

## Электрические свойства сферопластиков пониженной плотности с полиорганосилоксановым связующим в области сверхвысоких частот

### Electrical properties of low-density spheroplastics with a polyorganosiloxane binder in the microwave range

*В.Ю. ЧУХЛАНОВ, Н.Н. СМЕРНОВА, О.Н. ПОНОМАРЕВА*

*V.YU. CHUKHLANOV, N.N. SMIRNOVA, O.N. PONOMAREVA*

ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU), Vladimir, Russia  
krypton0@mail.ru

В работе рассмотрены свойства сферопластиков пониженной плотности с полиорганосилоксановым связующим и полым стеклянным сферическим наполнителем. Изучены электрические характеристики материалов. Исследовано влияние природы и соотношения связующего и наполнителя на электрические свойства в области сверхвысоких частот. Выявлен вклад кремнийорганического компонента в характеристики сферопластиков. Исследовано влияние температуры на диэлектрические свойства материалов.

**Ключевые слова:** сверхвысокие частоты, полиорганосилоксан, диэлектрические характеристики, натрийборосиликаты, сферопластики, сферический наполнитель, полые микросферы

The paper considers the properties of low-density spheroplastics with a polyorganosiloxane binder and a hollow glass spherical filler. The dielectric characteristics of the materials have been studied. The influence of the nature and ratio of the binder and filler on the electrical properties in the ultra-high frequency range has been investigated. The contribution of the organosilicon component to the characteristics of the spheroplastics is revealed. The effect of temperature on the dielectric properties of the materials is studied.

**Keywords:** ultra-high frequencies, polyorganosiloxane, dielectric characteristics, sodium borosilicates, spheroplastics, spherical filler, hollow microspheres

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-01-3-5

В настоящее время практически во всех областях науки и техники появляются радиоэлектронные устройства, приборы и оборудование, работа которых основана на использовании сверхвысокочастотной электромагнитной энергии. Это способствует возникновению значительного интереса к диэлектрическим материалам, которые обладают минимальными диэлектрическими потерями в СВЧ радиодиапазоне (выше 300 МГц) [1, 2]. Для этих целей широко используются композиционные материалы на основе полимеров разной природы. Весьма перспективными являются сферопластики, где в качестве наполнителя используются сферические частицы (размером от нанометра до миллиметра) из различных материалов (полимеров, металлов, стекла, керамики) [3, 4]. Разумеется, к наполнителю и связующему выдвигаются определенные требования. Основными из них являются, во-первых, наличие высоких диэлектрических характеристик и, во-вторых, хороших эксплуатационных свойств, таких как долговечность и стойкость к различным воздействиям внешней среды.

Одним из самых распространенных материалов, используемым в качестве наполнителя, является стекло [5, 6]. Стекло – распространенный универсальный материал, применяемый при изготовлении композиционных материалов. К его преимуществам можно отнести хорошую твердость, химическую инертность, термостойкость и электроизоляционные свойства.

Использование полимеров ограничивается их невысокой термической устойчивостью и деструкционными процессами, протекающими под действием УФ-излучения и/или различных микроорганизмов. Интересными материалами являются кремнийорганические эластомеры, высокие эксплуатационные свойства которых сохраняются в течение десятков лет [7–9].

Одним из способов снижения диэлектрических потерь композиционного материала является введение газовой фазы (например, использование пенопластов). Это необходимо для повышения диэлектрических характеристик материала в области сверхвысоких

частот. Однако при этом снижаются механические характеристики диэлектрика. Для сохранения высоких механических характеристик возможно введение газовой фазы непосредственно в микросферы, что позволяет использовать полые стеклянные микросферы [10, 11].

В настоящей работе были исследованы сферопластики пониженной плотности, состоящие из полых сферических микросфер и полидиметилсилоксанового эластомера, подробно изучены их диэлектрические характеристики в сантиметровом СВЧ-диапазоне.

Для получения образцов материалов в работе использовали: низкомолекулярный диметилсилоксановый каучук СКТН-А (ГОСТ 13835-73) с концевыми гидроксильными группами (г. Казань, ООО «Еврохим Групп»), отверждающий агент К-18 (г. Москва, ООО «Силан», ТУ 6-02-805-78), полые натрийборосиликатные микросферы (г. Солнечногорск, АО «НПО Стеклопластик», ТУ 5951-023-00204990-2004), кремнийорганический модификатор ФЭС-50 (г. Новочебоксарск, ГОСТ 2257-441-05763441-2005).

Сферопластики пониженной плотности включают твердую стеклянную оболочку, связующее и воздух. Поэтому их диэлектрические характеристики будут зависеть от природы связующего, соотношения связующего и стеклянной оболочки, а также от природы стеклянной оболочки.

Процесс получения начинается со смешения полых микросфер с заданным количеством СКТН-А (в выбранное связующее предварительно добавляли 3 масс.% отверждающего агента К-18 на СКТН-А). Смешение компонентов осуществляли на лабораторном смесителе ES-8400 при частоте вращения 60 оборотов в минуту в течение 15 минут. Диапазон соотношения компонентов варьировался от 10 об.% до 100 об.% связующего СКТН-А в композиции.

Формование образцов выполняли в алюминиевой форме под давлением 0,4 МПа. Далее образцы выдерживали при температуре 25°C в течение 72 ч. Затем их извлекали из формы и при необходимости подвергали кондиционированию в течение 14 суток. Измерение диэлектрических характеристик проводили волновым

методом на частоте 9,8 ГГц с использованием лабораторного стенда, изображенного на рис. 1.

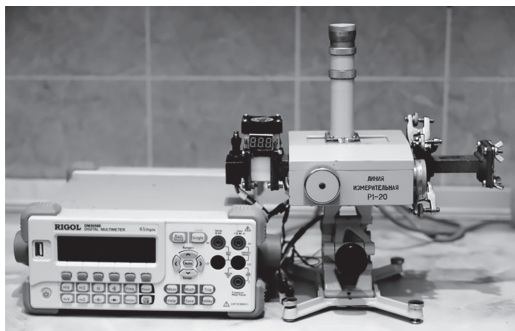


Рис. 1. Лабораторный стенд для измерения диэлектрических характеристик в диапазоне от 8 до 12 ГГц.

Измерительный комплекс состоит из прецизионной измерительной линии P1-20, перестраиваемого генератора МЗ1102-1 на диоде Ганна (8–11 ГГц), ферритового вентиля и отрезка волновода стандартного сечения 10×23 мм. Образец помещают внутри волновода, торец которого накоротко замыкается посеребренной медной пластиной. Контроль показаний напряженности электромагнитного поля внутри волновода на выходе детектора осуществляют прецизионным мультиметром Rigol DM3058E. На основе измерений смещения положения минимума коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), величины КСВН, и по известным постоянной распространения, длине волны в свободном пространстве  $\lambda_0$  для данной рабочей частоты и критической длине волны в волноводе  $\lambda_{кр}$  рассчитывают тангенс угла потерь  $tg\delta$  и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ . Расчеты диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  проводили в среде MathCad.

Процесс отверждения характеризуется взаимодействием двух концевых реакционноспособных гидроксильных групп низкомолекулярного диметилсилоксанового каучука СКТН-А с четырьмя реакционноспособными этокси группами тетраэтоксисилана с образованием сетчатого эластомера полидиметилсилоксана и выделением низкомолекулярного летучего соединения этилового спирта [11].

Для оценки диэлектрических характеристик сферопластиков в сверхвысоком диапазоне частот использовали такие параметры, как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь [12].

Для расчета диэлектрической проницаемости использовали формулу Лихтенеккера [13, 14]:

$$lg\epsilon = V_1 \cdot lg\epsilon_1 + (1 - V_1) \cdot lg\epsilon_2 \quad (1)$$

где  $\epsilon_1, \epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость 1-го и 2-го компонентов соответственно;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость смеси.

Результаты проведенных исследований и выполненных расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные показатели сферопластиков.

Содержание ПДМС в сферопластиках, об. %	Диэлектрическая проницаемость		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Влагопоглощение, %
	Расчетная	Экспериментальная		
10	1,26	1,45	291	3,2
30	1,82	2,08	487	1,4
50	2,39	2,44	634	0,4
70	2,72	2,74	774	–
90	2,97	3,07	920	–
100	3,15	3,17	993	–

В ходе проведенных исследований было выявлено, что с возрастанием объемной доли связующего в сферопластике возрастает показатель тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 2).

Как видно из рис. 2а, с повышением содержания ПДМС диэлектрическая проницаемость возрастает, достигая значения  $\epsilon = 4,2$  при содержании связующего 100 об.%. Это связано с достаточно высокой полярностью связующего, обусловленной природой силоксановой цепи. Аналогичная картина наблюдается и для зависимости тангенса угла диэлектрических потерь. В этом случае

(рис. 2б) наблюдается рост диэлектрических потерь, связанный с увеличением объемной доли ПДМС в сферопластике. Связующее, находясь в высокоэластичном состоянии, вносит вклад в величину диэлектрических потерь за счет подвижности сегментов макромолекулы и рассеяния на них электромагнитной энергии.

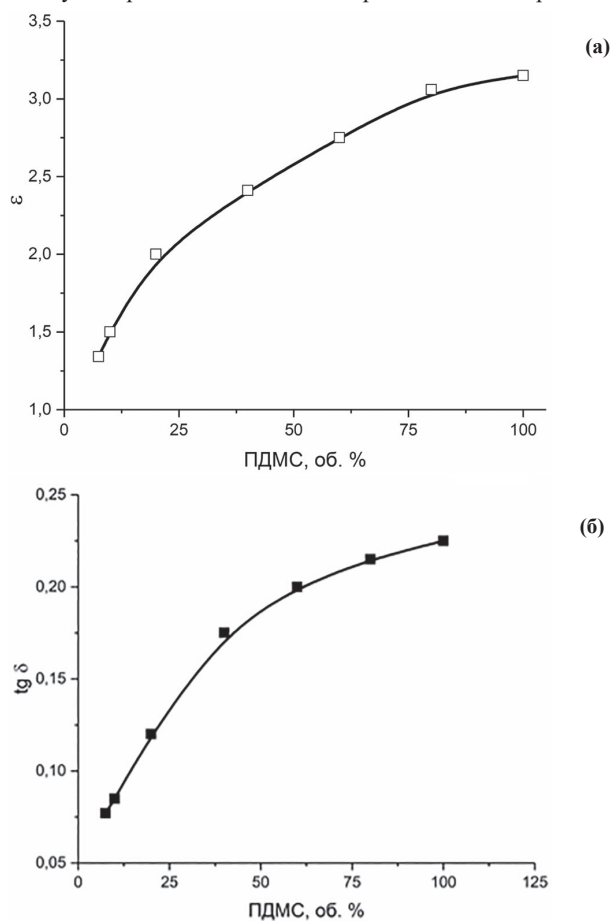


Рис. 2. Изменение диэлектрических характеристик на частоте 9,8 ГГц в зависимости от содержания ПДМС: а – диэлектрическая проницаемость; б – тангенс угла диэлектрических потерь.

Исходя из природы компонентов, можно предположить, что диэлектрические потери в значительной степени будут определяться температурой. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры показана на рис. 3. Следует отметить, что температурная зависимость высоконаполненных сферопластиков выражена незначительно (кривая 1). Это связано с тем, что заметное изменение диэлектрических характеристик в натрий-боросиликатном стекле наблюдается лишь при температурах свыше 400°С.

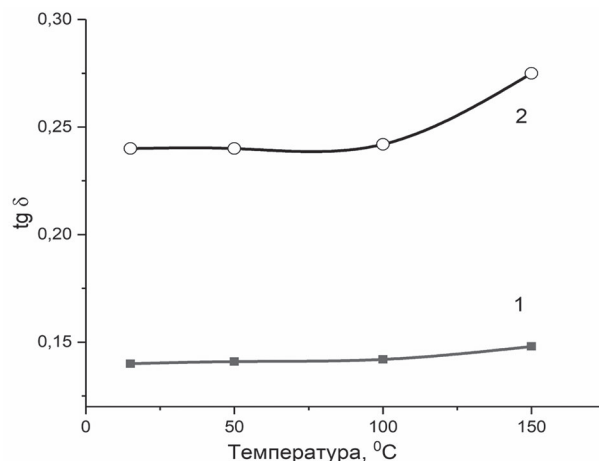


Рис. 3. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 9,8 ГГц: 1 – 10 об.% ПДМС, 2 – 25 об.% ПДМС.

При увеличении содержания связующего (кривая 2), наблюдается незначительный рост диэлектрических потерь при температурах свыше 100°С. Это типичная зависимость для большинства полимеров, находящихся в высокоэластичном состоянии [1].

Необходимо отметить, что полученные показатели обеспечивают устойчивые электрические свойства материала в СВЧ-диапазоне при высоких температурах (вплоть до 150°C).

Сравнение данных, представленных в табл. 1, показывает, что при содержании связующего ПДМС ниже 50 об.%, значение диэлектрической проницаемости, полученное при проведении эксперимента, несколько выше, чем расчетное. Это можно объяснить появлением сорбированной влаги в материале вследствие наличия в сферопластиках открытых пор.

Для снижения образования сорбированной влаги и увеличения диэлектрических характеристик в СВЧ-диапазоне в процессе получения композиции вводился кремнийорганический модификатор ФЭС-50 – органосилоксан, содержащий боковые этильные радикалы и водородные заместители [15].

Введение гидрофобизаторов приводит к сохранению высокоповерхностного электрического сопротивления, что приводит к уменьшению тангенса угла диэлектрических потерь. Допустимо введение модификатора в количестве 1,5 масс.% от связующего – это снижает тангенс угла диэлектрических потерь на 30%. Увеличение количества модификатора не приводит к существенным изменениям (рис. 4).

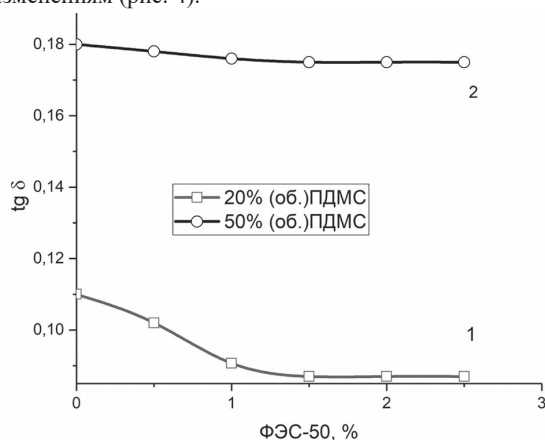


Рис. 4. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от содержания ФЭС-50: 1 – 20 об. % ПДМС; 2 – 50 об. % ПДМС.

Максимальный эффект наблюдается на высоконаполненном материале (кривая 1). При содержании ФЭС-50 свыше 1,5 масс. % эффект стабилизируется на постоянном уровне. Для сферопластиков с высоким содержанием связующего (кривая 2) эффект снижения диэлектрических потерь не наблюдается. Это напрямую связано с наличием открытых пор в высоконаполненном сферопластике.

#### Выводы

1. Установлено, что увеличение содержания кремнийорганического связующего в сферопластике свыше 15–20 об.% приводит к возрастанию диэлектрических потерь за счет диссипативного рассеивания электромагнитной энергии эластомером.

2. Показано, что расчетное значение диэлектрической проницаемости несколько отличается от экспериментальных данных при содержании ПДМС до 50 об.%, что может быть связано с появлением сорбированной влаги в исследуемых образцах вследствие появления системы открытых пор.

3. Выявлено, что в образцы с пониженным содержанием связующего (менее 30 об.%) допустимо введение модификатора ФЭС-50 в количестве от 1,0 до 1,5 масс.% от массы связующего, что приводит к некоторому снижению тангенса угла диэлектрических потерь.

4. Возможна эксплуатация изделий из сферопластика в условиях повышенной температуры (до 150°C), так как влияние температуры на диэлектрические характеристики в данном диапазоне несущественно.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

#### Литература

- Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. Пер. с англ. под ред. Шевченко В.Г. М.: Физматлит. 2008. 378 с. ISBN: 978-5-9221-0893-5.
- Tengfei Y., Sha Z., Baorui X., Zhijun F., Meizhen G. A new understanding of dielectric loss in dielectric materials across a wide temperature range // *Ceramics International*. 2025. Vol. 51, N15. P. 21067–21076. EDN: LXBHJK.
- Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г. Электрические свойства сферопластиков на основе полых углеродных микросфер и полидиметилсилоксана // *Известия вузов. Физика*. 2016. Т. 59, №7. С. 29–33. EDN: WGXRZ.
- Додонов П.А. Статистический подход к описанию напряженного состояния микроструктуры сферопластика // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2022. №2 (400). С. 40–50. EDN: CFAMSC.
- Li Q., Cheng Y., Ma L., Liu Y., Xue T., Li X., Cheng Q. Melting characteristics and heat storage/release mechanisms of millimeter-scale glass spheres encapsulated phase change materials // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025. Vol. 73, P. 106514. DOI: 10.1016/j.csite.2025.106514.
- Lamm M.E., Li K., Atchley J., Shrestha S.S., Mahurin S.M., Hun D., Aytug T. Tailorable thermoplastic insulation foam composites enabled by porous-shell hollow glass spheres and expandable thermoplastic microspheres // *Polymer*. 2023. Vol. 267, P. 125652. EDN: JCHBSJ.
- Ding X., Chen B., Li M., Liu R., Zhao J., Hu J., Fu X., Tong Y., Lu H., J. Lin. Template assisted preparation of silicone (polydimethylsiloxane) elastomers and their self-cleaning application // *RSC Advances*. 2022. Vol. 12, P. 16835–16842. DOI: 10.1039/d2ra02583c.
- Yang L., Hu W., Qin Y., Cao C., Li Y., Gong L., Zhang G., Gao J., Song P., Tang L. High-temperature resistant and reprocessable silicone elastomer composites via tuning bonding interactions for efficient and healable thermal management // *Composites Part B: Engineering*. 2025. Vol. 295, P. 112205. EDN: DYNRHH.
- Щегольков А.В., Земцова Н.В., Никулин П.Н. Сравнительный анализ кремнийорганических эластомеров, модифицированных многослойными углеродными нанотрубками, полученными по СВЧ- и CVD-технологии // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2024. Т. 22, №4. С. 134–143. EDN: DDWXZH.
- Симонов-Емельянов И.Д., Трофимов А.Н., Алексимов Н.В., Зубков С.Б. Структурообразование в полимерных композиционных материалах с полыми стеклянными микросферами // *Пластические массы*. 2012. №11. С. 6–10. EDN: PМОJGN.
- Вафина А.Р., Фазылова Д.И., Дулмаев С.Э. Современные методы отверждения силоксановых композиций (обзорная статья) // *Вестник технологического университета*. 2021. Т. 24, №9. С. 42–48. EDN: PCRDDW.
- Харалгин С.В., Войтович М.И. Исследование диэлектрических характеристик материалов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий // *Российский технологический журнал*. 2021. Т. 9, №2 (40). С. 57–65. EDN: FIIICS.
- Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ-диэлектрики в условиях высоких температур. М.: Сов. Радио. 1977. 208 с.
- Anthony J., O'Lenick Jr. Silicone Polymers: New Possibilities in Nanotechnology // *American Chemical Society. Symposium Series*. 2007. Vol. 96, P. 165. DOI: 10.1021/bk-2007-0961.ch009.
- Богданов Р.Р., Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Исследование влияния отечественных гидрофобизаторов на основные свойства цементного теста и раствора // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. №4 (26). С. 207–210. EDN: RSTEBF.