



КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ

Монография

Новосибирск
2017

УДК 621.396.67+678.8
ББК 32.84+38.3
К63

Рецензенты:

Габриэлян Д.Д., доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заместитель начальника научно-технического комплекса ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» Федерального научно-производственного центра по науке (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Звездина М.Ю., доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой радиоэлектроники, Донской государственной технической университет (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Авторы:

Предисловие: М.Ю. Звездина;

Глава 1: Л.В. Черкесова, М.Ю. Звездина, Ю.А. Шокова, Г.П. Синявский,
Д.А. Безуглов, Г.Н. Шаламов;

Глава 2: Л.В. Черкесова, М.Ю. Звездина, Ю.А. Шокова, Г.П. Синявский,
Д.А. Безуглов, Г.Н. Шаламов;

Глава 3: Л.В. Черкесова, М.Ю. Звездина, Ю.А. Шокова, Г.П. Синявский,
Д.А. Безуглов, Г.Н. Шаламов;

Глава 4: В.И. Пономаренко, И.М. Лагунов;

Глава 5: С.В. Соколова;

Глава 6: М.И. Матвеев.

К63 Композиционные материалы: разработка и применение: монография; [под ред. М.Ю. Звездиной]. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2017. – 180 с.

ISBN 978-5-4379-0552-4

Монография посвящена вопросам разработки и применения композиционных материалов в электронике и строительстве.

В первом случае рассмотрены вопросы построения композитных материалов из ферромагнитных и киральных материалов на наноуровне. Приведен анализ тенденций разработки таких материалов в виде периодических и непериодических композитных сред, а также теоретические аспекты оценки их электродинамических характеристик. Кроме того, приводятся результаты теоретических и численных исследований разработки радиопоглощающих решеток на основе графитированных элементов.

Во втором случае рассмотрены вопросы применения композитных материалов в строительной технике для повышения живучести железобетонных элементов. Приводится оценка воздействия высоких температур и агрессивных сред на свойства композита.

Для научных работников и широкого круга специалистов в области антенной техники и строительства, а также для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов вузов, обучающихся по радиотехническим и строительным направлениям.

Главный редактор: д-р физ.-мат. наук – Звездина Марина Юрьевна.

ББК 32.84+38.3

ISBN 978-5-4379-0552-4

© АНС «СибАК», 2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ:

Предисловие	6
Глава 1. Анализ тенденций разработки ферромагнитных материалов с заданными свойствами на наноуровне	12
1.1. Материальная среда развития магнитной электроники	13
1.2. Магнитные свойства наноструктур и наноструктурных образований	26
Глава 2. Обзор методов оценки электродинамических характеристик неперIODических композитных сред	43
2.1. Обзор структур известных композитных сред.....	45
2.2. Обзор подходов к оценке электродинамических характеристик неперIODических (случайных) композитных сред	47
2.3. Характерные особенности подходов к оценке характеристик неперIODических сред. Оценка нелинейных свойств	49
Глава 3. Обзор методов оценки электродинамических характеристик перIODических композитных сред на основе ферромагнитных и киральных элементов	68
3.1. Особенности реализации известных композитных сред с перIODической структурой	68
3.2. Применение метода компенсационных источников и метода последовательных приближений для оценки электродинамических характеристик перIODических композитных сред на базе ферромагнитных элементов	70

3.3. Применение метода связанных волн и полной системы уравнений Максвелла для оценки электродинамических характеристик периодических композитных сред на базе ферромагнитных элементов	83
3.4 Общие свойства киральных сред.....	92
3.5 Применение прямых и непрямых методов для оценки электродинамических характеристик киральных сред	104
Глава 4. Дифракционный расчет эффективной диэлектрической проницаемости радиопоглощающих решеток на основе графитированных волокон	112
4.1. Исследуемая структура радиопоглощающих решеток	113
4.2. Дифракционный расчет эффективной диэлектрической проницаемости	115
4.3. Расчет эффективной диэлектрической проницаемости структуры со сплошными проводниками в квазистатическом приближении	122
4.4. Результаты численных расчетов	123
4.5 Структура из сплошных проводников	124
4.6 Дипольные структуры	128
Глава 5. Структурно-химическая модификация жаростойких композитов	134
5.1. Исследование процесса коррозии штучных шамотных огнеупоров с целью повышения их физико-механических показателей	135

5.2. Синтезирование фосфатных связующих с целью структурно-химической модификации жаростойких материалов	142
Глава 6. Исследование прочности бетонных образцов со средовыми повреждениями	153
6.1. Методика и проведение эксперимента для исследования прочности бетонных образцов со средовыми повреждениями.....	155
6.2. Обработка результатов испытаний	164
Сведения об авторах.....	176
Приложение.....	178

ПРЕДИСЛОВИЕ

Композитные материалы в настоящее время широко применяются в различных областях человеческой деятельности, начиная с традиционной строительной области и заканчивая электронной и радиоэлектронной. Такая популярность обусловлена тем, что композиты позволяют получить новые свойства материалов, отличающиеся от свойств входящих в их состав компонентов, что позволило композитные материалы в радиоэлектронике назвать метаматериалами. Возможность синтеза новых свойств композитов стимулирует проведение дальнейших научных исследований по их разработке и применению, в том числе и на наноуровне. Однако следует отметить, что основной сложностью, сдерживающей непосредственное применение композитов в электронике и радиоэлектронике, является необходимость проведения дополнительных теоретических исследований, направленных на выявление взаимосвязи между их конструктивными параметрами и электродинамическими характеристиками сред.

В традиционной области применения композитов – строительстве – также возникают новые вопросы, связанные с изменением условий их эксплуатации. Как известно, ухудшение экологической обстановки вследствие выбросов в атмосферу промышленных предприятий приводит к выпадению кислотных дождей. Образование свалок промышленного мусора также негативно сказывается на изменении свойств окружающей среды, в которой эксплуатируются строительные композитные материалы. Данные обстоятельства делают актуальным проведение исследований влияния агрессивных сред на строительные элементы из композитов, например, бетонные, а также утилизацию отходов промышленного производства путем создания из них новых композитных материалов.

В первой главе монографии выполнен анализ тенденций разработки композитных материалов на наноуровне на основе ферромагнитных материалов. Показано, что при реализации требуемых свойств ферромагнетиков с учетом их воспроизводимости необходимо учитывать большое число разноречивых требований. Одним из подходов, позволяющих учесть данные требования, является использование смесей порошковых оксидов различных металлов. Данные смеси применяются для получения поликристаллических материалов с необходимыми электрическими и магнитными свойствами, в которых в качестве основы для формирования наноструктурированных материалов используются матричные образования

пористого кремния Si и периодические структуры углеродных нанотрубок. Приводится анализ данных порошковых смесей и возможностей управления свойствами композитного материала с помощью электрических и магнитных полей, что делает возможным их применение для решения задач радиоэлектроники. Приводится анализ магнитных свойств наноструктур и наноструктурных образований. Показано, что основные отличия обусловлены вкладами размерных эффектов, влияний поверхностей, образующих наноструктуру кластеров, межкластерными взаимодействиями или взаимодействиями кластера с матрицей, а также вкладом межкластерной организации. Результаты проведенных исследований показали, что наноматериалы обладают спектром особых характеристик для развития функциональных моделей радиоэлектроники нового поколения, и магнитной электроники в частности. Повышенный интерес для развития магнитной электроники нового поколения представляют наноматериалы, обладающие несколькими параметрами порядка (не менее двух), обеспечивающие возможность создания пассивно-активных устройств. К таким материалам относятся мультиферроики и наноструктуры на основе углеродных нанотрубок с частицами ферромагнитного материала. Кроме того, отмечается и перспектива применения материалов на основе опаловых матриц. Благодаря высокой подвижности электронов в углеродных нанотрубках данных матриц и возможностям спиновой электроники могут быть созданы быстродействующие высокоэффективные функциональные устройства в СВЧ- и КВЧ-диапазонах частот.

Вторая глава монографии посвящена обзору известных методов оценки электродинамических характеристик неперiodических композитных сред. Приведенный обзор сложных наноструктур, позволил классифицировать композитные среды на периодические с регулярной структурой и неперiodические со случайно структурой. При этом учитывается как форма частиц в композите, так и их распределение в некотором пространстве. Представленный в разделе обзор широкого класса способов, методов и подходов позволил дать оценку параметров неперiodических (случайных) композитных сред. Показано, что в наиболее общем виде процессы распространения и рассеяния электромагнитной волны в ближней и дальней зоне плоской структуры могут быть описаны системой уравнений Максвелла с использованием граничных условий Неймана, Дирихле, Флоке, Грина и др., либо их модификации (например, в магнитостатическом приближении). В большинстве случаев, аналитические методы решений нелинейных дифференциальных

уравнений классической электродинамики для сложных наноструктур СВЧ-диапазона неприменимы. Исключением здесь является использование K_{ml} -функции второго порядка.

Показано, что при анализе структур рассматриваются либо нестационарные, либо стационарные процессы. Реализация численных методов осуществляется как в частотной, так и во временной области. Для нелинейных сред предпочтительным являются временные области. Для исследования нелинейной среды большое распространение получили подходы на основе использования искусственно сконструированных систем интегрально-дифференциальных уравнений, решение которых в большинстве случаев производится численными методами.

Третья глава монографии посвящена обзору методов оценки электродинамических характеристик периодических композитных сред на основе ферромагнитных и киральных элементов и их композиций. Выполненный анализ известных методов, способов, подходов оценки электродинамических характеристик композитных сред позволил установить, что для указанных структур главным инструментом решения электродинамических задач являются уравнения Максвелла, имеющие различную форму записи и применяющиеся как во временной, так и в частотной области. Показано, что решение электродинамических задач возможно как с использованием прямых, так и непрямых методов. Для непрямых методов существенным является снижение вычислительных затрат. Отмечается, что наиболее точными являются методы на основе интегральных представлений электромагнитного поля. В то же время подчеркивается, что метод компенсационных источников, использующий непрямые методы для уравнений Максвелла, обеспечивает реальную возможность для формирования функциональных устройств в структуре композитной среды. Оценку степени связи между элементами кристаллической структуры можно реализовать с помощью метода связанных волн и теоремы взаимности. Показано, что исследование нелинейных свойств кристаллических структур базируется на использовании методов последовательных приближений. Выбор технологии исследования кристаллической структуры во многом зависит от её функционального назначения и структуры используемых элементов.

В четвёртой главе монографии приводится пример использования композитных материалов на наноуровне. Материалы раздела включают дифракционный расчет эффективной диэлектрической проницаемости радиопоглощающих решеток на основе графитированных волокон. Композитный материал представляет собой

периодическую структуру, состоящую из плоских решеток тонких проводящих диполей с разной толщиной, длиной и проводимостью в каждой из решеток, находящейся в недиспергирующем диэлектрическом слое - матрице, расположенном на идеально отражающей поверхности. Для данной структуры решена задача дифракции нормально падающей электромагнитной волны. Решение задачи записано относительно токов в отдельных малых элементах диполя, рассматриваемых как источники возбуждения виртуального волновода – канала Флоке, с последующим вычислением комплексного коэффициента отражения. Предложено вычислять эффективную диэлектрическую проницаемость такого композиционного материала по значениям коэффициента отражения при расположении структуры на электрической и магнитной подложках. Численными расчетами для структуры одинаковых диполей – отрезков графитированных углеродных волокон - показана адекватность описания взаимодействия структуры с электромагнитным полем ее гомогенизацией путем введения эффективной диэлектрической проницаемости при достаточно малых по сравнению с длиной волны характерных размерах структуры. Показано, что дипольные структуры на основе графитированных углеродных волокон обладает перспективным характером дисперсии эффективной диэлектрической проницаемости в плане применения в поглотителях электромагнитных волн. Показано, что изменение расположения диполей без изменения их объемной концентрации приводит к большому изменению эффективной диэлектрической проницаемости. Рассмотрен частный случай, когда дипольная структура переходит в структуру из бесконечных волокон, на примере которой оценена погрешность вычисления эффективной диэлектрической проницаемости из рассмотрения лишь одной ячейки структуры по сравнению с ее вычислением на основе решения задачи дифракции. Предложенный подход к решению задачи дифракции на структуре из плоских дипольных решеток применим и к более сложным структурам диполей, расположенных в диэлектрическом слое.

Пятая и шестая главы монографии посвящены композитным материалам, используемым в строительстве и подвергающихся воздействию агрессивных сред.

В пятой главе монографии приводятся анализ воздействия высоких температур на структурно-химическую модификацию композитных материалов, применяемых в современных тепловых агрегатах. Показано, что наиболее химически активными связующими в составах жаростойких растворов и бетонов являются фосфатные

связки. Применение фосфатных связующих позволяет повысить температуру применения жаростойких растворов на 150-200⁰С по сравнению с растворами на гидравлических вяжущих, а также их адгезию к различным штучным огнеупорам. Повышение физико-механических характеристик фосфатных материалов (растворов, бетонов и др.) объясняется природой самой связки, так как ортофосфорная кислота со многими оксидами образует стабильные огнеупорные соединения.

Обоснован выбор фосфатных связующих в качестве вяжущего для разработки составов жаростойких растворов-обмазок шамотных футеровок. В целях применения вяжущих веществ фосфатного твердения для изготовления жаростойких бетонов и растворов предложена классификация некоторых гидроксидов металлов, наиболее часто встречающихся в отходах промышленных производств по их взаимодействию с ортофосфорной кислотой и проведены расчеты энергии структуры кристаллической решетки. Приводится описание синтезированных фосфатных связующих на основе карбонатного и алюминатного шламов. Показано, что их применение позволяет исключить в технологиях изготовления алюмокальций-фосфатную связку. Показано, что при изготовлении крупных блоков их жаростойких бетонов целесообразно использовать защитные обмазки, обладающие высокой механической прочностью, огнеупорностью, термической и химической стойкостью, износоустойчивостью к действию керамзита и его расплава, а также расплава глины. Огнеупорная защитная обмазка позволяет значительно сократить расходы дорогостоящих огнеупоров. Обмазки, изготовленные на основе жаростойких вяжущих не требуют предварительного обжига и обладают высокими физико-механическими свойствами.

В шестой главе монографии анализируется воздействие агрессивных сред на прочность бетонных образцов. Приводятся результаты натурных экспериментов по исследованию прочности бетонных образцов со средовыми повреждениями. В качестве агрессивной среды использовалось дизельное топливо, обладающее слабоагрессивными свойствами.

Показано, что прочность с обеспечением 95% эталонной группы бетонных призм, хранящихся на протяжении 30 суток в нормальных условиях, составила 33,48 МПа. Воздействие водой уменьшило прочность до 29,93 Мпа (89,40% от эталонной), а воздействие агрессивной средой - до 28,53 МПа (85,22% от эталонной). Выполненные структурные исследования образца, отобранного из группы воздействия агрессивной среды, показали наличие в нем

продуктов коррозии. Проведенный рентгенофазовый анализ образца подтвердил наличие данных продуктов.

На основании всех проведенных исследований было экспериментально доказано снижение несущей способности образцов, подверженных средовому воздействию.

Звездина Марина Юрьевна

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Безуглов Дмитрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заместитель директора Ростовского филиала (по научной работе) Ростовской таможенной академии (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Звездина Марина Юрьевна – доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Радиоэлектроника» Донского государственного технического университета (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Лагунов Игорь Михайлович – старший преподаватель, кафедра экспериментальной физики, ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Физико-технический институт (Россия, АР Крым, г. Симферополь).

Матвеев Максим Игоревич – аспирант, Юго-Западный государственный университет (Россия, г. Курск).

Пономаренко Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, кафедра экспериментальной физики, ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Физико-технический институт (Россия, АР Крым, г. Симферополь).

Синявский Геннадий Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная электродинамика и компьютерное моделирование» Южного федерального университета (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Соколова Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный университет путей сообщения (Россия, г. Самара).

Черкесова Лариса Владимировна – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Шаламов Георгий Николаевич – ведущий инженер, Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Шокова Юлия Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника» Донского государственного технического университета (Россия, г. Ростов-на-Дону).

Монография

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ

Под редакцией доктора физико-математических наук М.Ю. Звездиной

Подписано в печать 31.08.17. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,25. Тираж 550 экз.

Издательство АНС «СибАК»
630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 165, оф. 4.
E-mail: mail@sibac.info

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии «Allprint»
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3.