



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 621

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.028

 EDN: AJOIEL

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЭПОКСИДНО-ДИАНОВОЙ СМОЛЫ И ТИТАНАТА БАРИЯ

Евгений Николаевич Еремин¹, Ксения Геннадьевна Кукушина²,
Евгений Анатольевич Рогачев³, Наталья Михайловна Тищенко⁴,

^{1, 2, 3} Омский государственный технический университет, Омск, Россия

¹ Eremin.46@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7357-8194>

² KukushinaKG@ckba.net, <https://orcid.org/0000-0001-9959-5670>

³ <https://orcid.org/0000-0003-2622-7492>

⁴ Nataly3110201@gmail.com

^{2, 4} Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены перспективы получения композиционного материала на основе эпоксидно-диановой смолы с высокими диэлектрическими свойствами. Исследованы свойства композитов с разными концентрациями титаната бария от 20 до 70 % масс. Измеренные показатели диэлектрической проницаемости материала показали соответствие со значениями, рассчитанными по формуле Лихтенеккера. Изучена морфология наполнителя и композиционного материала с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). Кроме того, изучены такие характеристики материалов, как твердость, плотность, усадка, жизнеспособность и водопоглощение. Представлена производственная технология приготовления композитов, состоящих из эпоксидно-диановой смолы и титаната бария. Изготовленные конструкционные детали из композиционных материалов на основе эпоксидно-диановой смолы полностью соответствовали техническим требованиям стандартов отрасли.

Установлено, что такой композиционный материал пригоден для изготовления конструкционных деталей, предназначенных для работы в широком диапазоне технологических и диэлектрических свойств, которые найдут применение в СВЧ-индустрии.

Ключевые слова: эпоксидно-диановая смола, титанат бария, диэлектрическая проницаемость, СВЧ-индустрия, формула Лихтенеккера, композиционный материал.

Благодарности: Авторы благодарят за содействие в выполнении данной работы руководство и специалистов – отдела главного технолога и отдела антенн и СВЧ – устройств АО «ЦКБА» – А.В. Смирнова, В.В. Жабина, Т.Н. Филатову, М.Н. Игнатьева, Г.Я. Лило, И.А. Боровика, Д.Д. Кохнюка, Г.Н. Кирносову.

Для цитирования: Свойства композиционных материалов, состоящих из эпоксидно-диановой смолы и титаната бария / Е. Н. Еремин [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 223–229. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.028. EDN: <https://elibrary.ru/AJOIEL>.

Original article

PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS CONSISTING OF EPOXY RESIN AND BARIUM TITANATE

Evgeniy N. Eremin¹, Ksenia G. Kukushina², Evgeniy A. Rogachev³,
Natalia M. Tishchenko⁴

^{1, 2, 3} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ Eremin.46@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7357-8194>

² KukushinaKG@ckba.net, <https://orcid.org/0000-0001-9959-5670>

³ <https://orcid.org/0000-0003-2622-7492>

⁴ Nataly3110201@gmail.com

^{2, 4} Central Design Bureau of Automatics, Omsk, Russia

Abstract. *The paper considers the prospects for obtaining a composite material based on epoxy-diane resin with high dielectric properties. The properties of composites with different concentrations of barium titanate from 20 to 70 % wt.werestudied. The measured indicators of the dielectric constant of the material showed compliance with the values calculated using the Lichtenecker formula. The morphology of the filler and composite material was studied using scanning electron microscopy (SEM). In addition, such characteristics of materials as hardness, density, shrinkage, viability and water absorption have been studied. The production technology for the preparation of composites consisting of epoxy-dian resin and barium titanateis presented. The manufactured structural parts made of composite materials based on epoxy-diane resin fully complied with the technical requirements of industry standards.It has been established that such a composite material is suitable for the manufacture of structural parts designed to operate in a wide range of technological and dielectric properties, which will find application in the microwave industry.*

Keywords: epoxy-diane resin, barium titanate, dielectric constant, microwave industry, Lichtenecker formula, composite material.

Acknowledgements: *The authors are grateful to the management and staff department of the main technologist and an antenna department and microwave devices – A.V. Smirnov, V.V. Jabin, T.N. Filatova, M.N. Ignatiev, G.Ja. Lilo, I.A. Borovik, D.D. Kokhnjuk, G.N. Kirnosova.*

For citation: Eremin, E.N., Kukushina, K.G., Rogschev, E.A. & Tishchenko, N.M. (2023). Properties of composite materials consisting of epoxy resin and barium titanate. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 223-229. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.028. EDN: <https://elibrary.ru/AJOIEL>.

ВВЕДЕНИЕ

Системы беспроводной связи демонстрируют бурный рост и находят применение во все более широком числе продуктов связи. Материалы, применяемые в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), играют важную роль в современной электронике, так как используются в наземных и спутниковых системах связи, таких как программное радио, GPS, TV, интернет, анализ состояния окружающей среды, мобильная связь, сеть радиочастотной идентификации и т.д. [1]. Развитие данной отрасли неразрывно связано с разработкой новых материалов с улучшенными специфическими свойствами. Так, в радиоэлектронике диэлектрические свойства таких материалов определяют технический уровень разрабатываемой сложной элек-

тронной аппаратуры. Кроме того, ключевыми требованиями для изделий из СВЧ-материалов являются: малый размер, простота и технологичность изготовления, значительный ресурс эксплуатации и, конечно же, низкая стоимость [2, 3]. Полимерные композиционные материалы становятся в последние годы все более востребованными, так как они могут легко сочетать в себе комбинации многих свойств. Полимерная основа отвечает за эксплуатационные свойства и технологичность переработки, а такие свойства материалов, как диэлектрическая проницаемость, твердость, водопоглощение, обеспечиваются наполнителями [4]. Расчет диэлектрической проницаемости композиционных систем проводится по формуле Лихтенеккера [5]. Зная диэлектрические проницаемости основы и

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЭПОКСИДНО-ДИАНОВОЙ СМОЛЫ И ТИТАНАТА БАРИЯ

наполнителя и их доли в материале, можно смоделировать диэлектрическую проницаемость композита

$$\ln \varepsilon = v_1 \ln \varepsilon_1 + v_2 \ln \varepsilon_2, \quad (1)$$

где ε_1 , ε_2 – диэлектрическая проницаемость 1-го и 2-го компонентов соответственно;

v_1 , v_2 – объемные доли 1-го и 2-го компонентов соответственно.

Обычно при производстве спиральных антенн для изготовления корпуса используется пресс-материал с диэлектрической проницаемостью 4,4–4,5 [6]. Однако в нижней части рабочего диапазона частот коэффициент усиления спиральных антенн с указанным корпусом недостаточно высокий по сравнению с коэффициентом усиления в области более высоких частот. Поэтому для расширения рабочего диапазона антенны в области нижних частот при сохранении минимальности габаритов необходимо использование материалов с повышенной диэлектрической проницаемостью.

В работе [7] описаны встроенные пленочные конденсаторы на полимерной основе, где в качестве наполнителя использовался титанат бария. Показано, что данным наполнителем можно варьировать показатель диэлектрической проницаемости. Однако такой материал подходит только для изготовления изделий методом нанесения на пленку, и его невозможно использовать как конструкционный. В ранее выполненной работе [8] рассмотрен конструкционный композит, получаемый введением титаната бария в прессовочный материал. Показано, что данный наполнитель повышает диэлектрическую проницаемость. Однако ее максимальное значение ограничивается технологическими трудностями введения большого количества наполнителя.

Вышеизложенное указывает на то, что разработка новых материалов для изготовления СВЧ-устройств является актуальной задачей.

В связи с вышеперечисленным, целью данного исследования являлось получение конструкционных композиционных материалов с улучшенными диэлектрическими и технологическими характеристиками и исследование их свойств.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является заливочный композиционный материал, состоящий из эпоксидно-диановой смолы и титаната бария.

Использовалась эпоксидно-диановая

смола марки ЭД-20 с содержанием эпоксидных групп 21 % [9].

В качестве отвердителя использовали аминный – полиэтиленполиамин (ПЭПА) [10].

В качестве наполнителя композиционного диэлектрического материала был выбран титанат бария BaTiO_3 (БТ), поскольку он используется и в других композиционных материалах для повышения диэлектрической проницаемости, кроме того он доступен и дешев [11].

Исходный наполнитель просушили при температуре (110 ± 10) °С в течение 3 часов в сушильном шкафу и охладили до комнатной температуры. Далее эпоксидную смолу прогрели при температуре (120 ± 10) °С в течение 1 часа для повышения ее текучести и удаления влаги. После этого смолу смешивали с различными соотношениями титаната бария с целью получения композитов – эпоксидно-диановых, наполненных титанатом бария (ЭД-БТ). В готовую смесь добавляли соответствующее количество аминного отвердителя при равномерном перемешивании.

Таким образом, было получено 8 составов с содержанием наполнителя от 20 до 70 % масс. Наполнение 70 % масс. BaTiO_3 является максимальным, так как трудно обеспечить дальнейшее введение наполнителя и заливку такого композита.

Далее методом заливки в форму изготовили пластины для проверки свойств материалов с различным содержанием титаната бария. Составы представляли собой гомогенные массы с хорошей текучестью и жизнеспособностью, они равномерно заполняют даже конструктивно сложные формы.

Морфология наполнителя и композиционного диэлектрического материала ЭД-БТ анализировалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) на растровом электронном микроскопе JEOL JCM-5700 (Япония) при ускоряющем напряжении электронного пучка 5 кВ.

Теоретический расчет предполагаемой диэлектрической проницаемости композитов производили по формуле Лихтенеккера.

Экспериментальное определение диэлектрических свойств образцов композитов ЭД-БТ проводили в X-диапазоне СВЧ. Для этого использовался измеритель модуля коэффициента передачи и отражения P2M-18 в режиме измерения КСВН, нагрузка согласованная, волновод 10×23 мм. Размеры исследуемых образцов: 23 мм × 10 мм и высотой от 4 до 10 мм.

Определение усадки образцов проводилось в соответствии с ГОСТ 34206-2017 [12].

Водопоглощение образцов определя-

лось в соответствии с ГОСТ 4650-2014 (ISO 62:2008) [13].

Твердость образцов измеряли твердомером ТН 210 на испытательном стенде «TIME High Technology Ltd.». Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003) «Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору)», нагрузка – 44,1 Н [14].

Также определялась жизнеспособность композитов как одна из важных технологических характеристик в соответствии ОСТ 4Г 0.054.210-83 [15].

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований была про-

ведена с применением программного продукта «STATIC-2» [16]. Значения свойств композиционного материала были определены исходя из трех измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Итогами проведенной работы по исследованию свойств композиционного материала явились следующие результаты.

Структуры частиц порошка титаната бария представлены на рисунке 1. При детальном изучении структуры установлено, что частицы порошка имеют каплевидную (овальную) форму, а размер частиц варьируется от 1 до 5 мкм. Наблюдалось также образование агломератов и различных скоплений данных частиц.

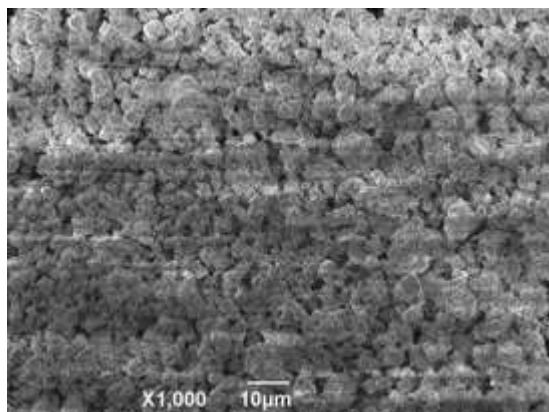


Рисунок 1 – SEM морфология порошка BaTiO₃

Figure 1 - SEM morphology of BaTiO₃ powder

На рисунке 2 представлено SEM изображение композиционного материала ЭД-БТ с максимальным содержанием титаната бария – 70 % масс. Серые частицы – это частицы титаната бария, а черные участки – это эпоксидная смола. Наблюдается равномер-

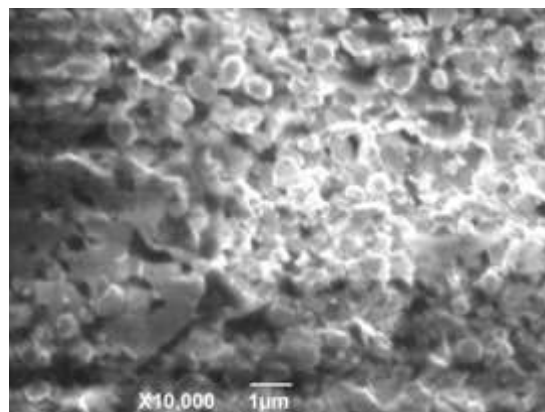


Рисунок 2 – SEM морфология композиционного материала ЭД-БТ с 70 % масс. БТ

Figure 2 - SEM morphology of the composite material ED-BT with 70% wt. BT

ное распределение частиц БТ в эпоксидной смоле.

Основные технологические свойства исследуемых составов материала представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технологические свойства композиционных материалов ЭД-БТ

Table 1 - Technological properties of composite materials ED-BT

№ п/п	Состав композиционного материала, % масс	Нпо Шору, HD	w, %	u, %	T, мин	ρ, г/см ³
1	ЭД-20+ПЭПА+20 БТ	84,0	0,08	0,3	60	1,44
2	ЭД-20+ПЭПА+25 БТ	85,8	0,08	0,3	60	1,49
3	ЭД-20+ПЭПА+30 БТ	88,0	0,07	0,2	50	1,55
4	ЭД-20+ПЭПА+35 БТ	88,9	0,05	0,2	50	1,64
5	ЭД-20+ПЭПА+40 БТ	89,2	0,04	0,2	40	1,74
6	ЭД-20+ПЭПА+50 БТ	89,4	0,04	0,2	40	1,82
7	ЭД-20+ПЭПА+60 БТ	89,8	0,03	0,2	30	2,05
8	ЭД-20+ПЭПА+70 БТ	91,3	0,03	0,2	30	2,13

Н – твердость; w – водопоглощение; u – усадка; T – жизнеспособность; ρ – плотность

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЭПОКСИДНО-ДИАНОВОЙ СМОЛЫ И ТИТАНАТА БАРИЯ

Исходя из данных таблицы 1 следует, что с введением титаната бария в композиционный материал показатель твердости повышается практически линейно от 84 до 91 НД, достигая максимума при наполнении 70 % масс.

Так как полимерные материалы имеют достаточно большое число пор, то они способны поглощать влагу даже из воздуха, в результате чего ухудшаются их диэлектрические свойства. Поэтому было оценено влияние влаги на исследуемые композиционные материалы. Установлено, что показатели водопоглощения (адсорбция воды) имеют достаточно низкие значения и с увеличением количества титаната бария уменьшается от 0,08 до 0,03 %. Следовательно, все составы композита можно считать гидрофобными материалами, что позволяет их использовать при более жестких условиях эксплуатации.

При изготовлении деталей из полимерных композитов важным параметром является технологическая усадка материалов. Данный параметр может изменяться в широких пределах и зависит от наполненности материала. Так, прессовочные материалы имеют усадку порядка 0,5–3 %, а ормокеры (композиты, в состав которых входят керамические частицы) – 1,7–2 %. В данном исследовании полимеризационная усадка определялась по разности между размерами отформованной детали и полости формы для ее заливки. Как видно из таблицы 1, усадка уменьшается от 0,3 до 0,2 %, что дает возможность обеспече-

ния стабильных габаритных размеров даже конструктивно сложных деталей.

При разработке технологии изготовления деталей из полимерных материалов необходимо знать, в течение какого времени может сохраняться приготовленный композиционный материал. Поэтому одной из важных характеристик является жизнеспособность, под которой понимается период времени, в течение которого приготовленная композиция не теряет своих технологических свойств, т.е. остается в вязко-текучем состоянии и может быть использована для заливки деталей. Таким образом, жизнеспособность композиционных материалов характеризуется временем потери текучести композиции после совмещения ее с отверждающими добавками. Жизнеспособность композитов ЭД-БТ варьируется от 30 до 60 мин при различной концентрации компонентов, то есть данный материал можно успешно использовать для изготовления деталей методом заливки в форму.

Важным физическим свойством композиционных материалов является их плотность, представляющая собой отношение массы детали к занимаемому объему. Установлено, что плотность исследуемых композитов по мере наполнения материала изменяется линейно от 1,44 до 2,13 г/см³.

Значения диэлектрической проницаемости полученных образцов композитов с содержанием наполнителя ВаTiO₃ от 20 до 70 % масс, измеренные в X-диапазоне СВЧ, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Диэлектрические проницаемости композиционных материалов ЭД-БТ при (23±5) °С
Table 2 - Dielectric constants of ED-BT composite materials at (23±5) °C

№ п/п	Состав композиционного материала, % масс	Диэлектрическая проницаемость расчетная	Диэлектрическая проницаемость измеренная
1	ЭД-20+ПЭПА+20 БТ	5,03	5,2
2	ЭД-20+ПЭПА+25 БТ	5,44	5,4
3	ЭД-20+ПЭПА+30 БТ	5,98	6,0
4	ЭД-20+ПЭПА+35 БТ	6,50	6,4
5	ЭД-20+ПЭПА+40 БТ	7,80	7,2
6	ЭД-20+ПЭПА+50 БТ	9,50	9,2
7	ЭД-20+ПЭПА+60 БТ	11,0	10,2
8	ЭД-20+ПЭПА+70 БТ	14,6	11,3

Исходя из данных таблицы 2 видно, что диэлектрическая проницаемость композитов возрастает с повышением концентрации ВаTiO₃. Спрогнозированная диэлектрическая проницаемость композитов ЭД-БТ увеличивается от 5,03 до 14,6, а измеренная – от 5,2 до 11,3 при повышении концентрации наполнителя от 20 до 70 % масс. Как видно,

измеренные значения проницаемости согласуются с рассчитанными по правилу логарифмического смешения Лихтенеккера. В то же время следует отметить, что при высоких концентрациях наполнителя заливочная масса становится более густой и пузырькам воздуха труднее выйти на поверхность. В результате в образцах с высокой концентраци-

ей наполнителя образуется больше пор. Поскольку ϵ воздуха ≈ 1 , следовательно, измеренная диэлектрическая проницаемость композитов с высоким наполнением меньше теоретически рассчитанной. Это и наблюдается в составах 7 и 8. Видно, что с повышением концентрации наполнителя с 60 до 70 % масс. измеренная диэлектрическая проницаемость состава ниже спрогнозированной примерно на 20 %.

Из композиционного диэлектрического материала состава 8 ЭД-БТ были изготовлены конструкционные детали методом заливки в форму. Изготовленные детали не имели внешних дефектов: трещин, расслоений – и соответствовали техническим требованиям. Вместе с этим изготовленные детали из материала ЭД-БТ подвергаются механической обработке без каких-либо затруднений. Также стоит отметить, что применяемый в настоящее время в производстве прессовочный материал требует термической обработки деталей при температуре 160 °С в течение 8 часов. Поэтому применение нового материала ЭД-БТ и технологии заливки имеет значимые преимущества, поскольку также позволяет сократить еще технологический цикл изготовления деталей.

Таким образом, полученные композиционные материалы, состоящие из эпоксидно-диановой смолы, показывают как высокие диэлектрические, так и эксплуатационные свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что с повышением концентрации титаната бария от 20 до 70 % масс. в составе эпоксидно-диановых композитов теоретически рассчитанные значения диэлектрической проницаемости изменяются от 5,03 до 14,6, а измеренные аналогичные показатели данных составов – от 5,2 до 11,3, что свидетельствует о возможности использования формулы Лихтенеккера для прогнозирования диэлектрических свойств таких материалов в X-диапазоне СВЧ.

Полученные результаты показывают целесообразность использования, полученного композиционного диэлектрического материала и технологии для изготовления конструкционных деталей СВЧ-устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sebastian M.T. Dielectric Materials for Wireless Communication. Elsevier, 2008. 688 p.
2. Корякова З.В. Керамические материалы в СВЧ-технике // Компоненты и технологии. 2011. № 5. С. 184–186.

3. Влияние титаната бария на электрофизические характеристики терморезистивного материала / К.Г. Кукушина [и др.] // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4. № 4. С. 301–307.

4. Исследование влияния дисперсности функциональных частиц карбонильного железа на радиопоглощающие характеристики композита на их основе / И.Д. Краев [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 1. С. 51–60.

5. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / И.Г. Гуртовник [и др.] Москва : Мир, 2002. 368 с.

6. Антенный элемент и способ его изготовления: пат. 2293406 Рос. Федерация № 2005111490/09; заявл. 18.04.2005; опубл. 10.02.2007, Бюл. № 4.

7. Study on epoxy / BaTiO₃ composite embedded capacitor films (ECFs) for organic substrate applications / S.-D. Cho [et al.] // Materials Science and Engineering B. 2004. 110. p. 233–239. DOI:10.1016/j.mseb.2004.01.022.

8. Кукушина К.Г., Еремин Е.Н., Тищенко Н.М., Кохнюк Д.Д. Влияние титаната бария на диэлектрическую проницаемость эпоксидного пресс-материала // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Вып. 3. Севастополь, 2021. С. 205–206.

9. ГОСТ 10587-84 Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия: введ. 06.02.84. Москва, 1989.

10. ТУ 2413-357-00203447-99 Полиэтиленполиамины. Технические условия: введ. 04.01.99. Москва, 1999.

11. ТУ 20.59.59-057-48591565-2018 Барий титанат для конденсаторов: введ. 04.01.2018. Москва, 2018.

12. ГОСТ 34206-2017 Пластмассы. Метод определения усадки терморезистивных материалов: введ. 07.09.2017. Москва, 2017.

13. ГОСТ 4650-2014 (ISO 62:2008) Пластмассы. Методы определения водопоглощения: введ. 29.05.2014. Москва, 2014.

14. ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003) Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору): введ. 20.11.2015. Москва, 2015.

15. ОСТ 4Г 0.054.210-83 Отраслевой стандарт. Склеивание металлических и неметаллических материалов. 1983, Москва.

16. Вершинин В.И., Перцев Н.В. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента. Омск : Изд-во ОмГУ, 2005. 216 с.

Информация об авторах

Е. Н. Еремин – доктор технических наук, декан Машиностроительного института, профессор Омского государственного технического университета.

К. Г. Кукушина – инженер-технолог I кат. сектора новых материалов и технологий Центрального конструкторского бюро автоматики, г. Омск, Российская Федерация; аспирант IV курса кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЭПОКСИДНО-ДИАНОВОЙ СМОЛЫ И ТИТАНАТА БАРИЯ

государственного технического университета.

Е. А. Рогачев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета.

Н. М. Тищенко – ведущий инженер-технолог сектора новых материалов и технологий Центрального конструкторского бюро автоматики.

REFERENCES

1. Sebastian, M.T. (2008). *Dielectric Materials for Wireless Communication*. Elsevier.

2. Korjakova, Z.V. (2011). Ceramic materials in microwave technology. *Components and technologies*, (5), 184-186. (In Russ.).

3. Kukushina, K.G., Eremin, E.N., Tishchenko, N.M. & Kokhniuk, D.D. (2021). The influence of barium titanate on the electrophysical characteristics of a thermosetting material. *Infocommunications and Radio Technologies*, (4), 301-307. (In Russ.).

4. Kraev, I.D., Govorov, V.A., Shirokov, V.V. & Shashkeev, K.A. (2017). Study of the Effect of Dispersion of Functional Carbonyl Iron Particles on the Radio Absorbing Characteristics of a Composite Based on Them. *Aviation materials and technologies*, (1), 51-60.

5. Gurtovnik, I.G., Sokolov, V.N., Trofimov, N.N. & Shalgunov, S.I. (2002). *Radiotransparent fiberglass products*. Moscow: Mir. (In Russ.).

6. Korotkova, L.A., Korobejnikov, G.V. & Zaiceva, N.V. (2007). Antenna element and method for its manufacture. *Pat. 2293406. Russian Federation, published on 10.02.2007*. Bull. No. 4. (In Russ.).

7. Cho, S.-D., Lee, J.-Y., Hyun, J.-G. & Paik, K.-W. (2004). Study on epoxy / BaTiO₃ composite embedded capacitor films (ECFs) for organic substrate applications. *Materials Science and Engineering B*, (110), 233-239. DOI:10.1016/j.mseb.2004.01.022.

8. Kukushina, K.G., Eremin, E.N., Tishchenko, N.M. & Kokhniuk, D.D. (2021). Influence of barium titanate on the dielectric constant of epoxy press material. *Microwave engineering and telecommunication technologies*, (3), 205-206. (In Russ.).

9. Resins epoxy-diane uncured. Specifications. (1984). GOST 10587-84 from 6 Feb. 1984. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

10. Polyethylenepolyamines. Specifications. (1999) TC 2413-357-00203447-99 from 4 Jan 1999. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

11. Barium titanate for capacitors. (2018). TC 20.59.59-057-48591565-2018 from 4 Jan. 2018. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

12. Plastics. Method for determining the shrinkage of thermosetting materials. (2017). GOST 34206-2017 from 7 Sep. 2017. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

13. Plastics. Methods for determining water absorption. (2014). GOST 4650-2014 (ISO 62:2008) from 29 May 2014. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

14. Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness with a durometer (Shore hardness). (2015). GOST 24621-2015 (ISO 868:2003) from 20 Nov. 2015. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

15. Bonding of metallic and non-metallic materials. (1983). OST 4G 0.054.210-83 from 1983. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

16. Vershinin, V.I. & Percev, N.V. (2005). *Planning and mathematical processing of the results of a chemical experiment*. Omsk: Publishing house OmsSU. (In Russ.).

Information about the authors

E.N. Eremin - Doctor of Technical Sciences, Dean of the Mechanical Engineering Institute, Professor of the Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation.

K.G. Kukushina - engineer-technologist I cat. sector of new materials and technologies of the Central Design Bureau of Automatics, Omsk, Russian Federation; 4th year postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation.

E.A. Rogachev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Physics, Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation.

N.M. Tishchenko - Leading engineer-technologist of the sector of new materials and technologies of the Central Design Bureau of Automatics, Omsk, Russian Federation.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.01.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was received by the editorial board on 07 Jan 2023; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.