

На правах рукописи



Кукушина Ксения Геннадьевна

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНО-ДИАНОВЫХ СМОЛ,
НАПОЛНЕННЫХ СОЕДИНЕНИЯМИ ТИТАНА**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ) на кафедре «Машиностроение и материаловедение»

Научный руководитель: **Еремин Евгений Николаевич**,
заслуженный работник Высшей школы Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск

Официальные оппоненты: **Панин Сергей Викторович**,
доктор технических наук, профессор, профессор РАН, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Низина Татьяна Анатольевна,
доктор технических наук, профессор, директор Института архитектуры и строительства, профессор кафедры строительных конструкций федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет Н. П. Огарёва», г. Саранск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань

Защита диссертации состоится « 20 » сентября 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.350.08, созданном на базе ОмГТУ, по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ и на сайте www.omgtu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.08. Тел.: 8 (3812) 62-85-58, внутр.: 4246, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан «__» июня 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Ю.О. Филиппов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из важных направлений развития современной электронной промышленности является сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника. Материалы, применяемые в СВЧ-диапазоне, используются в наземных и спутниковых системах связи, таких как радио, GPS, TV, интернет, мониторинг состояния окружающей среды, мобильная связь, сеть радиочастотной идентификации и т.д. Развитие данных отраслей неразрывно связано с разработкой новых материалов с улучшенными не только физико-механическими и технологическими свойствами, но и специальными свойствами, что является одним из ключевых факторов в создании нового конкурентоспособного облика электронной промышленности Российской Федерации до 2030 года. Технический уровень разрабатываемой сложной электронной аппаратуры, в первую очередь, определяют диэлектрические свойства используемых материалов. Кроме того, важными требованиями для изделий из СВЧ-материалов являются: малый размер, простота и технологичность изготовления, значительный ресурс эксплуатации и, конечно же, низкая стоимость.

В настоящее время для работы в СВЧ-диапазоне используются, в основном, керамические материалы с высокими значениями диэлектрической проницаемости. Однако их использование ограничено ввиду таких недостатков, как хрупкость, трудоемкий многостадийный процесс изготовления, сложность механической обработки и высокая стоимость.

В этом отношении в последние годы все более востребованными становятся полимерные композиционные материалы, поскольку они могут легко сочетать в себе комбинации многих свойств, что является одним из их преимуществ по сравнению с традиционными керамическими материалами. Полимерная основа отвечает за физико-механические свойства и технологичность переработки, а такие свойства материалов как диэлектрическая проницаемость, водопоглощение и другие обеспечиваются наполнителями. Это позволяет на основе одних исходных материалов получать композиты с различными характеристиками.

В то же время вопросами, затрагивающими повышение диэлектрической проницаемости полимерных материалов, и их применения в изделиях радиоэлектронного назначения, не уделяется достаточного внимания. Поэтому исследования в данной области являются, безусловно, актуальными.

Степень разработанности темы диссертации

Теоретические и экспериментальные исследования, посвященные изучению полимерных материалов с особыми функциональными свойствами, в том числе используемых в СВЧ-индустрии, выполнены многими отечественными и зарубежными учеными. В Российской Федерации исследования в данном направлении проводятся в Санкт-Петербургском Государственном Электротехническом Университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (г. Москва), в АО «Центральное конструкторское бюро специальных радиоматериалов» (г. Москва), в ФГБУН «Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН» (г. Москва), в Владимирском государственном университете имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А. Н. Туполева – КАИ, в Казанском национальном

исследовательском технологическом университете, в Национальном исследовательском Мордовском государственном университете им. Н. П. Огарева, в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А., в Уфимском государственном нефтяном техническом университете, в АО «Центральное конструкторское бюро автоматики» (г. Омск), в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), в Национальном исследовательском Томском государственном университете, в Омском государственном техническом университете и др.

Значительный вклад в изучение свойств полимерных материалов с особыми свойствами, в том числе СВЧ-материалов, внесли: Е. Н. Каблов, А.Н. Лагарьков, В.Н. Семенов, Е. М. Готлиб, Т. А. Низина, Т. П. Устинова, И. Р. Кузеев, И. Г. Гуртовник, В.И. Соколов, Ю.М. Поплавко, И.Д. Краев и др.

За рубежом широко известны труды Mailadil T. Sebastian (National Institute for Interdisciplinary Science and Technology, India), Rick Ubig (Boise State University, USA), Heli Jantunen (University of Oulu, Finland), ученых Joo-Yeon Lee, Kyung-Wook Paik (Korea Advanced Institute of Science and Technology, South Korea) и др.

В настоящее время проводятся интенсивные исследования, направленные на разработку полимерных материалов, эффективных наполнителей и методов изготовления изделий из них. Среди полимерных материалов можно выделить эпоксидно-диановые смолы, благодаря их способности к модификации, высокой технологичности, доступности и низкой стоимости. Так в радиоэлектронной промышленности для изготовления основного корпуса спиральных антенн используется пресс-материал на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы УП-284С. Однако значение диэлектрической проницаемости данного материала находится на низком уровне и составляет 4,4. Поэтому перспективными материалами могут являться композиты на основе эпоксидно-диановых смол, наполненные соединениями титана, такими как диоксид титана и титанат бария, которые показывают высокую относительную диэлектрическую проницаемость и в то же время не снижают механические и технологические свойства.

В связи с этим получение новых представлений и установление связей состава эпоксидно-диановых композитов с комплексом диэлектрических и эксплуатационных свойств изделий является актуальной задачей материаловедения.

Цель диссертационной работы – разработка композиционного материала на основе эпоксидно-диановой смолы с высокой диэлектрической проницаемостью для изготовления деталей радиоэлектронного назначения.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Получить и исследовать составы композиционных материалов на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы, изготавливаемых методом прессования, отличающиеся концентрацией соединений титана, их влияние на диэлектрическую проницаемость и технологические свойства.

2. Получить и исследовать составы композиционных материалов на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы, изготавливаемых методом заливки, отличающиеся концентрацией соединений титана, их влияние на диэлектрическую проницаемость и технологические свойства.

3. Установить наиболее перспективный, с точки зрения показателя диэлектрической проницаемости, состав композиционного материала для дальнейших исследований.

4. Исследовать влияние модальности загрузки выбранного наполнителя и его дисперсности на структуру и свойства композиционных материалов.

5. Исследовать фазовый состав и тонкую структуру перспективного композиционного материала и определить их влияние на эксплуатационные свойства.

6. Апробировать результаты исследований в условиях производства.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлено, что перспективными диэлектрическими материалами являются композиты на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы с тримодальной загрузкой наполнителя титаната бария, обладающие диэлектрической проницаемостью, в зависимости от степени дисперсности частиц, от 15,3 до 18,9.

2. Впервые выявлено, что в тримодальном композите с наполнителем титанатом бария атомарная концентрация титана и бария в два раза выше по сравнению с одномодальным композитом, что повышает диэлектрическую проницаемости материала в 1,67 раза.

3. Впервые показано, что в композиционном материале на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы с наполнением титанатом бария фракциями разной дисперсности положения рефлексов на дифрактограммах смещены в сторону больших углов и уменьшены межплоскостные расстояния кристаллической решетки относительно одномодального композита, а титанат бария находится как в тетрагональной, так и в кубической формах.

4. Установлено, что замена одномодальной загрузки композита наполнителем на тримодальную обеспечивает уменьшение величины макронапряжений в три раза, что может повышать эксплуатационную надежность изделий из такого материала.

5. Разработан новый композиционный материал на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы, наполненный 70 % масс. титанатом бария фракциями дисперсности $(1 - 5) \text{ мкм} \div (0,7 - 0,9) \text{ мкм} \div (0,1 - 0,3) \text{ мкм}$ в соотношении $60 \div 30 \div 10$ соответственно, диэлектрическая проницаемость которого достигает 18,9.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны составы перспективных композиционных диэлектрических материалов на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы, обладающие повышенной диэлектрической проницаемостью и высокими технологическими свойствами для изготовления деталей радиоэлектронного назначения.

2. Предложена технология изготовления корпуса полусферической спиральной антенны из разработанных композиционных материалов с различными значениями диэлектрической проницаемости с увеличенным коэффициентом усиления антенны до 4,7 дБ в нижней части рабочего диапазона частот, и расширенным вниз рабочим диапазоном антенны на 300 МГц (до 0,7 ГГц).

3. Результаты исследований использованы в АО «Центральное конструкторское бюро автоматики» при разработке сверхширокополосной спиральной антенны.

Теоретическая значимость работы

Результаты исследований, представленные в диссертации, имеют фундаментальный характер и вносят существенный вклад в расширение знаний о полимерных композиционных материалах, поскольку содержат новые представления о влиянии состава, связности, размера частиц наполнителя из соединений титана на диэлектрическую проницаемость и технологические свойства материалов на основе эпоксидно-диановой смолы.

На защиту выносятся:

1. Совокупность результатов исследований трансформации свойств материалов на основе эпоксидно-диановой смолы вследствие применения титаната бария фракциями разной дисперсности, позволяющая значительно увеличить диэлектрическую проницаемость композиций.
2. Совокупность количественных и качественных данных, показывающих, что тримодальная загрузка эпоксидно-диановой смолы наполнителем титанатом бария улучшает структурно-фазовое состояние композиционного материала.
3. Результаты исследований технологических показателей материалов на основе эпоксидно-диановой смолы с наполнением титанатом бария.
4. Рациональные рецептуры композиционных материалов на основе эпоксидно-диановой смолы для изготовления из них изделий или их частей, отличающихся значениями диэлектрической проницаемости.
5. Новая технология изготовления деталей радиоэлектронного назначения методом послойной заливки в форму, которая обеспечивает получение изделий из композитов со ступенчато изменяющейся диэлектрической проницаемостью для использования их в диапазоне частот от 0,7 до 18 ГГц.

Методология и методы исследования

Для изучения объектов в диссертационной работе использованы современные приборы и взаимодополняющие методы исследований: методы оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, волноводный метод, метод лазерной дифракции, рентгенофазовый анализ. Для определения физико-механических и эксплуатационных свойств в работе также применены стандартные методы испытаний.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартных методов исследования с применением современного оборудования, прошедшего метрологическую поверку; достаточной воспроизводимостью результатов экспериментов, статистической обработкой полученных данных с помощью программного обеспечения, а также их согласованностью с известными литературными данными. Результативность полученных результатов подтверждена в производственных условиях.

Апробация работы

Основные результаты исследований представлены: на научно-технических конференциях АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника» (г. Фрязино, 2018, 2023 г.); IV и V международных научно-технических конференциях «MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY UPDATE» (г. Омск, 2020, 2021 гг.); VIII всероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем СВЧ-2020» (г. Омск, 2020 г.); XI международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» «Oil and gas engineering - 2021» (г. Омск, 2021); II всероссийском форуме «Взгляд молодежи на пути развития оборонных предприятий» (г. Реутов, 2021); 31-ой международной научно-технической Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2021) (г. Севастополь, 2021 г.); международной молодежной научно-практической конференции «Роль Омской молодежи в решении задач развития оборонно-промышленного комплекса региона» в рамках Международного

военно-технического форума «АРМИЯ-2021» (г. Омск, 2021); XV международной научно-технической конференции «ДИНАМИКА СИСТЕМ, МЕХАНИЗМОВ И МАШИН» (г. Омск, 2021 г.); научно-практической конференции «Диверсификация ОПК Омского региона» в рамках VIII международного военно-технического форума «АРМИЯ-2022» (г. Омск, 2022 г.); XII всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); на всероссийских конкурсах «Авиастроитель года» (г. Москва, 2020 и 2021 гг.).

Личный вклад автора

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в анализе литературы по теме диссертации, выборе объектов и методов исследования, разработке рецептур составов, изготовлении образцов композитов и изделий, получении экспериментальных результатов, представлении результатов работы и подготовке публикаций. Обработка, анализ и обобщение экспериментальных результатов выполнены автором самостоятельно либо при его непосредственном участии.

Автором предложены новые подходы к изготовлению корпусов спиральных антенн, отработана технология заливки.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. Общий объем работы составляет 162 страницы, включая 66 рисунков и 41 таблицу. Список литературы содержит 127 наименований.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 научных статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 4 публикации в изданиях, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность данного исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные достижения, выносимые на защиту, приведена апробация научных результатов, изложена структура работы.

В первой главе диссертации представлен аналитический обзор научной литературы по теме исследования. Показано состояние научных исследований в области создания диэлектрических композиционных материалов в России и за рубежом в настоящее время. Рассмотрены особенности структуры и свойств композиционных материалов, применяемых в радиоэлектронной промышленности. На основании проведенного анализа сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе описаны объекты, методы и средства экспериментального исследования.

Объектами исследований являлись две группы композиционных диэлектрических материалов.

В качестве основы для создания композиционных диэлектрических материалов первой группы был взят готовый прессовочный эпоксидный материал УП-284С. Данный материал представляет собой термореактивную композицию на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы ЭД-8, отвердителя - 4,4-

диаминодифенилметана, красителя – фталоцианинового зеленого, наполнителя – микростекловолокна и ускорителя – УП-0632 (производитель ПАО «Уралхимпласт»).

В качестве наполнителей использовались - диоксид титана марки РК (производитель ООО «НИИ ПМ») и титанат бария марки ТБК-1 (производитель ЗАО «НПФ «Люминофор»).

Для исследований подготовлены композиционные материалы первой группы: УП-Т (наполненные диоксидом титана) и УП-БТ (наполненные титанатом бария). Составы композиционных материалов первой группы, используемые в диссертационной работе представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные составы композиционных диэлектрических материалов первой группы

Композиционный материал	Обозначение материала	Состав, % масс.		
		УП-284С	TiO ₂	BaTiO ₃
Композиционный диэлектрический материал УП-Т	УП	100	-	-
	УП-7Т	93,0	7,0	-
	УП-15Т	85,0	15,0	-
	УП-30Т	70,0	30,0	-
Композиционный диэлектрический материал УП-БТ	УП-7БТ	93,0	-	7,0
	УП-15БТ	85,0	-	15,0
	УП-30БТ	70,0	-	30,0
	УП-35БТ	65,0	-	35,0

В качестве основы для создания композиционных материалов второй группы была взята низкоплавкая эпоксидно-диановая смола ЭД-20 (производитель ФКП «Завод имени Я.М. Свердлова»). В качестве отвердителя использовался полиэтиленполиамин марки А (ПЭПА) (производитель АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ»). В качестве наполнителей использовались также диоксид титана и титанат бария.

Для исследований подготовлены композиционные материалы второй группы: ЭД-Т (наполненные диоксидом титана) и ЭД-БТ (наполненные титанатом бария). Составы композиционных материалов второй группы, используемые в диссертационной работе представлены в таблице 2.

В данной работе для сравнения свойств исследуемых композитов в качестве эталонного материала выбран эпоксидный пресс-материал УП-284С (УП), широко используемый в промышленности в настоящее время.

Композиционные диэлектрические материалы первой группы представляют собой прессовочные композиции на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы. Прессовочные композиции первой группы изготавливались смешиванием компонентов в лабораторной мельнице после предварительной сушки наполнителей. Изготовление образцов из композиционного материала проводили методом литьевого прессования.

Композиционные диэлектрические материалы второй группы представляют собой заливочные композиции на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы. Приготовление заливочной композиции представляет собой следующую последовательность технологических операций: предварительная сушка наполнителей и прогревание жидкой эпоксидно-диановой смолы, смешивание смолы с наполнителями, прогревание смеси, введение аминного отвердителя.

Таблица 2 – Экспериментальные составы композиционных диэлектрических материалов второй группы

Композиционный материал	Обозначение материала	Состав, % масс.			
		ЭД-20	ПЭПА	TiO ₂	BaTiO ₃
Композиционный диэлектрический материал ЭД-Т	ЭД-20Т	72,0	8,0	20,0	-
	ЭД-25Т	67,5	7,5	25,0	-
	ЭД-30Т	63,0	7,0	30,0	-
	ЭД-35Т	58,5	6,5	35,0	-
	ЭД-40Т	54,0	6,0	40,0	-
	ЭД-50Т	45,0	5,0	50,0	-
	ЭД-60Т	36,0	4,0	60,0	-
Композиционный диэлектрический материал ЭД-БТ	ЭД-20БТ	72,0	8,0	-	20,0
	ЭД-25БТ	67,5	7,5	-	25,0
	ЭД-30БТ	63,0	7,0	-	30,0
	ЭД-35БТ	58,5	6,5	-	35,0
	ЭД-40БТ	54,0	6,0	-	40,0
	ЭД-50БТ	45,0	5,0	-	50,0
	ЭД-60БТ	36,0	4,0	-	60,0
	ЭД-70БТ	27,0	3,0	-	70,0

Изготовление образцов для определения свойств проводили методом заливки в форму (литье без давления).

В соответствии с техническими требованиями радиоэлектронной отрасли для изготовления деталей конструкционного назначения из полимерных материалов основными контролируемыми свойствами являются диэлектрическая проницаемость, твердость, водопоглощение, усадка.

В работе определение диэлектрической проницаемости осуществлялось как теоретически, так и экспериментально. Выбор наилучшего состава композиционного материала осуществляли исходя из достижения наибольшей диэлектрической проницаемости.

Теоретический расчет относительной диэлектрической проницаемости гетерогенных систем проводился с помощью формулы Лихтенеккера.

Экспериментальное определение диэлектрической проницаемости исследуемых композиционных материалов проводилось в X-диапазоне СВЧ волноводным методом. Измерительный комплекс состоял из измерителя модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-18 в режиме измерения КСВН, волновода стандартного сечения 10×23 мм. На основе измерений смещения положения минимума КСВН определялась частота f_0 и вычислялась диэлектрическая проницаемость.

В работе использовались методы оптической и электронной микроскопии для структурного исследования композиционных материалов и наполнителей с применением современного оборудования - оптический микроскоп Биолам М-1 с объективом коррекции и видеоокулярором ORBITOR-2 MP100, растровый электронный микроскоп JEOL JCM-5700 (Япония) с приставкой рентгеновского микроанализа INCAx-Act, «Oxford Instruments».

Размер частиц наполнителей был определен методом лазерной дифракции частиц на приборе SALD-2300 «Shimadzu» (Япония).

Для анализа элементного состава композиционных материалов, а также электронного состояния атомов использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), который проводился на установке Surface Science Center (Riber).

Рентгенофазовый анализ выполнен на многофункциональном рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

Исследования топографии поверхности образцов проводились на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NTEGRA Prima.

В экспериментальной части работы были использованы стандартные методы испытаний физико-механических и технологических свойств.

Третья глава посвящена исследованию влияния типа эпоксидно-диановых смол и наполнителей на диэлектрическую проницаемость и технологические свойства получаемых композиционных материалов, а также выбору рационального состава материалов и технологии изготовления.

С этой целью были изготовлены и исследованы композиты первой группы УП-Т на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы ЭД-8 с различным наполнением диоксида титана – 7, 15 и 30 % масс.

Зависимость диэлектрической проницаемости образцов исследованных композитов типа УП-Т представлена на рисунке 1.

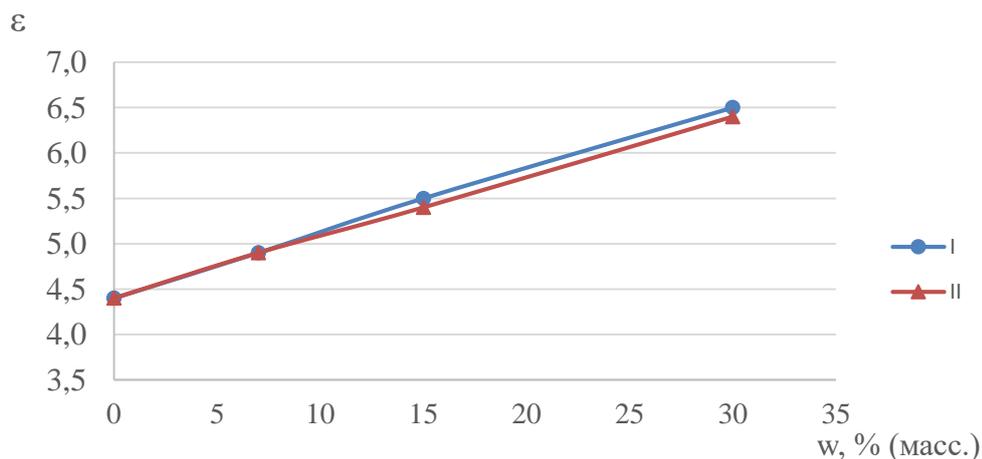


Рисунок 1 – Зависимость диэлектрической проницаемости образцов композитов УП-Т от содержания наполнителя:

I – расчетная; II – измеренная

Из рисунка 1 видно, что диэлектрическая проницаемость композитов первой группы УП-Т возрастает с повышением концентрации диоксида титана. Расчетная диэлектрическая проницаемость композитов УП-Т при повышении концентрации наполнителя от 7 до 30 % масс. увеличивается от 4,9 до 6,5, а измеренная от 4,9 до 6,4. Показатель твердости для наилучшего состава УП-30Т составляет 85 НД, полимеризационная усадка - 0,2 %, а показатель водопоглощения - 0,08 %. Разница между расчетными и измеренными значениями проницаемости составляет не более 2 %, что свидетельствует о возможности использования формулы Лихтенеккера для прогнозирования диэлектрических свойств материалов типа УП-Т в X-диапазоне СВЧ с доверительной вероятностью 0,98.

Для проверки технологичности изготовления изделий из такого материала были изготовлены корпусные элементы методом литьевого прессования. Полученные детали из композита УП-30Т не имели трещин, недопрессовок, расслоений и полностью соответствовали техническим требованиям стандартов отрасли.

Далее аналогично исследовались свойства композиционных материалов на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы с наполнением титанатом бария, составы которых представлены в таблице 1.

Зависимость диэлектрической проницаемости образцов исследованных композитов типа УП-БТ представлена на рисунке 2.

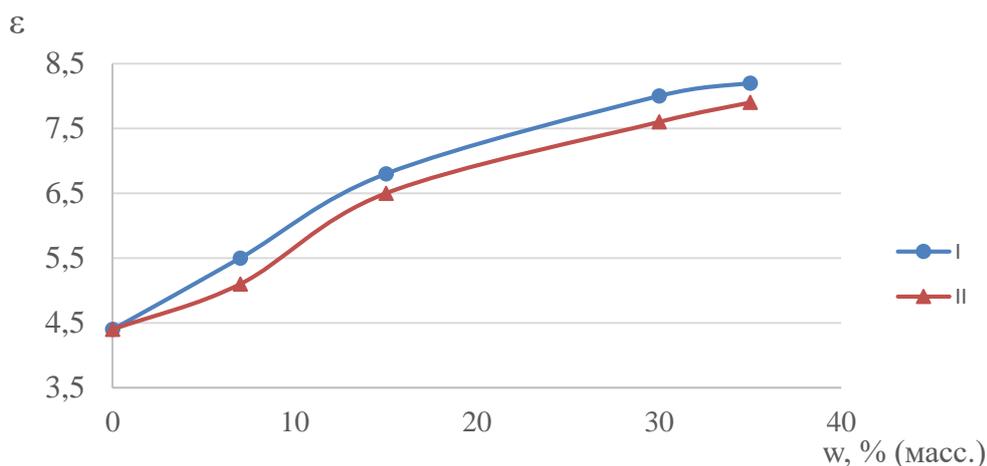


Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости образцов композитов УП-БТ от содержания наполнителя:
I – расчетная; II – измеренная

Из данных рисунка 2 видно, что диэлектрическая проницаемость композитов первой группы УП-БТ возрастает с повышением концентрации титаната бария более значительно. Расчетная диэлектрическая проницаемость композитов УП-БТ при повышении концентрации наполнителя от 7 до 35 % масс. увеличивается от 5,5 до 8,2, а измеренная от 5,1 до 7,9. Показатель твердости для наилучшего состава УП-35БТ составляет 88 НД, полимеризационная усадка - 0,1 %, а показатель водопоглощения - 0,07 %. Разница между расчетными и измеренными значениями проницаемости составляет не более 7 %, что свидетельствует о возможности использования формулы Лихтенеккера для прогнозирования диэлектрических свойств материалов типа УП-БТ в X-диапазоне СВЧ с доверительной вероятностью 0,93.

Для проверки технологичности изготовления изделий из такого материала были изготовлены корпусные элементы методом литьевого прессования. Полученные детали из композита УП-35БТ не имели трещин, недопрессовок, расслоений и также полностью соответствовали техническим требованиям стандартов отрасли.

Таким образом, показатель диэлектрической проницаемости композита на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы можно максимально повысить введением наполнителей в материал: диоксида титана в 1,45 раза (до значения 6,4), а титаната бария – в 1,8 раза (до значения 7,9) соответственно. В то же время необходимо

отметить, что для ряда изделий и/или их отдельных частей требуются материалы с высокими, более 10, значениями диэлектрической проницаемости.

Для исследования композиционных материалов второй группы на основе низкоплавкой (жидкой) смолы - ЭД-20 были изготовлены образцы типа ЭД-Т с наполнением диоксида титана от 20 до 60 % масс. и типа ЭД-БТ с наполнением титаната бария от 20 до 70 % масс. Составы исследуемых материалов приведены в таблице 2.

Зависимости диэлектрических проницаемостей образцов исследованных композитов типа ЭД-Т и ЭД-БТ представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

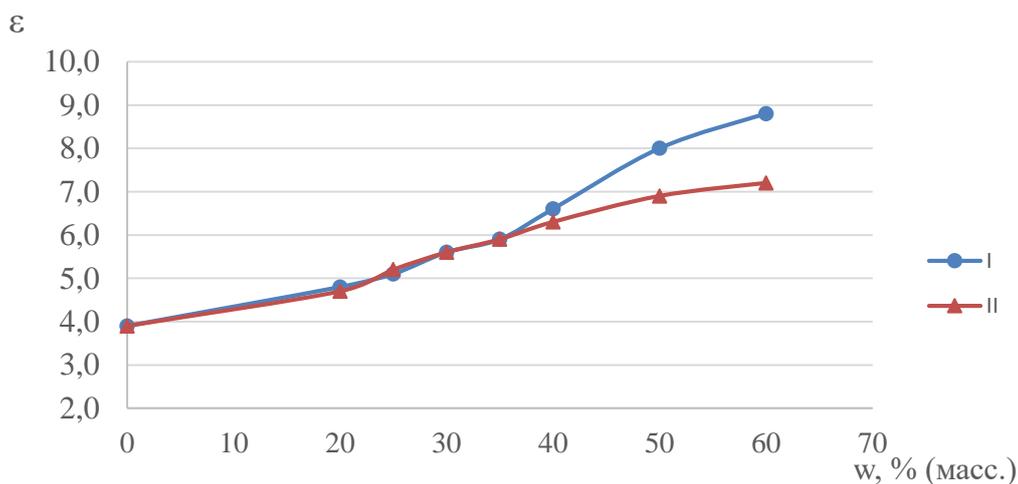


Рисунок 3 – Зависимость диэлектрической проницаемости образцов композитов ЭД-Т от содержания наполнителя:
I – расчетная; II – измеренная

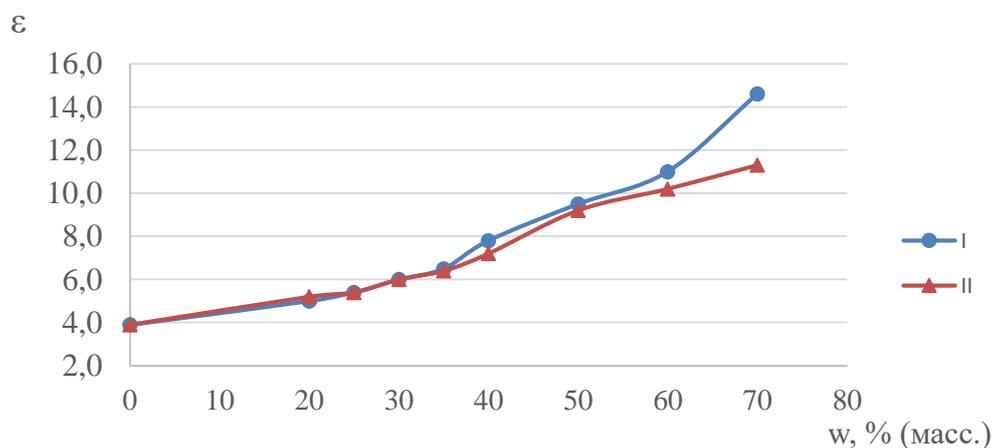


Рисунок 4 – Зависимость диэлектрической проницаемости образцов композитов ЭД-БТ от содержания наполнителя:
I – расчетная; II – измеренная

Исходя из данных видно, что диэлектрическая проницаемость композитов второй группы также возрастает с повышением концентрации, как диоксида титана, так и титаната бария. Расчетная диэлектрическая проницаемость композитов ЭД-Т при повышении концентрации наполнителя от 20 до 60 % масс. увеличивается от 4,8 до 8,8, а измеренная от 4,7 до 7,2. Показатель твердости для наилучшего состава ЭД-60Т

составляет 87,9 HD, полимеризационная усадка - 0,3 %, а показатель водопоглощения - 0,05 %. Измеренные значения проницаемости согласуются с рассчитанными по формуле Лихтенеккера, но в то же время при высоких концентрациях наполнителя (более 50 % масс) измеренные значения диэлектрической проницаемости меньше теоретически рассчитанных, до 20 %.

Расчетная диэлектрическая проницаемость композитов ЭД-БТ при повышении концентрации наполнителя от 20 до 70 % масс. увеличивается от 5,0 до 14,6, а измеренная от 5,2 до 11,3. Показатель твердости для наилучшего состава ЭД-70БТ составляет 91,3 HD, полимеризационная усадка - 0,2 %, а показатель водопоглощения - 0,03 %. Измеренные значения проницаемости согласуются с рассчитанными по формуле Лихтенеккера, но в то же время при высоких концентрациях наполнителя (более 60 % масс) измеренные значения диэлектрической проницаемости меньше теоретически рассчитанных, до 30 %.

Таким образом, показатель диэлектрической проницаемости композита на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы можно максимально повысить введением наполнителей в материал: диоксида титана в 1,85 раза (до значения 7,2), а титаната бария – в 2,9 раза (до значения 11,3) соответственно.

Наилучшим диэлектрическим материалом является материал ЭД-70БТ, наполненный 70 % масс. титанатом бария, который имеет высокие значения диэлектрической проницаемости – 11,3 и показателя твердости - 91,3 HD. При этом его полимеризационная усадка составляет 0,2 %, показатель водопоглощения равен 0,03 %, а жизнеспособность 30 мин.

Для проверки технологичности изготовления изделий из такого материала были изготовлены корпусные элементы методом заливки. Полученные детали из композита ЭД-70БТ не имели трещин, недоливов, расслоений и также полностью соответствовали техническим требованиям стандартов отрасли.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что наиболее перспективными материалами являются композиции на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, наполненные титанатом бария, обладающие наибольшей диэлектрической проницаемостью.

Четвертая глава посвящена изучению структуры и эксплуатационных свойств композиционных материалов на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы с частицами наполнителя разной модальности.

В первую очередь, была проведена серия экспериментов по влиянию размера частиц наполнителя на диэлектрическую проницаемость композита. Данный этап исследований показал, что для рассматриваемой системы материалов использование порошка наполнителя более крупной фракции (до 5 мкм) предпочтительнее, чем использование более мелких частиц (до 0,3 мкм) поскольку в этом случае максимальная диэлектрическая проницаемость композита достигает всего лишь 9,8, в то время как при использовании частиц крупной фракции максимальная диэлектрическая проницаемость достигает 11,3.

В связи с этим была выдвинута гипотеза о влиянии связности частиц наполнителя на диэлектрическую проницаемость композита. Предполагалось, что, не изменяя массовую концентрацию наполнителя, можно достичь порога перколяции, то есть момента, когда первоначальное межпространственное расположение изолированных частиц наполнителя максимально сокращается, увеличивая, таким образом, исходную связность 0-3. При исходной связности частицы имеют

значительный зазор между соседними, то есть, окружены основой материала. Достигая перколяционного порога, связность будет повышаться в результате чего свойства композитов должны изменяться, в том числе, и диэлектрическая проницаемость.

В соответствии с этим проведены исследования по увеличению связности композита и оценке влияния связности на его диэлектрическую проницаемость.

С этой целью была изготовлена серия тримодальных композитов с одинаковым массовым наполнением 70 % титанатом бария. Причем наполнение состояло из фракций разного размера в разных соотношениях, но с наибольшим содержанием частиц крупной фракции. Для удобства понимания соотношений между фракциями, общее наполнение принято за 100 %.

Наполнение самой крупной фракции № 1 (1 – 5 мкм) в композиционных материалах изменялось от 50 до 65 %, наполнение фракции № 2 (0,7 – 0,9 мкм) от 25 до 30 %, а наполнение фракции № 3 (0,1 – 0,3 мкм) – от 5 до 20 %.

Исследовались 5 образцов тримодальных композиций, составы которых представлены в таблице 3. Обозначения композитов приняты по содержанию крупнозернистой фракции № 1. Образцы № 1 - № 5 отличаются процентным содержанием частиц разных фракций.

Таблица 3 - Составы тримодальных композиций

Композиционный диэлектрический материал		Состав тримодальных композиций, %			
		фрак. № 1	фрак. № 2	фрак. № 3	
Композиционный диэлектрический материал ЭД-БТ фр	образец № 1	ЭД-БТ фр.50	50	30	20
	образец № 2	ЭД-БТ фр.55	55	25	20
	образец № 3	ЭД-БТ фр.55*	55	30	15
	образец № 4	ЭД-БТ фр.60	60	30	10
	образец № 5	ЭД-БТ фр.65	65	30	5

Диэлектрические проницаемости представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Диэлектрические проницаемости тримодальных композиций

№ п/п	Композиционный диэлектрический материал	Диэлектрическая проницаемость расчетная, ϵ	Диэлектрическая проницаемость измеренная, ϵ
1	ЭД-БТ фр.50	14,6	15,3
2	ЭД-БТ фр.55	14,6	16,3
3	ЭД-БТ фр.55*	14,6	17,5
4	ЭД-БТ фр.60	14,6	18,9
5	ЭД-БТ фр.65	14,6	16,0

Исходя из данных таблицы 4, видно, что измеренная диэлектрическая проницаемость тримодальных композитов значительно превосходит расчетные значения для всех составов и достигает максимального значения, равного 18,9, для композита ЭД-БТ фр.60. Как видно, формула Лихтенеккера не учитывает модальность композитов, поэтому ее использование для прогнозирования диэлектрической проницаемости материалов, наполненных фракциями разной дисперсности, нецелесообразно.

Полученные результаты можно объяснить тем, что при использовании комбинаций разных фракций наполнителя, мелкие частицы могут заполнять зазоры между крупными частицами, что приводит к значительному увеличению плотности упаковки наполнителя.

Это подтверждается микроскопическими исследованиями одномодального и тримодального образцов, которые выявили различия в морфологии композиционных материалов (рисунок 5).

Данные электронной микроскопии показали, что одномодальная композиция (рисунок 5 а), имеет неоднородную структуру, наблюдаются явно выраженные раковины, пустоты, а также образование агломератов и различных скоплений частиц. Для тримодальной композиции (рисунок 5 б) структура более равномерная, однородная, не наблюдаются скопления частиц. Однозначно определяется более упорядоченное распределение частиц наполнителя для тримодального материала по сравнению с одномодальным.

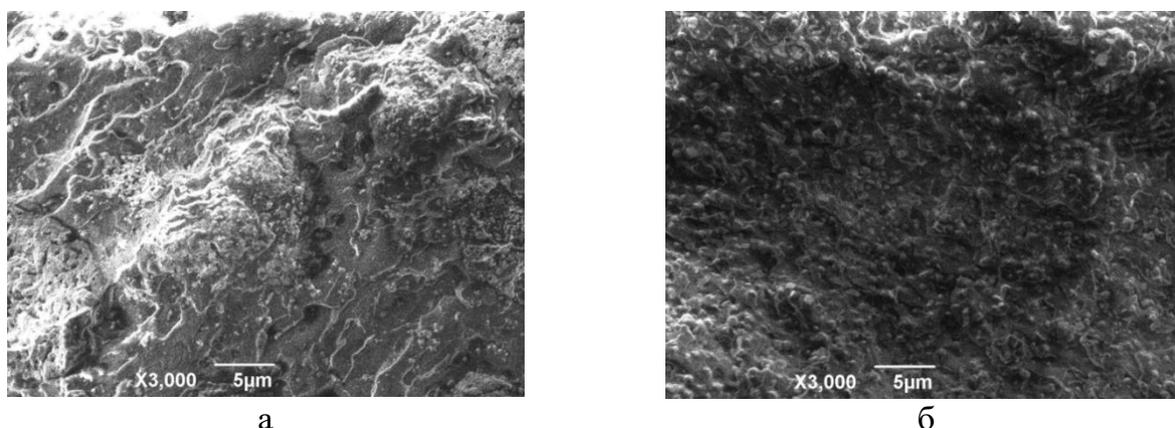


Рисунок 5 – Микрофотографии образцов композитов:
а) ЭД-70БТ; б) ЭД-БТ_{фр.60}

Методом атомно-силовой микроскопии подтверждено, что тримодальная загрузка наполнителя по сравнению с одномодальной загрузкой той же массовой концентрации приводит к однородности распределения наполнителя. На рисунке 6 а показан участок поверхности одномодального композита. Видно, что рельеф неравномерный, на поверхности присутствуют видимые впадины, свидетельствующие о том, что частицы наполнителя отдалены друг от друга.

На рисунке 6 б представлено АСМ-изображение участка поверхности тримодального композита. Видно, что частицы наполнителя разных размеров более плотно соприкасаются друг с другом, тем самым изменяют рельеф образца, делая его поверхность более гладкой (перепад высоты в пределах области сканирования (Δz) для тримодального композита Δz до 912 нм, в то время как для одномодального композита Δz до 1,2 мкм). Таким образом, можно заключить, что тримодальная загрузка наполнителя увеличивает первоначальную связность 0-3, достигая максимальной плотности упаковки наполнителя.

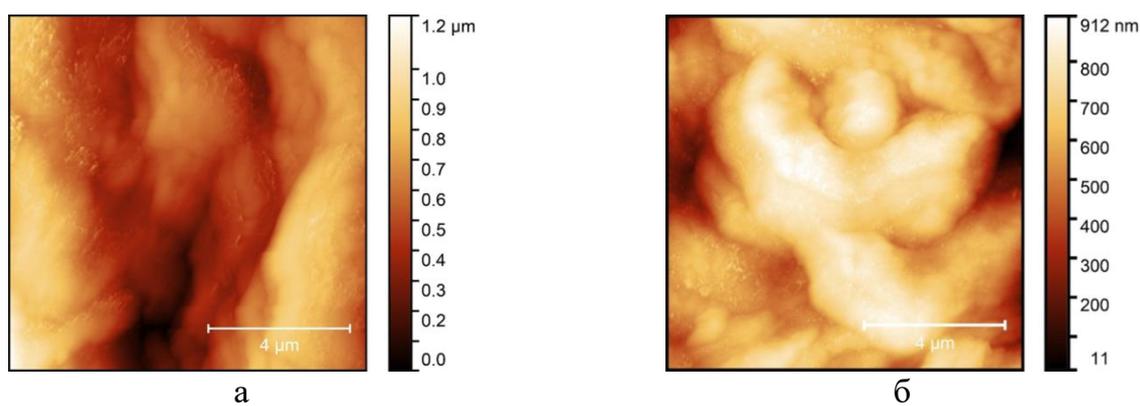


Рисунок 6 – АСМ-изображения образцов композитов:
а) ЭД-70БТ; б) ЭД-БТ_{фр.60}

Сравнительные исследования образцов исследуемых композитов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) представлены на рисунке 7.

Результаты количественного элементного анализа, проведенного по методу коэффициентов элементной чувствительности, представлены в таблице 5.

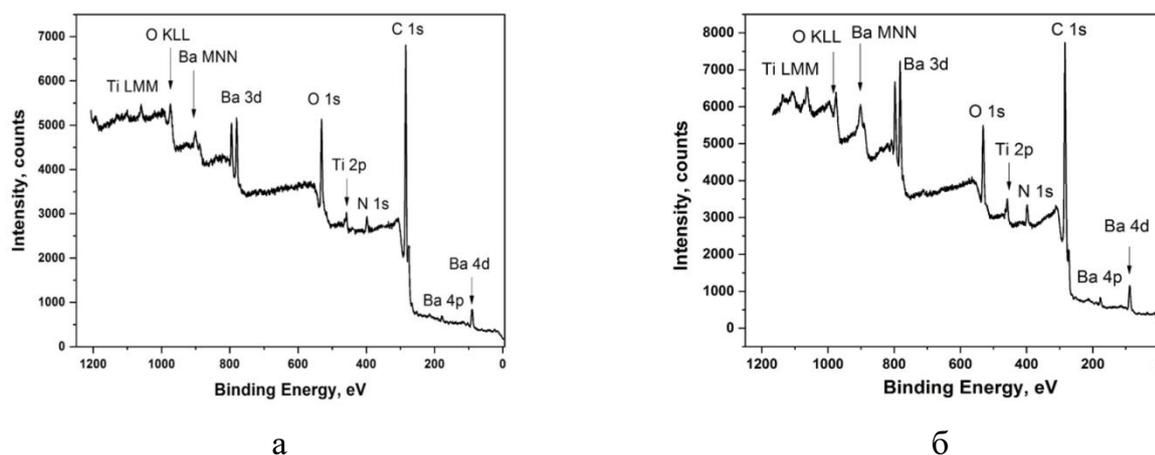


Рисунок 7 - Обзорные РФЭС спектры образцов: а) ЭД-70БТ; б) ЭД-БТ_{фр.60}

Таблица 5 – Концентрация элементов в исследуемых композиционных материалах по данным РФЭС

Концентрация, % ат				
[C]	[O]	[N]	[Ti]	[Ba]
<i>Одномодальный образец ЭД-70БТ</i>				
80,61	12,49	4,36	1,22	1,32
<i>Тримодальный образец ЭД-БТ_{фр.60}</i>				
79,00	12,50	4,00	2,40	2,10

Как видно, атомарная концентрация титана и бария в тримодальном композите ЭД-БТ_{фр.60} практически вдвое превышает атомарную концентрацию титана и бария в одномодальном композите ЭД-70БТ.

Рентгеноструктурный анализ показал, что в тримодальной композиции ЭД-БТ_{фр.60} положения рефлексов смещены в сторону больших углов, уменьшены межплоскостные расстояния относительно одномодального композита ЭД-70БТ, а титанат бария находится как в тетрагональной, так и в кубической формах.

При расчете, проведенном рентгенографическим методом, установлено, что в тримодальном композите ЭД-БТ_{фр.60} значение суммы главных макронапряжений составляет 22,3 МПа, что в 3 раза ниже, чем в одномодальном композите ЭД-70БТ. Таким образом, тримодальная загрузка композита может повышать эксплуатационную надежность изделий из такого материала.

Результаты исследований позволяют заключить, что выдвинутая гипотеза о влиянии связности частиц наполнителя на диэлектрическую проницаемость композита подтверждается.

Таким образом, установлено, наилучшими композиционными материалами являются составы на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы с наполнением титанатом бария фракциями разной дисперсности, которые в зависимости от размера частиц позволяют получать материалы с высокими значениями диэлектрической проницаемости от 15,3 до 18,9. Такие композиции могут быть использованы для изготовления различных изделий и/или их отдельных участков, отличающихся по требованиям диэлектрической проницаемости.

Среди серии тримодальных композитов наилучшим материалом является композит ЭД-БТ_{фр.60}, наполненный фракциями (1 – 5) мкм ÷ (0,7 – 0,9) мкм ÷ (0,1 – 0,3) мкм в соотношении 60 ÷ 30 ÷ 10. Диэлектрическая проницаемость этого состава равна 18,9. Высокая диэлектрическая проницаемость объясняется тримодальной загрузкой композита наполнителем, которая приводит к более упорядоченному распределению частиц наполнителя, в результате чего увеличивается первоначальная связность 0-3, а атомарная концентрация титана и бария повышается вдвое относительно использования одномодальных композитов. При этом твердость такого композита - 92,4 НД, полимеризационная усадка составляет 0,2 %, показатель водопоглощения равен 0,03 %, а жизнеспособность 27 мин.

Разработанные композиционные материалы были опробованы в производстве полусферических корпусов сверхширокополосных спиральных антенн в АО «Центральное конструкторское бюро автоматики» (г. Омск).

Наиболее оптимальным вариантом оказалась модификация корпуса антенны, заключающаяся в изготовлении изделия в виде трех плоских кольцевых слоев из разработанных материалов на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы с различными расчетными значениями диэлектрической проницаемости: слой № 1 с проницаемостью равной 2,5, слой № 2 - 6,4, слой № 3 – 18,9 соответственно. Таким образом, предполагалось увеличить коэффициент усиления (КУ) за счет ступенчатого увеличения диэлектрической проницаемости материала корпуса по мере приближения от вершины антенны (от плоской спирали) к основанию антенны (к нижнему радиопоглощающему кольцу и к рефлектору полусферической спирали).

Для апробации разработанных материалов и технологии была спроектирована заливочная форма, в соответствии с техническими требованиями, учитывающими свойства новых композитов.

Изготовленные трехслойные корпуса устанавливались вместо монокорпуса из пресс-материала УП-284С (условно штатного) с диэлектрической проницаемостью 4,4 на антенну и измерялись отличия уровней сигнала КУ в минимуме эллипса поляризации антенны от штатной антенны. Измеренные значения выигрыша КУ антенн с трехслойным корпусом относительно антенны со штатным корпусом представлены на рисунке 8.

Как видно на рисунке 8, заметное увеличение КУ антенны с трехслойным корпусом по сравнению с КУ штатной антенны из монокорпуса происходит на частотах от 0,7 ГГц до 1,1 ГГц. Максимальный выигрыш КУ антенны с трехслойным корпусом достигает 4,7 дБ на частоте 0,8 ГГц. Применение разработанных композиционных диэлектрических материалов привело к расширению рабочего диапазона антенны на 300 МГц (до 0,7 ГГц). Кроме того, у такой антенны коэффициент перекрытия рабочего диапазона частот 26, в то время как у штатной – 18.



Рисунок 8 – Выигрыш КУ антенн с трехслойным корпусным элементом

Таким образом, применение разработанных композиционных материалов на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы для изготовления корпусов антенн позволяет расширить рабочий диапазон частот антенных устройств, а также увеличить их чувствительность при ограничении массогабаритных характеристик, что обеспечит технический задел для создания перспективных изделий радиоэлектронного назначения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы композиты на основе высокоплавкой эпоксидно-диановой смолы ЭД-8, наполненные соединениями титана. Экспериментально установлено, что при наполнении 35 % масс. титанатом бария такого композита достигаются максимальные значения диэлектрической проницаемости до 7,9, показателя твердости до 88 НД, что соответственно на 79,5 % и на 10 % выше, чем аналогичные показатели ненаполненного штатного пресс-материала УП-284С. При этом полимеризационная усадка составляет 0,1 %, показатель водопоглощения равен 0,07 %.

2. Исследованы композиты на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, наполненные соединениями титана. Экспериментально установлено, что при наполнении 70 % масс. титанатом бария такого композита достигаются максимальные значения диэлектрической проницаемости до 11,3, показателя твердости до 91,3 НД, что соответственно на 157 % и на 14 % выше, чем аналогичные показатели ненаполненного штатного пресс-материала УП-284С. При этом полимеризационная усадка составляет 0,2 %, показатель водопоглощения равен 0,03 %.

3. Установлено, что перспективными диэлектрическими материалами являются композиты на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы с загрузкой наполнителя титаната бария фракциями разной дисперсности. Показано, что тримодальная загрузка такого наполнителя увеличивает первоначальную связность 0-3, вследствие более упорядоченного распределения частиц наполнителя в структуре композита, а

диэлектрическая проницаемость такого композита увеличивается, в зависимости от степени дисперсности частиц, от 15,3 до 18,9.

4. Рентгеноструктурным анализом показано, что в тримодальном композиционном материале положения рефлексов на дифрактограммах смещены в сторону больших углов и уменьшены межплоскостные расстояния кристаллической решетки относительно одномодального композита, а титанат бария находится как в тетрагональной, так и в кубической формах.

5. Методом РФЭС установлено, что в тримодальном композите с наполнителем титанатом бария атомарная концентрация титана и бария в два раза выше по сравнению с одномодальным композитом, что обеспечивает значительное повышение диэлектрической проницаемости материала.

6. Установлено, что замена одномодальной загрузки композита наполнителем на тримодальную обеспечивает уменьшение величины макронапряжений в три раза от 61,9 МПа до 22,3 МПа, что может повышать эксплуатационную надежность изделий из таких материалов.

7. Среди серии тримодальных композиций наилучшим материалом является материал на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, наполненный 70 % масс. титанатом бария фракциями разной дисперсности (1 – 5) мкм ÷ (0,7 – 0,9) мкм ÷ (0,1 – 0,3) мкм в соотношении 60 ÷ 30 ÷ 10. Диэлектрическая проницаемость этого состава равна 18,9. При этом твердость такого композита - 92,4 НД, полимеризационная усадка составляет 0,2 %, показатель водопоглощения равен 0,03 %.

8. Применение разработанных композиционных материалов на основе низкоплавкой эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 для изготовления полусферической спиральной антенны привело к увеличению КУ антенны до 4,7 дБ в нижней части рабочего диапазона частот, а также расширению вниз рабочего диапазона антенны на 300 МГц (до 0,7 ГГц) без увеличения ее габаритных и весовых характеристик. Кроме того, у такой антенны коэффициент перекрытия рабочего диапазона частот 26, в то время как у штатной – 18.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Свойства композиционных материалов, состоящих из эпоксидно-диановой смолы и титаната бария / Е. Н. Еремин, К. Г. Кукушина, Е. А. Рогачев, Н. М. Тищенко // Ползуновский вестник. – 2023. – №1. – С. 223-229.

2. Еремин, Е. Н. Влияние соединений титана на электрофизические и физико-механические свойства композиционных материалов на основе эпоксидно-диановой смолы / Е. Н. Еремин, К. Г. Кукушина, Н. М. Тищенко // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2023. – № 16 (1). – С. 48-55.

3. Кукушина, К. Г. Влияние двуокиси титана на диэлектрические свойства композиционного материала / К. Г. Кукушина, Е. Н. Еремин, Д. Д. Кохнюк // Вестник Сибирского Отделения Академии Военных Наук (Приложение к Вестнику Академии Военных Наук). – 2021. - № 62. – С.113-116.

Статьи в изданиях, входящих в базы цитирования в Scopus и Web of Science:

4. Kukushina, K. G. The influence of titanium compounds on the electrophysical characteristics of the epoxy composite / K. G. Kukushina, E. N. Eremin // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2182: Applied Mechanics and Systems Dynamics (AMSD-2021). – P. 012078-1-012078-6.

5. Eremin, E. N. Dielectric properties of a composite material based on epoxy molding material and titanium dioxide / E. N. Eremin, K. G. Kukushina // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2412: Oil and Gas Engineering (OGE-2021). – P. 040008-1–040008-5.

6. Eremin, E. N. The effect of barium titanate on the dielectric constant of a composite based on an epoxy press material / E. N. Eremin, K. G. Kukushina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1901: Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2021). – P. 012085-1-012085-4.

7. Eremin, E. N. The influence of filler dispersity on radio-absorbing properties of material based on synthetic rubber / E. N. Eremin, K. G. Kukushina, T. N. Filatova // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1546: Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2020). – P. 012074-1-012074-5.

Основные публикации в прочих научных изданиях:

8. Кукушина, К. Г. Применение эпоксидных прессовочных материалов и композитов на их основе в изделиях радиоэлектронного назначения / К. Г. Кукушина, М. А. Федорова, Е. Н. Еремин // Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург, 2023. – С. 407 – 411.

9. Федорова, М. А. Термореактивные эпоксидные композиции в изделиях СВЧ-электроники: свойства и применение / М. А. Федорова, К. Г. Кукушина, Е. Н. Еремин // Материалы юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника – 2023». – Фрязино, 2023. – С. 160-161.

10. Влияние титаната бария на электрофизические характеристики термореактивного материала / К. Г. Кукушина, Е. Н. Еремин, Н. М. Тищенко, Д. Д. Кохнюк // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. - 2021. - Т. 4, №4. - С. 301-307.

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

12. Кукушина, К. Г. Влияние двуокиси титана на диэлектрическую проницаемость эпоксидного пресс-материала / К. Г. Кукушина, Е. Н. Еремин // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы XI Международной научно-технической конференции. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. – С.144-145.

13. Применение аддитивных технологий для изготовления технологической оснастки / К. А. Шуин, К. Г. Кукушина, М. А. Федорова, Д. В. Обуховский, Н. М. Тищенко, Т. Н. Филатова, Г. В. Волков // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. – С. 241-246.

14. Исследование возможности повышения радиопоглощающих свойств материалов / К. Г. Кукушина, Т. Н. Филатова, О. Н. Бакланова, О. А. Княжева, А. В. Лавренов // Материалы юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника. 75 лет развития». – Фрязино, 2018. – С.89-90.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю, Заслуженному работнику высшей школы РФ, доктору технических наук, профессору Евгению Николаевичу Еремину за неоценимую помощь в подготовке диссертации.

Автор искренне благодарен за содействие в выполнении данной работы коллективам сектора новых материалов и технологий, конструкторской бригады, отдела антенн и СВЧ-устройств, цеха по переработке пластмасс АО «ЦКБА», кафедры «Машиностроение и материаловедение» ОмГТУ, лаборатории физики наноматериалов для химических источников тока ОНЦ СО РАН, лаборатории РФА ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, НОРЦ ОмГТУ, а также всем соавторам публикаций.

Подписано в печать 10.06.2024 г.
Оперативный способ печати.
Тираж 100 экз. Заказ № 170624

Отпечатано в ИП Загурская Л. Е.
644024, г. Омск, ул. Лермонтова д. 8
(Дом художников)
Тел. 8 (3812) 31-12-77