и импедансным согласованием (attenuation + impedance matching) [2]. На примере CIP-эластомеров показано, что изменение содержания CIP влияет на электромагнитные параметры и коэффициенты поглоще-

ния/отражения, но достижение низкого отражения требует согласования величин диэлектрической $\epsilon^*(f)$ и магнитной $\mu^*(f)$ проницаемостей, зависящих от частоты f [3 – 5]. Для силиконовых систем продемонстрировано, что введение дополнительной фазы (например, графитовых пластинок) может перестраивать параметр $\epsilon^*(f)$ и рабочую полосу поглощения, однако чувствительность к микроструктуре и согласованию возрастает [6]. Учитывая практическое применение в виде покрытий и прокладок, важны также механические свойства: микроволновые и механические характеристики CIP-покрытий могут изменяться совместно вследствие изменения структуры и межфазных взаимодействий [7].

Ранее для высоконаполненных силиконовых композитов с различными марками карбонильного железа показана возможность получения повышенных значений комплексной магнитной проницаемости и существенных коэффициентов поглощения при слабой проводимости образцов, что создает основу для дальнейшей оптимизации состава [8]. Однако для тонких слоев (порядка нескольких миллиметров) существует ограничение толщина – полоса, что усиливает роль импедансного согласования и описывается оценкой [9]. Введение диэлектрических нанодобавок оксидов SiO_2 рассматривается как инструмент управления межфазной поляризацией и эффективной величиной $\epsilon^*(f)$, а через это согласованием. SiO_2 -покрытия на СІР могут изменять микроволновые характеристики и отражательные потери [10], а в теплостойких матрицах SiO_2 -модификация влияет на электромагнитные свойства и стабильность композитов [11]. Вместе с тем действие эффекта определяется микроструктурой и параметрами слоя.

Несмотря на значительное число публикаций по СВЧ-поглощению полимерных композитов с микрочастицами карбонильного железа [2 – 7] и по SiO_2 -модификации карбонильного железа [10; 11], не выявлены работы, в которых рассматривали влияние нанокремнезема (таркосила) в высоконаполненной системе SilcoTin 25/P-10 с одновременной оценкой электродинамических и реологических характеристик.

Тангенс угла потерь и импедансное согласование

Проведены измерения коэффициентов прохождения СВЧ – излучения t_c , отражения r_c и поглощения a_c высоконаполненных силиконовых композитов с микрочастицами карбонильного железа с содержанием 80 мас. % в диапазоне частот 0,1 – 18,0 ГГц (рис. 1). Комплексные значения $\epsilon^*(f)$ и $\mu^*(f)$ извлекали из S-параметров методом Nicolson – Ross – Weir. При интерпретации результатов учитывали ограничения этого метода, включая неоднозначности извлечения параметров и чувствительность к толщине образца, фазовому набегу и потерям в материале [12 – 15]. Аналогичные закономерности для композитов на основе карбонильного железа в широкой полосе частот описаны в работе [16]. Контрольный образец без таркосила измерен в диапазоне частот 0,1 – 6,0 ГГц. Оценочные интервалы диэлектрического $\tan\delta_e$ и магнитного $\tan\delta_m$ тангенса угла потерь и модуля нормированного импеданса $|Z/Z_0|$ для исследованных композитов представлены в таблице. Для модифицированных композитов $\tan\delta_m$ остается высоким во всем диапазоне,

тогда как $\tan\delta_e$ чувствителен прежде всего к изменению параметра диэлектрических потерь ϵ'' , связанным с межфазной поляризацией. Наиболее заметное уменьшение модуля нормированного импеданса характерно для образцов с содержанием 1 и 2 мас. % таркосила, что и приводит к росту отражения при сопоставимом уровне поглощения.

На частоте 6 ГГц модуль нормированного импеданса составляет около 0,49 для контрольного состава без таркосила, около 0,38 для образцов с 1 и 2 мас. % таркосила и примерно 0,44 для сплава с 3 мас. % таркосила. Следовательно, составы с 1 и 2 мас. % таркосила демонстрируют наибольшее ухудшение согласования импеданса с воздухом, что соответствует росту коэффициента отражения (рис. 1). Для образцов с 2 мас. % таркосила дополнительно наблюдается локальный максимум $\tan\delta_e$ в области 9 – 10 ГГц, связанный с ростом параметра ϵ'' , однако этого оказывается недостаточно для компенсации ухудшения согласования.

Реология и связь с электродинамическим откликом

Амплитудные зависимости модулей сдвига $G'(\gamma)$ и $G''(\gamma)$ для композита P10 без нанодобавки и с содержанием 1, 2 и 3 мас. % таркосила представлены на рис. 2. Для силиконовой матрицы величина G' в диапазоне $\gamma \approx 0,04 – 10,00$ % уменьшается примерно от $3 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^3$ Па, а параметр G'' – от 10^4 до $2 \cdot 10^3$ Па. Для композита P10 без таркосила величина G' снижается примерно от $9 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$ Па при изменении параметра γ от 0,001 до 1,000 %, а введение таркосила приводит к росту как действительной, так и мнимой части модуля сдвига. Для составов с 1 и 2 мас. % таркосила значения G' близки и уменьшаются примерно от 1,5 до 1,0 МПа, тогда как величина G'' возрастает примерно от $2 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$ Па. Для образцов с 3 мас. % таркосила параметр G' находится в интервале 0,5 – 0,8 МПа в том же диапазоне деформации. Сравнение выполняли в области малых деформаций, где влияние проскальзывания на результат минимально.

Таким образом, введение таркосила повышает модуль сдвига высоконаполненного композита с порошком P10, причем наиболее выраженный рост наблюдается при 1 и 2 мас. % нанодобавки. Это свидетельствует о структурировании системы и усилении межфазных взаимодействий в композите. В области малых деформаций композит с таркосилом значения G' и G'' увеличиваются по сравнению с композитом без нанодобавки, что указывает на структурирование системы и усиление межфазных взаимодействий

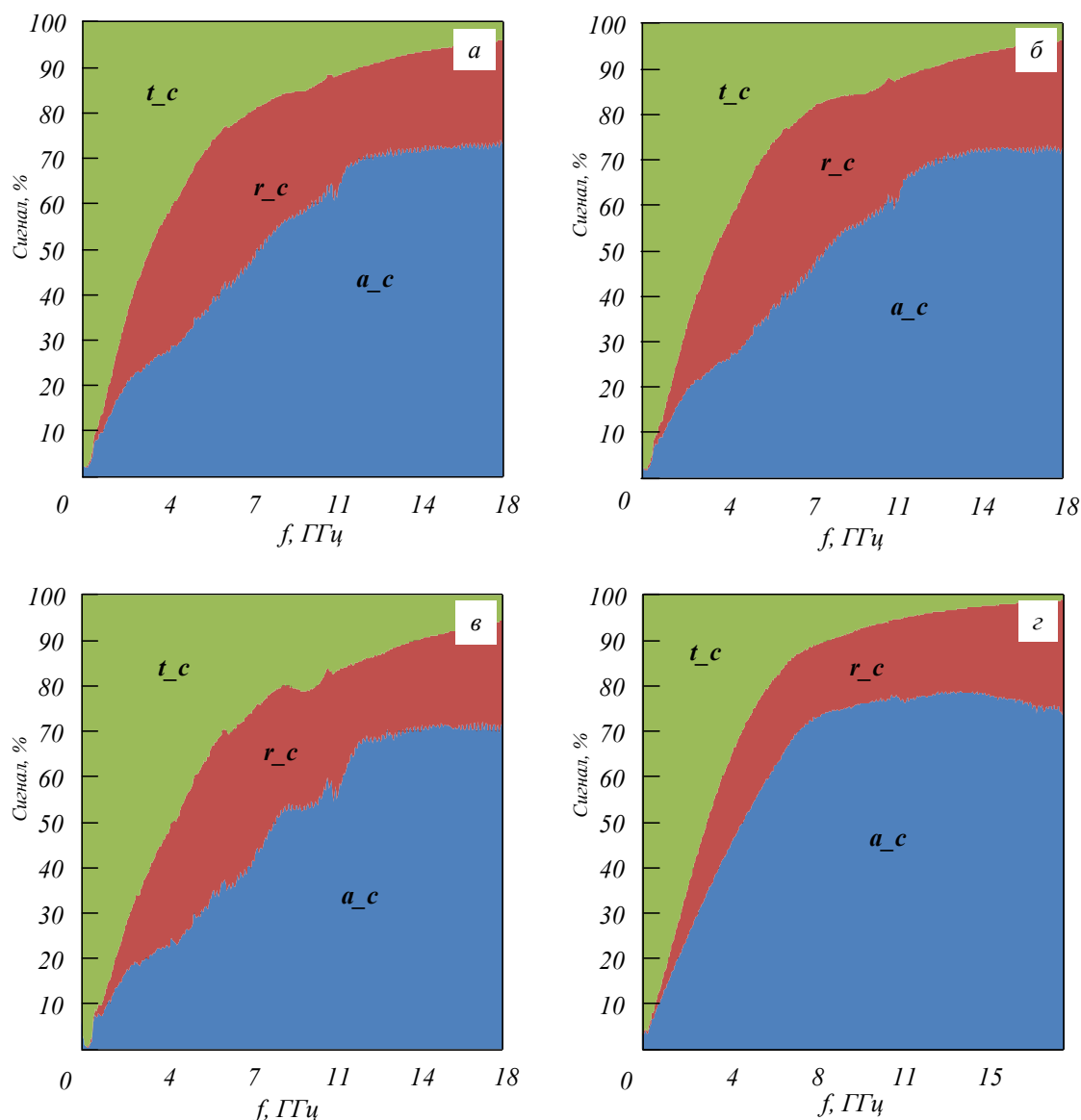


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициентов прохождения t_c , отражения r_c и поглощения a_c для композитов SilcoTin 25/P-10:
 а – в – 1, 2, 3 мас. % таркосила; г – увеличенный фрагмент низкочастотной области (0 – 5 ГГц) с добавлением контрольного состава без таркосила

Fig. 1. Frequency dependences of the transmission coefficients t_c , reflection r_c and absorption a_c for SilcoTin 25/P-10:
 а – в – 1, 2, 3 wt. % tarkosil; г – enlarged fragment of the low-frequency region (0 – 5 GHz) with the addition of the control composition without tarkosil

полимер – SiO_2 – СІР. Силанольные группы на поверхности диоксида кремния обеспечивают многоочаговую адсорбцию силоксановых цепей и образование слоя связанного силикона с пониженной сегментной подвижностью. В условиях конденсационного отверждения часть межфазных контактов может закрепляться химически посредством реакций конденсации с образованием связей $\text{SiO}_2 - \text{O} - \text{Si}$ (полимер), что повышает адгезию на границе раздела и стабилизирует вторичную структуру оксида SiO_2 . Дополнительно соединение SiO_2 выступает межфазным

модификатором в системе с СІР: за счет взаимодействия силанольных групп с гидроксильной поверхностью частиц железа формируются гибридные мостики СІР – SiO_2 – матрица (включая водородные и возможные локальные $\text{Fe} - \text{O} - \text{Si}$ связи), что улучшает диспергирование СІР, снижает склонность к агрегации и усиливает межфазные взаимодействия. Совокупность указанных процессов приводит к росту доли связанного полимера, формированию пространственной структуры, изменению диэлектрических потерь и импедансного согласования композита в СВЧ-диапазоне.

Оценочные интервалы диэлектрического и магнитного тангенса угла потерь и модуля нормированного импеданса для исследованных композитов
Estimated ranges of dielectric and magnetic loss tangent and normalized impedance modulus for the studied composites

Содержание таркосила, мас. %	Диапазон частот, ГГц	$\tan \delta_e = \epsilon''/\epsilon'$	$\tan \delta_m = \mu''/\mu'$	$ Z/Z_0 $
0	0,5 – 6,0	0,03 – 0,06	0,18 – 0,55	0,49 – 0,63
1	0,5 – 18,0	0,02 – 0,13	0,32 – 1,28	0,38 – 0,49
2	0,5 – 18,0	0,01 – 0,30	0,35 – 1,06	0,36 – 0,51
3	0,5 – 18,0	0,09 – 0,19	0,30 – 1,39	0,42 – 0,59

Пр и м е ч а н и е. Для образцов с 1 – 3 мас. % таркосила интервалы рассчитаны по экспериментальным зависимостям $\epsilon^*(f)$ и $\mu^*(f)$ (рис. 2, 3). Для контрольного состава (без таркосила) использованы данные ранее исследованной системы SilcoTin 25/P10 [8].

Подобная совместная чувствительность механических и микроволновых характеристик к структуре композиции отмечалась для СІР-покрытий на эпокси-силиконовой основе [7]. В настоящей работе реологический результат является независимым подтверждением микро-структурной перестройки, способной изменить эффективные величины ϵ^* , μ^* и импедансное согласование, что проявляется ростом коэффициента отражения r_c при сопоставимом уровне потерь. Снижение модулей при деформациях выше 1 % обусловлено началом проскальзывания образца в измерительной системе.

Введение наноразмерного таркосила в высоконаполненную систему на основе двухкомпонентного силиконового компаунда SilcoTin 25 с микрочастицами карбонильного железа может приводить к структурированию наполненной матрицы и увеличению доли развитой межфазной области, что согласуется с ростом модулей G' и G'' (рис. 2). Такая микро-структурная перестройка, вероятно, усиливает межфазную поляризацию Максвелла – Вагнера – Силларса [17 – 21] и проявляется изменением комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(f) = \epsilon'(f) - j\epsilon''(f)$ (рис. 3) и импедансного согласования слоя.

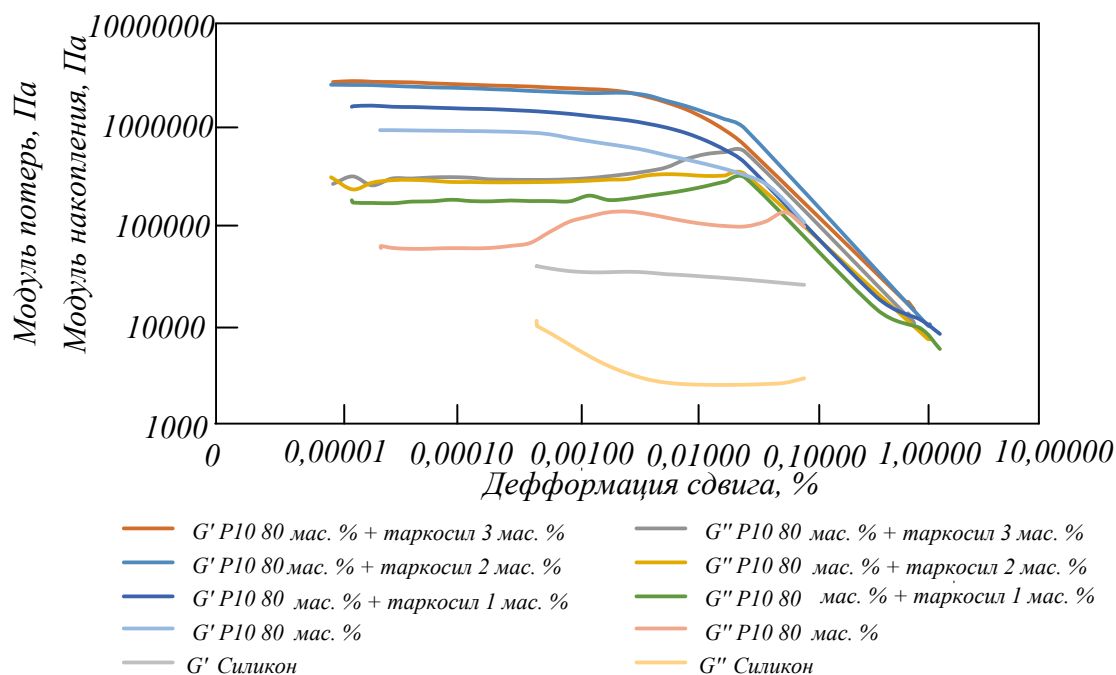


Рис. 2. Амплитудные зависимости модулей сдвига $G'(\gamma)$ и $G''(\gamma)$ (Anton Paar, RheoCompass) для композита P10 без нанодобавки и композита с содержанием 1, 2 и 3 мас. % таркосила; область малых деформаций используется для сравнения степени структурирования материала
 Fig. 2. Amplitude dependences of the shear moduli $G'(\gamma)$ and $G''(\gamma)$ (Anton Paar, RheoCompass) for the R10 composite without nanoadditives and the composite with a content of 1, 2 and 3 wt. % tarcosil; the region of small deformations is used to compare the degree of structuring of the material

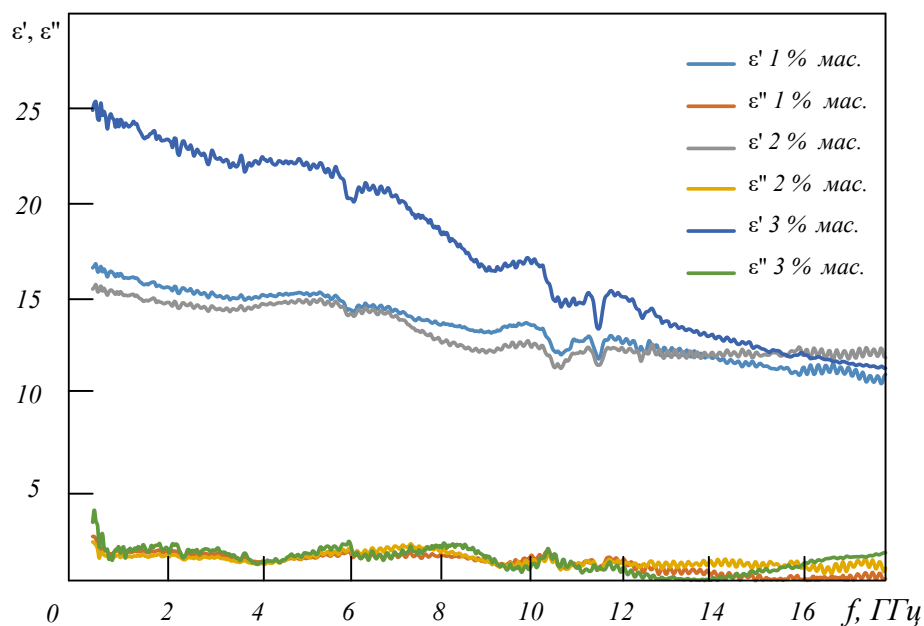


Рис. 3. Частотные зависимости действительной $\epsilon'(f)$ и мнимой $\epsilon''(f)$ частей комплексной диэлектрической проницаемости композитов SilcoTin 25/P10 с 1 – 3 мас. % таркосила

Fig. 3. Frequency dependences of the real $\epsilon'(f)$ and imaginary $\epsilon''(f)$ parts of the complex permittivity of SilcoTin 25/P10 composites with 1 – 3 wt. % tarkosil

Отражение определяется степенью импедансного согласования с воздухом. Нормированный волновой импеданс слоя при нормальном падении описывается соотношением $|Z/Z_0| = |\mu^*(f)/\epsilon^*(f)|$. При увеличении $|\epsilon^*(f)|$ и сравнительно меньшем изменении $|\mu^*(f)|$ величина $|Z/Z_0|$ уменьшается, то есть материал становится более «емкостным» и сильнее отличается от воздуха по волновому сопротивлению. Это ухудшает согласование на границе воздух – материал и повышает долю отраженной энергии. Рассматриваемая тенденция подтверждается рассчитанными значениями $\tan\delta$ и $|Z/Z_0|$ (см. таблицу).

Рост потерь в материале, характеризуемый тангенсами угла потерь $\tan\delta_e = \epsilon''/\epsilon'$ и $\tan\delta_m = \mu''/\mu'$, не гарантирует увеличения эффективного поглощения если величина $|Z/Z_0|$ заметно меньше единицы (см. таблицу), значительная часть падающей волны отражается уже на входной поверхности и не проникает в объем слоя. Поэтому физико-химическое структурирование за счет формирования развитой межфазной области в системе SilcoTin 25 – SiO_2 – CIP может приводить к увеличению отражения именно через электродинамический механизм ухудшения импедансного согласования: усиление межфазной поляризации повышает параметр $|\epsilon^*|$ (рис. 3), тогда как рост величины $|\mu^*|$ (рис. 4) оказывается недостаточным для компенсации, что проявляется в снижении нормированного импеданса $|Z/Z_0|$ и, соответственно, в росте отражательной составляющей (см. таблицу).

Выводы

Показано, что введение нанопорошка таркосила в высоконаполненный силиконовый композит SilcoTin 25/P10 с содержанием 80 мас. % микрочастиц карбонильного железа приводит к выраженному структурированию материала по реологическим данным (рост параметров G' и G''), а также к неоднозначной перестройке микроволнового баланса $t_{c/r_c/a_c}$ для свободностоящего слоя толщиной 2 мм без металлической подложки. Расчет тангенса угла потерь и нормированного импеданса показал, что для модифицированных составов магнитные потери остаются высокими, однако модуль $|Z/Z_0|$ уменьшается по сравнению с исходным композитом без таркосила, особенно для образцов с 1 и 2 мас. % таркосила. Это указывает на ухудшение импедансного согласования как на основной механизм роста отражения. Наиболее близкие к контрольному составу значения $|Z/Z_0|$ среди модифицированных образцов получены для 3 мас. % таркосила, что согласуется с более низким коэффициентом отражения по сравнению с составами 1 и 2 мас. % таркосила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девин К.Л., Агафонова А.С., Соколов И.И. Перспективы применения радиопоглощающих материалов для обеспечения электромагнитной совместимости бортового радиоэлектронного оборудования. *Труды ВИАМ*. 2020;8(90):94–100.

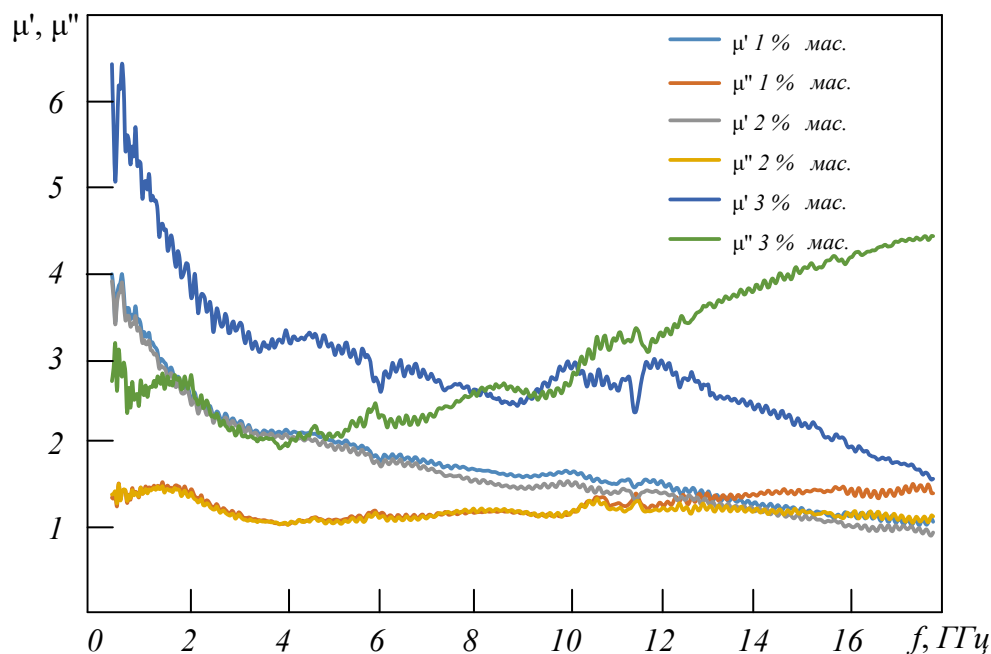


Рис. 4. Частотные зависимости действительной $\mu'(f)$ и мнимой $\mu''(f)$ частей комплексной магнитной проницаемости композитов SilcoTin 25/P10 с 1 – 3 мас. % таркосила

Fig. 4. Frequency dependences of the real $\mu'(f)$ and imaginary $\mu''(f)$ parts of the complex magnetic permeability of SilcoTin 25/P10 composites with 1 – 3 wt. % tarkosil

- <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-8-94-100>
- Sista K.S., Dwarapudi S., Kumar D., Sinha G.R., Moon A.P. Carbonyl iron powders as absorption material for microwave interference shielding: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;853:157251.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157251>
 - Feng Y.-B., Qiu T., Shen C.-Y., Li X.-Y. Electromagnetic and absorption properties of carbonyl iron/rubber radar absorbing materials. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2006;42(3):363–368.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.862763>
 - Duan Y., Li G., Liu L., Liu S. Electromagnetic properties of carbonyl iron and their microwave absorbing characterization as filler in silicone rubber. *Bulletin of Materials Science*. 2010;33:633–636.
<https://doi.org/10.1007/s12034-010-0096-7>
 - Gama A.M., Rezende M.C. Complex permeability and permittivity variation of carbonyl iron rubber in the frequency range of 2 to 18 GHz. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2010;2(1).
<https://doi.org/10.5028/jatm.v2i1.43>
 - Xu Y., Zhang D., Cai J., Yuan L., Zhang W. Microwave absorbing property of silicone rubber composites with added carbonyl iron particles and graphite platelet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013;327:82–86.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.09.045>
 - Qing Y., Zhou W., Luo F., Zhu D. Microwave-absorbing and mechanical properties of carbonyl-iron/epoxy-silicone resin coatings. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2009;321(1):25–28.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.07.011>
 - Номоев А.В., Гармаев Б.З., Агутов Е.Б., Коровин Е.Ю., Южаков И.А., Цыдыпов Д.Г. Микроволновые свойства композита с высоким содержанием микрочастиц карбонильного железа различных марок. *Письма в Журнал технической физики*. 2025;51(8):20–24.
<https://doi.org/10.61011/PJTF.2025.08.60158.20130>
 - Rozanov K.N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2000;48(8):1230–1234.
<https://doi.org/10.1109/8.884491>
 - Li J., Feng W.J., Wang J.S., Zhao X.G., Zheng W.Q., Yang H. Impact of silica-coating on the microwave absorption properties of carbonyl iron powder. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;393:82–87.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.049>
 - Wang H., Zhu D., Zhou W., Luo F. Electromagnetic property of SiO₂-coated carbonyl iron/polyimide composites as heat resistant microwave absorbing materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;375:111–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.061>

12. Costa F., Borgese M., Degiorgi M., Monorchio A. Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (T/R) devices. *Electronics*. 2017;6(4):95. <https://doi.org/10.3390/electronics6040095>
 13. Rothwell E.J., Frasc J.L., Ellison S.M., Chahal P., Ouedraogo R.O. Analysis of the Nicolson – Ross – Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress In Electromagnetics Research*. 2016;157:31–47. <https://doi.org/10.2528/PIER16071706>
 14. Costa F., Borgese M., Degiorgi M., Monorchio A. Electromagnetic Characterisation of Materials by Using Transmission/Reflection (T/R) Devices. *Electronics*. 2017;6(4):95. <https://doi.org/10.3390/electronics6040095>
 15. Baker-Jarvis J., Janezic M.D., Grosvenor Jr.H., Geyer R.G. Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability. *NIST Technical Note*. 2012.1355-R.
 16. Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A., Kibets S.G., Kisel V.N., Gallagher C.P., McKeever C., Hibbins A.P., Ogrin F.Y. Complex permittivity and permeability of composite materials based on carbonyl iron powder over an ultrawide frequency band. *Physical Review Applied*. 2021;16:014062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.014062>
 17. Steeman P.A.M., van Turnhout J. Dielectric properties of inhomogeneous media. In: *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Berlin: Springer. 2003:495–522. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56120-7_13
 18. Maxwell J.C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. 1st ed. Oxford: Clarendon Press; 2005:328–330.
 19. Кудряшов М.А., Машин А.И., Логунов А.А. Диэлектрические свойства нанокompозитов Ag/ПАН. *Журнал технической физики*. 2014;84(7):67–71.
 20. Samet M., Levchenko V., Boiteux G., Seytre G., Kallel A., Serghei A. Electrode polarization vs. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of materials: characteristic frequencies and scaling laws. *The Journal of Chemical Physics*. 2015;142:194703. <https://doi.org/10.1063/1.4919877>
 21. Samet M., Kallel A., Serghei A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: scaling laws and applications. *Journal of Composite Materials*. 2022;56(20):3197–3217. <https://doi.org/10.1177/00219983221090629>
- REFERENCES**
1. Devin K.L., Agafonova A.S., Sokolov I.I. Prospects for the use of radio-absorbing materials to ensure electromagnetic compatibility of onboard electronic equipment. *Proceedings of the All-Russian Research Institute of Aviation Materials*. 2020;8(90):94–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-8-94-100>
 2. Sista K.S., Dwarapudi S., Kumar D., Sinha G.R., Moon A.P. Carbonyl iron powders as absorption material for microwave interference shielding: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;853:157251. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157251>
 3. Feng Y.-B., Qiu T., Shen C.-Y., Li X.-Y. Electromagnetic and absorption properties of carbonyl iron/rubber radar absorbing materials. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2006;42(3):363–368. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.862763>
 4. Duan Y., Li G., Liu L., Liu S. Electromagnetic properties of carbonyl iron and their microwave absorbing characterization as filler in silicone rubber. *Bulletin of Materials Science*. 2010;33:633–636. <https://doi.org/10.1007/s12034-010-0096-7>
 5. Gama A.M., Rezende M.C. Complex permeability and permittivity variation of carbonyl iron rubber in the frequency range of 2 to 18 GHz. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2010;2(1). <https://doi.org/10.5028/jatm.v2i1.43>
 6. Xu Y., Zhang D., Cai J., Yuan L., Zhang W. Microwave absorbing property of silicone rubber composites with added carbonyl iron particles and graphite platelet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013;327:82–86. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.09.045>
 7. Qing Y., Zhou W., Luo F., Zhu D. Microwave-absorbing and mechanical properties of carbonyl-iron/epoxy-silicone resin coatings. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2009;321(1):25–28. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.07.011>
 8. Nomoev A.V., Garmaev B.Z., Atutov E.B., Korovin E.Yu., Yuzhakov I.A., Tsydypov D.G. Microwave properties of a composite with a high content of carbonyl iron microparticles of various grades. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2025;51(8):20–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.61011/PJTF.2025.08.60158.20130>
 9. Rozanov K.N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2000;48(8):1230–1234. <https://doi.org/10.1109/8.884491>

10. Li J., Feng W.J., Wang J.S., Zhao X.G., Zheng W.Q., Yang H. Impact of silica-coating on the microwave absorption properties of carbonyl iron powder. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;393:82–87.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.049>
11. Wang H., Zhu D., Zhou W., Luo F. Electromagnetic property of SiO₂-coated carbonyl iron/polyimide composites as heat resistant microwave absorbing materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;375:111–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.061>
12. Costa F., Borgese M., Degiorgi M., Monorchio A. Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (T/R) devices. *Electronics*. 2017;6(4):95.
<https://doi.org/10.3390/electronics6040095>
13. Rothwell E.J., Frasc J.L., Ellison S.M., Chahal P., Ouedraogo R.O. Analysis of the Nicolson – Ross – Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress In Electromagnetics Research*. 2016;157:31–47.
<https://doi.org/10.2528/PIER16071706>
14. Costa F., Borgese M., Degiorgi M., Monorchio A. Electromagnetic Characterisation of Materials by Using Transmission/Reflection (T/R) Devices. *Electronics*. 2017;6(4):95.
<https://doi.org/10.3390/electronics6040095>
15. Baker-Jarvis J., Janezic M.D., Grosvenor Jr.H., Geyer R.G. Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability. *NIST Technical Note*. 2012.1355-R.
16. Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A., Kibets S.G., Kisel V.N., Gallagher C.P., McKeever C., Hibbins A.P., Ogrin F.Y. Complex permittivity and permeability of composite materials based on carbonyl iron powder over an ultrawide frequency band. *Physical Review Applied*. 2021;16:014062.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.014062>
17. Steeman P.A.M., van Turnhout J. Dielectric properties of inhomogeneous media. In: *Broad-band Dielectric Spectroscopy*. Berlin: Springer. 2003:495–522. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56120-7_13
18. Maxwell J.C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. 1st ed. Oxford: Clarendon Press, 2005:328–330.
19. Kudryashov M.A., Mashin A.I., Logunov A.A. Dielectric properties of Ag/PAN nanocomposites. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2014;84(7):67–71. (In Russ.).
20. Samet M., Levchenko V., Boiteux G., Seytre G., Kallel A., Serghei A. Electrode polarization vs. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of materials: characteristic frequencies and scaling laws. *The Journal of Chemical Physics*. 2015;142:194703.
<https://doi.org/10.1063/1.4919877>
21. Samet M., Kallel A., Serghei A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: scaling laws and applications. *Journal of Composite Materials*. 2022;56(20):3197–3217.
<https://doi.org/10.1177/00219983221090629>

Сведения об авторах:

Илья Андреевич Южаков, младший научный сотрудник лаборатории физики композитных материалов, аспирант, Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
E-mail: yuzhakov.0402@yandex.ru
ORCID: 0009-0001-8315-3656
SPIN-код: 4217-1049

Байр Заятуевич Гармаев, заведующий лабораторией физики композитных материалов, Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
E-mail: bair.garmaev@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6086-3658
SPIN-код: 8267-7961

Дамдин Галсанович Цыдыпов, инженер, Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
E-mail: damdinkatsydydpov@gmail.com
ORCID: 0009-0005-5571-5075
SPIN-код: 4217-1079

Андрей Валерьевич Номоев, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, профессор кафедры общей и теоретической физики, Бурятский государственный университет
E-mail: nomoevav@mail.ru
ORCID: 0009-0000-6201-6743
SPIN-код: 3966-7841

Information about the authors:

Ilya A. Yuzhakov, Junior Researcher at the Laboratory of Physics of Composite Materials, Postgraduate Student, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: yuzhakov.0402@yandex.ru
ORCID: 0009-0001-8315-3656
SPIN-код: 4217-1049

Bair Z. Garmaev, Head of the Laboratory of Physics of Composite Materials, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: bair.garmaev@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6086-3658
SPIN-код: 8267-7961

Damdin G. Tsydyrov, *engineer*, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: damdinkatsydyrov@gmail.com

ORCID: 0009-0005-5571-5075

SPIN-код: 4217-1079

Andrei V. Nomoev, *Doctor of Physico-Mathematical Sciences*, Chief Researcher at the Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, *Professor of the Department of General and Theoretical Physics*, Buryat State University

E-mail: nomoevav@mail.ru

ORCID: 0009-0000-6201-6743

SPIN-код: 3966-7841

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 06.04.2026

После доработки 17.05.2026

Принята к публикации 23.05.2026

Received 06.04.2026

Revised 17.05.2026

Accepted 23.05.2026