

УДК 691.175.5/8:620.9

АНТИКОРРОЗИОННЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА С НАПОЛНИТЕЛЯМИ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**В. И. СУСЛЯЕВ¹⁾, В. А. ДЕБЕЛОВ²⁾, Ю. А. ВЛАСОВ²⁾,
Н. Н. ДЕБЕЛОВА²⁾, К. В. ДОРОЖКИН¹⁾, А. В. БАДЬИН¹⁾**

¹⁾Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, 634050, г. Томск, Россия

²⁾Томский государственный архитектурно-строительный университет,
пл. Соляная, 2, 634003, г. Томск, Россия

Аннотация. Рассмотрены гидрофобные свойства композиционных материалов на основе полиуретана с наполнителями из углеродных нанотрубок, оксидов железа и алюминия. Представлены данные о скорости коррозии стали марки Ст09Г2С, покрытой слоем композитов толщиной 0,5 мм, в водных растворах солей хлорида, сульфата и карбоната натрия. Показано, что наиболее эффективным является состав, включающий полимер с наполнителем из мелкодисперсного оксида железа(III). Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости спектров электромагнитного отклика, а именно коэффициентов отражения, прохождения и поглощения плоских образцов анализируемых материалов. Антикоррозионные свойства предложенных композитов проверены путем сравнения электромагнитного отклика от сухих и погруженных в воду образцов с применением метода время-импульсной терагерцевой спектроскопии (THz-TDS) в диапазоне частот 0,1–1,6 ТГц на спектрометре реального времени T-SPEC-1000 (Teravil, Литва). Установлено, что значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь позволяют определить граничные условия, в которых полимерные композиционные материалы можно эффективно использовать в качестве антикоррозионных покрытий на металлической поверхности.

Ключевые слова: антикоррозионная защита; композиты; полиуретан; оксид железа; оксид алюминия; углеродные нанотрубки.

Образец цитирования:

Сусляев ВИ, Дебелов ВА, Власов ЮА, Дебелова НН, Дорожкин КВ, Бадьин АВ. Антикоррозионные композиции на основе полиуретана с наполнителями из углеродных нанотрубок, оксидов железа и алюминия для защиты металлических поверхностей. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2025;1:57–65.
EDN: TQJBVK

For citation:

Suslyayev VI, Debelov VA, Vlasov YuA, Debelova NN, Dorozhkin KV, Badiin AV. Anticorrosion compositions based on polyurethane with fillers from carbon nanotubes, iron and aluminium oxides for protection of metal surfaces. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2025;1:57–65. Russian.
EDN: TQJBVK

Сведения об авторах см. на с. 65.

Information about the authors see p. 65.

ANTICORROSION COMPOSITIONS BASED ON POLYURETHANE WITH FILLERS FROM CARBON NANOTUBES, IRON AND ALUMINIUM OXIDES FOR PROTECTION OF METAL SURFACES

V. I. SUSLYAEV^a, V. A. DEBELOV^b, Yu. A. VLASOV^b,
N. N. DEBELOVA^b, K. V. DOROZHNIKIN^a, A. V. BADIIN^a

^aTomsk State University, 36 Lenina Avenue, Tomsk 634050, Russia

^bTomsk State University of Architecture and Building, 2 Soljanaja Square, Tomsk 634003, Russia

Corresponding author: N. N. Debelova (mackevichn72@mail.ru)

Abstract. Hydrophobic properties of composite materials based on polyurethane with fillers of carbon nanotubes, iron and aluminium oxides are considered. The data on the corrosion rate of St09G2S steel coated with a 0.5 mm thick layer of composites in aqueous solutions of sodium chloride, sulfate and carbonate salts are presented. It is shown that the most effective is the composition including a polymer with a filler from finely dispersed iron(III) oxide. The results of experimental studies of the dependence of electromagnetic response spectra, namely reflection, transmission and absorption coefficients of flat material samples are presented. The anticorrosion properties of the proposed composites were tested by comparing the electromagnetic response from dry and immersed in water samples using terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) in the frequency range of 0.1–1.6 THz on a real-time spectrometer T-SPEC-1000 (*Teravil*, Lithuania). It was found that the values of dielectric permittivity and dissipation factor allow to determine the boundary conditions, in which polymer composites can be effectively used as anticorrosion coatings on metal surfaces.

Keywords: corrosion protection; composites; polyurethane; iron oxide; aluminium oxide; carbon nanotubes.

Введение

Промышленное оборудование и транспортные средства, работающие в агрессивных средах, требуют надежной и долговременной защиты [1–3]. Антикоррозионные покрытия должны быть относительно тонкими, легкими и недорогими [4; 5].

Благодаря высоким влаго-, абразиво- и морозостойкости, а также химической стойкости интерес представляют покрытия на основе полиуретанов, находящие применение в различных отраслях промышленности для антикоррозионной защиты оборудования нефтегазохимического комплекса, железнодорожных контейнеров, танкерного флота и т. д. [6–8]. Такие покрытия невосприимчивы к поражению микроорганизмами и не подвержены разрушению под действием солнечных лучей [9].

Следует отметить, что составляющие компоненты полиуретановой матрицы легко поддаются химической и физической модификации в относительно мягких условиях, это позволяет регулировать физико-химические и эксплуатационные свойства конечного продукта [10]. Известно, что изоцианаты обладают уникальной реакционной способностью по разным химическим связям. Данная специфика основного мономера определяет разнообразие химических связей в цепях и химических превращений полиуретанов. Это дает возможность получать материалы с самыми разными свойствами в рамках одного класса полимеров. Они с успехом применяются в том числе в качестве гидрофобных и антикоррозионных составов для защиты поверхности металлических изделий от факторов окружающей среды¹ [11; 12]. По этой причине исследования в данной области являются актуальными и многообещающими как в теоретическом, так и в практическом аспекте.

Цель работы заключается в описании метода получения композитов на основе полиуретана с добавлением неорганических наполнителей различной природы и изучения их гидрофобных и антикоррозионных свойств.

Материалы и методы исследования

В качестве полимерной композиции применялась однокомпонентная смесь полиуретана, полученная полимеризацией изоцианата и полиола, отверждаемая под действием влаги окружающего воздуха. Отдельные характеристики полиуретана приведены в табл. 1.

¹Лихачёв В. А. Коррозия и защита металлов : учеб.-метод. пособие. Киров : ВятГУ, 2017. 97 с. ; Пустов Ю. А. Коррозия и защита металлов : учеб. пособие. М. : Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2020. 216 с.

Таблица 1

Отдельные характеристики полиуретана

Table 1

Selected characteristics of polyurethane

Параметры	Значение
Плотность при 25 °С, г/см ³	1,30 ± 0,02
Скорость отверждения, мм/сут	2,5
Время формирования пленки при 25 °С, мин	90

В качестве наполнителей полимерной матрицы использовали оксид железа(III), мелкодисперсный порошок оксида алюминия, углеродные нанотрубки. Дополнительно вводили гидроксид магния в качестве антипирена. Известно, что разложение гидроксида магния на оксид магния и воду начинается при температуре 300–320 °С. Данный процесс сопровождается выделением большого количества кристаллизационной влаги (31 мас. %), что способствует повышению огнестойкости композита. Кроме того, гидроксид магния позволяет улучшить эксплуатационные свойства, такие как ударопрочность, газопроницаемость и др. [13].

Приготовление композитов осуществляли путем смешивания полиуретана и наполнителей, взятых в массовых соотношениях, указанных в табл. 2.

Таблица 2

Состав и масса компонентов композитов

Table 2

Composition and mass of composite components

Состав компонентов	Масса компонентов, г			
	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3	Состав № 4
Полиуретан	4,5	4,5	4,5	4,5
Оксид железа (Fe ₂ O ₃)	–	1,9	–	–
Углеродные нанотрубки	–	–	1,9	–
Мелкодисперсный порошок оксида алюминия	–	–	–	1,9
Гидроксид магния	–	0,2	0,2	0,2

Смешивание полимерной матрицы и неорганических наполнителей проводили до получения однородной массы. Приготовленные составы наносили на стальные пластины марки Ст09Г2С тонким слоем толщиной 0,5 мм и испытывали на коррозионную стойкость. Для этого две металлические пластины с нанесенным защитным слоем композита помещали в химические стаканы, наполненные растворами хлорида, сульфата и карбоната натрия с концентрацией 3 мас. %, и выдерживали в каждом из растворов 30; 60; 180; 1440 и 4320 мин. Затем пластины вынимали из раствора и оставляли на воздухе в течение 1 ч, после чего высушивали их в сушильном шкафу при температуре (60 ± 2) °С на протяжении 1 ч².

Для оценки коррозионной стойкости образцов применяли метод вычисления спектров комплексной диэлектрической проницаемости с использованием спектрометра СТД-21 (ОАО «КДП», Россия) в диапазоне частот 120–260 ГГц [14], генератор которого построен на лампе обратной волны. В работе измерялся электромагнитный отклик плоских образцов полиуретана и трех композиционных материалов с наполнителями, перечисленными в табл. 2.

Для оценки гидрофобности исходили из предположения, что при впитывании влаги изменится коэффициент отражения от образца за счет изменения диэлектрической проницаемости. Результаты, полученные для сухого и выдержанного в дистиллированной воде на протяжении 3 ч образцов, показывают способность материалов поглощать воду. Измерение электромагнитного отклика произведено на широкополосной установке Т-SPEC-1000 (Teravil, Литва), реализующей метод времяимпульсной спектроскопии [15]. Терагерцевый диапазон хорошо зарекомендовал себя для исследования тонких образцов [16; 17].

²ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Введ. 01.01.1987. М. : Изд-во стандартов, 1999. 17 с.

Результаты и их обсуждение

Как следует из результатов экспериментов на поверхности композита в солевых растворах, в течение 24 ч не наблюдается видимых изменений. Нарушение защитного слоя обнаруживается для всех исследуемых составов только через 3 сут выдержки в агрессивных средах. На рис. 1 на примере композита с наполнителем Fe_2O_3 показаны изменения поверхности защитного слоя.

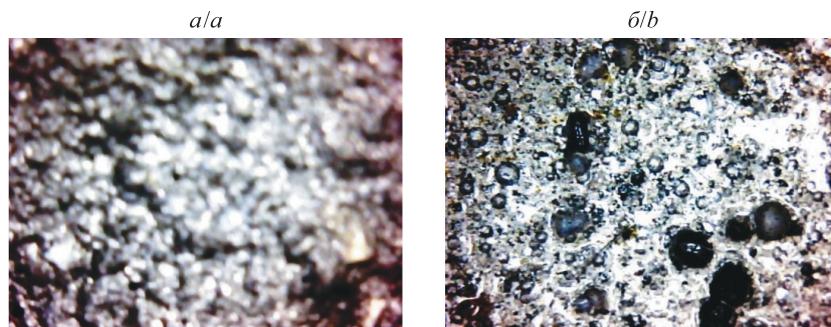


Рис. 1. Фотографии видов коррозионных повреждений поверхности защитного слоя на основе полиуретана и оксида железа(III) с добавкой гидроксида магния после выдержки в растворе хлорида натрия:
a – в течение 1 ч; *b* – в течение 3 сут (увеличение $\times 40$)

Fig. 1. Photos of corrosion damage types on the surface of the protective layer based on polyurethane and iron(III) oxide with the addition of magnesium hydroxide after exposure in sodium chloride solution:
a – for 1 h; *b* – for 3 days (magnification $\times 40$)

Количественный показатель скорости коррозии защитного слоя рассчитывали по формуле

$$K = \frac{\Delta m}{St},$$

где K – скорость потери массы на единицу площади образца за единицу времени, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; Δm – изменение массы образца, г; t – время, ч; S – площадь поверхности образца, м^2 .

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты изменения средней массы трех параллельных образцов и расчетные значения скорости коррозии композита на примере состава № 2 в водных растворах карбоната, сульфата и хлорида натрия

Table 3

Results of change in the average mass of three parallel samples and calculated data on the corrosion rate of the composite on the example of composition No. 2 in aqueous solutions of sodium carbonate, sulfate and chloride

Параметры	Значение		
	При обработке раствором карбоната натрия	При обработке раствором сульфата натрия	При обработке раствором хлорида натрия
Среднее значение Δm^* , г	0,002 1	0,002 4	0,003 1
Среднее значение S , м^2	0,018 11	0,018 13	0,018 13
Скорость коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	0,004 8	0,005 5	0,007 1

*Разность массы образцов композита состава № 2 до и после обработки соевыми растворами в течение 24 ч.

Как следует из табл. 3, наиболее агрессивной средой для стали марки Ст09Г2С является водный раствор хлорида натрия. Так как скорость коррозии стали в 0,5 н. растворе хлорида натрия составляет в среднем $3,0 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ [11], можно считать, что предлагаемая композиция обладает высокими антикоррозионными свойствами. Согласно результатам измерения скорости коррозии в солевых растворах остальные составы (см. табл. 2) имеют близкие значения данного показателя, но наиболее эффективным является состав № 2, содержащий в качестве наполнителя оксид железа(III) (см. табл. 2).

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований зависимости спектров электромагнитного отклика: коэффициентов прохождения, отражения и поглощения плоских образцов материалов, представленных в табл. 2.

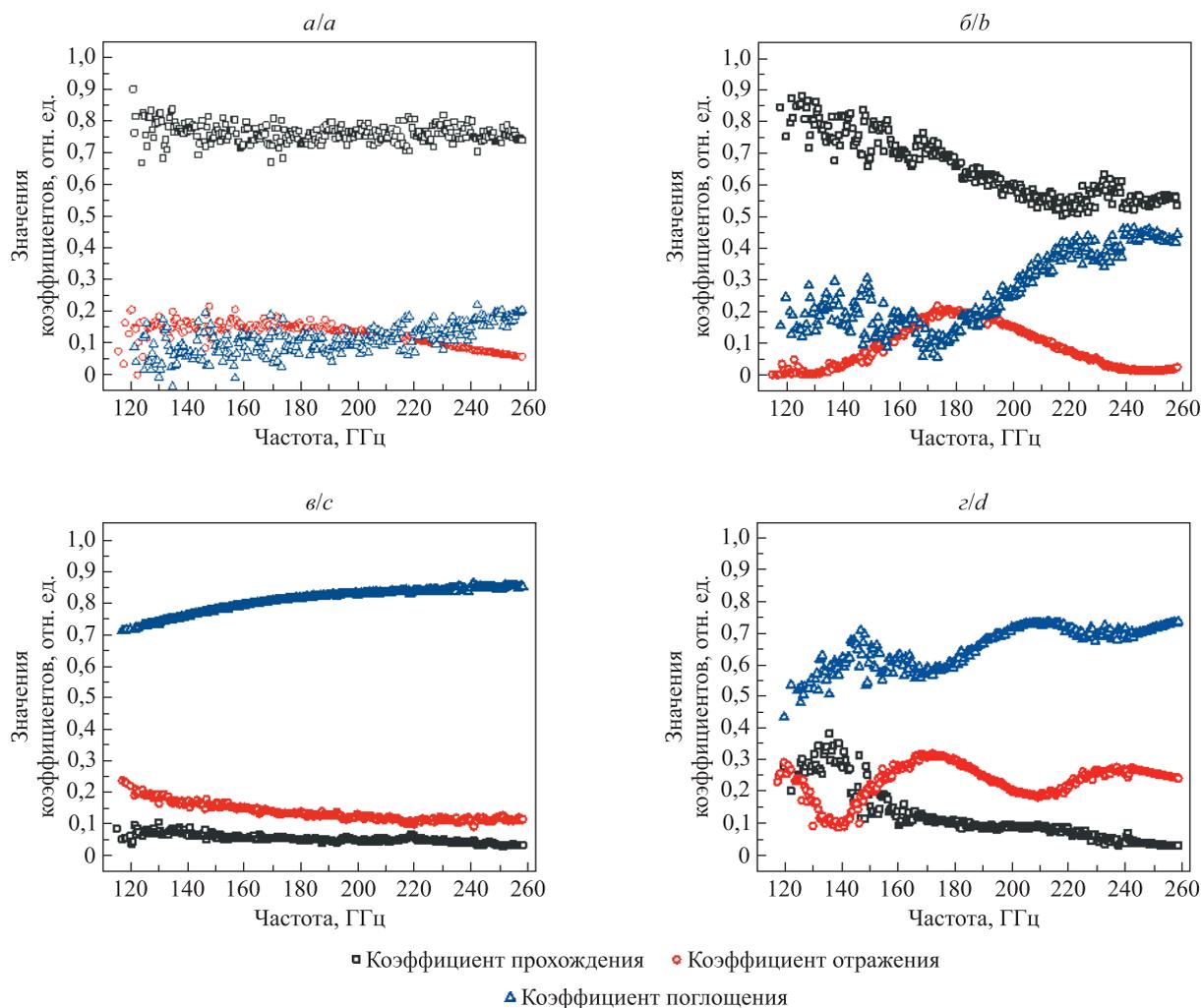


Рис. 2. Спектры электромагнитного отклика образцов материалов состава № 1 толщиной $d = 0,3$ мм (а), состава № 2 толщиной $d = 0,73$ мм (б), состава № 3 толщиной $d = 0,47$ мм (в) и состава № 4 толщиной $d = 0,76$ мм (г)

Fig. 2. Electromagnetic response spectra of samples of materials of composition No. 1 with a thickness $d = 0.3$ mm (a), composition No. 2 with a thickness $d = 0.73$ mm (b), composition No. 3 with a thickness $d = 0.47$ mm (c) and composition No. 4 with a thickness $d = 0.76$ mm (d)

Эти результаты использованы для расчета спектров комплексной диэлектрической проницаемости составов № 1–4 (см. табл. 2) в плосковолновом приближении, т. е. для случая нормального падения электромагнитной волны на плоский образец (рис. 3). Расчет произведен с помощью программного обеспечения, разработанного фирмой-производителем спектроскопа СТД-21.

Добавление магнитодиэлектрического порошка Fe_2O_3 привело к некоторому росту величин комплексной диэлектрической проницаемости (см. рис. 3, б). Это может быть связано с относительно небольшой концентрацией порошка, а также высокой частотой электромагнитного излучения, на которой магнитные свойства данного материала не проявляются.

Введение в полиуретан порошка с большой электропроводимостью (углеродные нанотрубки) значительно повлияло на спектры диэлектрической проницаемости, особенно для мнимой составляющей (см. рис. 3, в). Заметное падение величин действительной и мнимой составляющих с ростом частоты характерно для материалов, имеющих электропроводимость по металлическому типу.

Образец с добавлением мелкодисперсного порошка оксида алюминия отличается наибольшими значениями комплексной диэлектрической проницаемости и обладает относительно невысокой сквозной электропроводимостью (см. рис. 3, г).

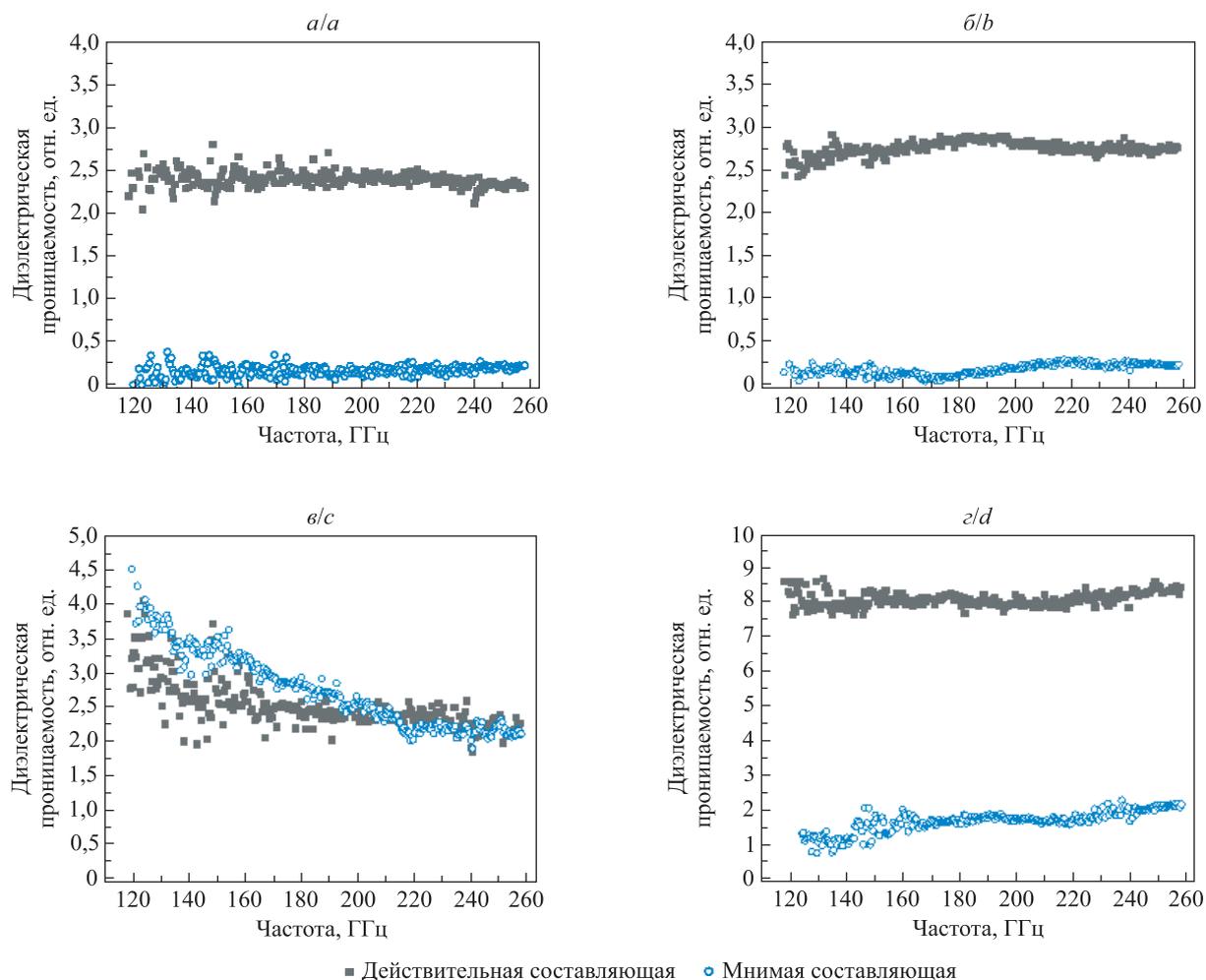


Рис. 3. Спектры комплексной диэлектрической проницаемости материалов состава № 1 (а), состава № 2 (б), состава № 3 (в) и состава № 4 (г)

Fig. 3. Spectra of the complex dielectric permittivity of materials of composition No. 1 (a), composition No. 2 (b), composition No. 3 (c) and composition No. 4 (d)

Антикоррозионные свойства разработанных материалов проверялись путем сравнения электромагнитного отклика от сухих и находившихся в воде образцов. При выполнении этого эксперимента образцы помещались в дистиллированную воду на 3 ч. После извлечения из воды с поверхности образца удалялись капли влаги, и он сразу же размещался в подготовленной измерительной ячейке. Проникновение воды в слой образца должно привести к увеличению его толщины (эффект набухания) и диэлектрической проницаемости, что вызывает более резкий скачок волнового сопротивления и приводит к росту коэффициента отражения (рис. 4). Измерения в непрерывном излучении, применяемом в спектрометре СТД-21, требуют достаточно большого времени, за которое образец может высохнуть. По этой причине для сравнения электромагнитного отклика использовался метод времяимпульсной терагерцевой спектроскопии (*terahertz time-domain spectroscopy*, THz-TDS) в диапазоне частот 0,1–1,6 ТГц на спектрометре реального времени T-SPEC-1000.

Значимых изменений в графиках сухих и находившихся в воде образцов не наблюдается, что подтверждает их устойчивость к воздействию влаги и высокие гидрофобные свойства исходной матрицы полиуретана и композита на его основе.

Известно, что молекулярная масса полиуретанов составляет в среднем 10 000–12 000 ед., а их структура имеет либо глобулярную, либо линейную форму в зависимости от сил межмолекулярного взаимодействия между отдельными макромолекулами. В любом случае образуются ассоциаты, которые можно трактовать как отдельные слабо или сильно связанные между собой фрактальные колебательные моды, способные реагировать на внешнее частотное излучение. Тогда наличие нескольких максимумов коэффициентов поглощения в исходной матрице полиуретана и композита на его основе можно интерпретировать как проявление локализованных либрационных возбуждений.

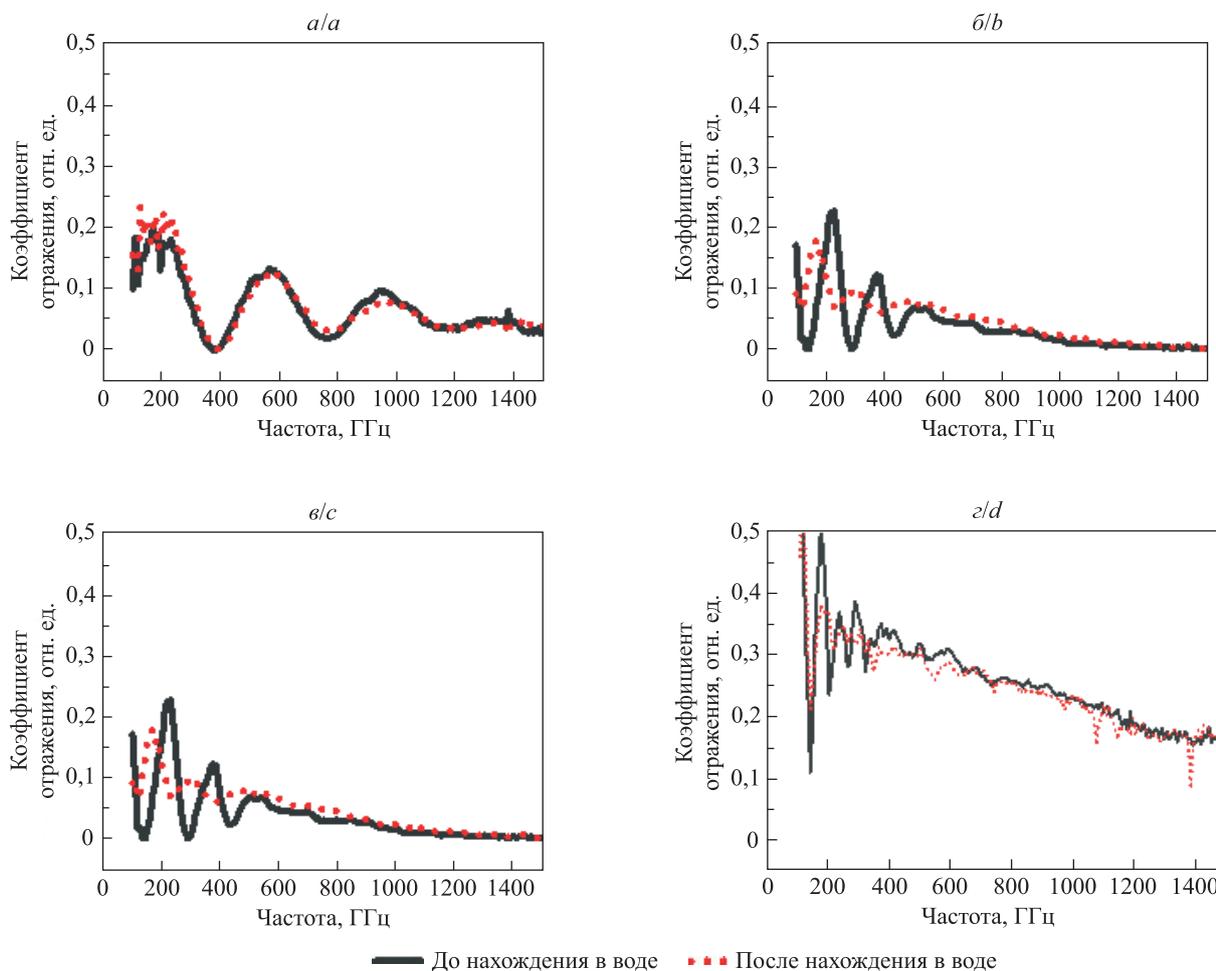


Рис. 4. Коэффициенты отражения поверхности исходной полиуретановой пленки и пленки, находившейся в дистиллированной воде в течение 3 ч, для состава № 1 (а), состава № 2 (б), состава № 3 (в) и состава № 4 (г)

Fig. 4. Reflection coefficients of the initial polyurethane film surface and the film, which was in distilled water for 3 h, for composition No. 1 (a), composition No. 2 (b), composition No. 3 (c) and composition No. 4 (d)

Значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь позволяют определить граничные условия, в которых можно эффективно применять полимерные композиционные материалы.

Заключение

Результаты исследований показали, что предложенные составы на основе полимерной матрицы полиуретана с наполнителями из оксида железа(III), мелкодисперсного порошка оксида алюминия или углеродных нанотрубок являются гидрофобными и могут использоваться в качестве эффективных антикоррозионных покрытий на поверхности стали марки Ст09Г2С. При сравнительном анализе зависимости скорости коррозии защитных покрытий в солевых растворах от природы введенной в матрицу полиуретана химической добавки отмечено, что оксид железа(III) проявляет наиболее эффективные защитные свойства.

Методом измерения электромагнитного отклика в терагерцевом диапазоне проведена оценка гидрофобности и коррозионной стойкости тонкослойных защитных покрытий. Для композитов с наполнителем из углеродных нанотрубок обнаружено заметное падение величин действительной и мнимой составляющих с ростом частоты, что характерно для материалов, имеющих электропроводимость по металлическому типу. Введение магнетодиэлектрического порошка Fe_2O_3 приводит к небольшому росту величин комплексной диэлектрической проницаемости. Образцы с добавлением мелкодисперсного порошка оксида алюминия имеют наибольшие значения комплексной диэлектрической проницаемости и относительно невысокую сквозную электропроводимость. Показано, что на основе результатов измерения электрофизических

величин в терагерцевом диапазоне можно целенаправленно осуществлять выбор составов и прогнозировать граничные условия эффективной применимости полимерных композиционных материалов.

Высказано предположение о том, что наличие нескольких максимумов коэффициентов поглощения в полиуретановых композитах можно интерпретировать как проявление локализованных либрационных возбуждений в полимерной матрице, обусловленных образованием пространственных конфигураций и, как следствие, формированием фрактальных колебательных мод, способных реагировать на внешнее частотное излучение.

Библиографические ссылки

1. Negmatov S, Kuchkorov U, Abed N, Negmatova K, Sultanov S, Bozorboev S, et al. Research and development of effective compositions of anti-corrosion composite polymer materials and coatings. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Internet]. 2023 [cited 2024 July 17];3(5):52–58. Available from: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15158>. EDN: ICKUDR.
2. Babakhanova MG, Negmatova KS, Sultonov SU, Babakhanova MA, Ahmedova DU. Investigation of the influence of fillers on the adhesive properties of composite polymer coatings. *Thematics Journal of Chemistry*. 2022;6(1):12–16.
3. Хакимов Р, Ибрагимов Б, Айрапетов Д. Возможность снижения шума и вибрации транспортно-технологических машин путем нанесения многофункционального антикоррозионного покрытия. *Общество и инновации*. 2022;3(6/S):188–194. DOI: 10.47689/2181-1415-vol3-iss6/S-pp188-194.
4. Ramesh M, Rajeshkumar LN, Srinivasan N, Kumar DV, Balaji D. Influence of filler material on properties of fiber-reinforced polymer composites: a review. *e-Polymers*. 2022;22:898–916. DOI: 10.1515/epoly-2022-0080.
5. Wang Y, Xu G, Yu H, Hu C, Yan X, Guo T, et al. Comparison of anti-corrosion properties of polyurethane based composite coatings with low infrared emissivity. *Applied Surface Science*. 2011;257(10):4743–4748. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.12.152.
6. Зиновьев ВМ, Зрайченко ЛИ, Горшкова ЛМ. Полиуретановые и эпоксипуленовые покрытия для антикоррозионной защиты металлических конструкций. *Инновации*. 2014;6:118–120. EDN: TLODAR.
7. Ирле К, Райер Р, Рошу Р, Штингль Т, Буланов МН. Высокоэффективные водно-дисперсионные полиуретановые ЛКМ для защиты стальных поверхностей. *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2011;10:43–45. EDN: RBPGUZ.
8. Adamu AA, Muhamad Sarih N, Gan SN. Thermal and anticorrosion properties of polyurethane coatings derived from recycled polyethylene terephthalate and palm olein-based polyols. *Royal Society Open Science*. 2021;8(4):201087. DOI: 10.1098/rsos.201087.
9. Дебелова НН, Власов ЮА, Фукс ВР, Крючков ЕН, Исаенко ПВ, Дебелов ВА. Коррозионная защита кузова автомобиля. *Фламан науки*. 2023;8:240–248. EDN: SMPXYF.
10. Гусева ЕН. *Полиуретановые покрытия на основе нанокмозитов с аллотропными модификациями углерода* [диссертация]. Санкт-Петербург: [б. и.]; 2020. 219 с.
11. Розенфельд ИЛ, Рубинштейн ФИ. *Антикоррозионные грунтовки и ингибированные лакокрасочные покрытия*. Москва: Химия; 1980. 200 с. (Надежность и качество).
12. Чухланов ВЮ, Селиванов ОГ. Диэлектрические свойства герметизирующей композиции на основе эпоксидановой смолы, модифицированной полиметилфенилсилоксаном, в сантиметровом СВЧ-радиодиапазоне. *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015;3:6–10. EDN: TKUAOL.
13. Пичугин АП, редактор. *Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов. Сборник научных трудов по материалам Национальной научно-технической конференции с международным участием; 16–19 февраля 2021 г.; Новосибирск, Россия*. Новосибирск: [б. и.]; 2021. 237 с.
14. Малиновская ТД, Суляев ВИ, Журавлев ВА, Мелентьев СВ, Коровин ЕЮ, Дорожкин КВ и др. Электромагнитные характеристики композиционных покрытий с ПТО-наполнителем. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016;59(9):168–169. EDN: WMCELD.
15. Yahyapour M, Jahn A, Dutzi K, Puppe T, Leisching P, Schmauss B, et al. Fastest thickness measurements with a terahertz time-domain system based on electronically controlled optical sampling. *Applied Sciences*. 2019;9(7):1283. DOI: 10.3390/app9071283.
16. Jahed NMS, Saeedkia D. Terahertz-thickness measurement applies itself to paint and coatings. *Photonics Spectra* [Internet]. 2020 [cited 2024 July 17];54(11):50–52. Available from: https://www.photonics.com/articles/terahertz-thickness_measurement_applies_itself_to/a66316/.
17. Dorozhkin KV, Dunaevsky GE, Sarkisov SYu, Suslyayev VI, Tolbanov OP, Zhuravlev VA, et al. Terahertz dielectric properties of multiwalled carbon nanotube/polyethylene composites. *Materials Research Express*. 2017;4(10):106201. DOI: 10.1088/2053-1591/aa8f06.

Получена 13.11.2024 / исправлена 02.12.2024 / принята 02.12.2024.
Received 13.11.2024 / revised 02.12.2024 / accepted 02.12.2024.

Авторы:

Владимир Иванович Суляев – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета.

Владислав Александрович Дебелов – ассистент кафедры автомобильного транспорта и электротехники механико-технологического факультета.

Юрий Алексеевич Власов – доктор технических наук, профессор; декан механико-технологического факультета.

Наталья Николаевна Дебелова – кандидат технических наук; доцент кафедры экономики, организации, управления строительством и жилищно-коммунальным комплексом Института кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве.

Кирилл Валерьевич Дорожкин – младший научный сотрудник лаборатории терагерцевых исследований.

Александр Владимирович Бадьин – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета.

Authors:

Vladimir I. Suslyayev, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of radioelectronics, faculty of radiophysics.

usl@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0935-975X>

Vladislav A. Debelov, assistant at the department of automobile transport and electrical engineering, faculty of mechanics and technology.

prosto_vladislavd@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-8865-6683>

Yury A. Vlasov, doctor of science (engineering), full professor; dean of the faculty of mechanics and technology.

yury2006@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0007-5997-3666>

Natalia N. Debelova, PhD (engineering); associate professor at the department of economics, organisation, management of civil engineering and housing and communal complex, Institute of cadastre, economy and engineering systems in building.

mackevichn72@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-7236-0130>

Kiril V. Dorozhkin, junior researcher at the laboratory of terahertz research.

yasbtk@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9321-2228>

Alexander V. Badiin, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of radioelectronics, faculty of radiophysics.

thzlab@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2712-4356>
