

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИКИ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ

© 2019 Г.В. Дмитриенко, Д.В. Мухин

Ульяновский государственный технический университет,  
обособленное структурное подразделение «Институт авиационных технологий и управления»,  
г. Ульяновск

Статья поступила в редакцию 22.08.2019

В статье рассмотрена идеология автоматизации диагностики углеродных композиционных материалов радиоволновыми методами, основанная на использовании математических моделей.  
*Ключевые слова:* диагностика, автоматизация, углеродные композиционные материалы, цифровая модель.  
DOI: 10.24411/1990-5378-2019-00054

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-48-732005\18*

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в авиастроении находят широкое применение композиционные материалы (КМ). В технике композиционными материалами называются армированные пластики, традиционная структура которых слоистая, получаемая путем армирования специальными тканями или нитями. В зависимости от технологии изготовления КМ получаются материалы с различными свойствами. Для радиоволновых методов они различаются по диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь, а также по механическим свойствам. В таблице 1 приводятся типовые параметры КМ.

Отметим, что первые шесть параметров относятся к свойствам волокон, другие - зависят от свойств волокон, от свойств матрицы, от схемы армирования, от остаточных напряжений и внешних условий, в которых будет эксплуатироваться композиционный материал. Чаще всего выбор композиционного материала определяется требованиями к нескольким свойствам и характеристикам.

Главными электродинамическими характеристиками всех диэлектрических материалов, по которым производится выбор материала для соответствующей задачи, являются относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ . Наряду с ними, используется понятие комплексной диэлектрической проницаемости  $\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''$ ,

где  $\varepsilon'$  - действительная часть  $\varepsilon' = \varepsilon$ ,  $\varepsilon''$  - мнимая часть  $\varepsilon'' = tg\delta\varepsilon$ ,  $j = \sqrt{-1}$ . С точки зрения радиоволновых методов, классификацию всех диэлектрических параметров КМ можно представить следующим образом (рис. 1).

По этой классификации все диэлектрики можно разделить на 4 группы. Соответственно каждую группу удобнее описывать своими математическими методами:

1. группа СВЧ-диэлектриков с малым  $\varepsilon$  и малым  $tg\delta$ ; применяются как радиопрозрачные вставки в радиотехнических системах;
2. группа СВЧ-диэлектриков с большим  $\varepsilon$  и малым  $tg\delta$ ; применяется для изготовления высокочастотных резонаторов;
- 3 и 4 группы с большим и малым  $\varepsilon$  и большим  $tg\delta$  применяются как защитные покрытия и материалы защиты радиотехнических систем и устройств.

Материалы, имеющие значительные потери, принято называть импедансными. Типичные значения:  $\varepsilon > 1000$  и  $tg\delta > 1$ .

По своим свойствам и выполняемым функциям диэлектрические материалы можно разделить на две группы: на материалы, взаимодействующие с электромагнитным полем и конструкционные материалы, не имеющие при эксплуатации устройства взаимодействия с электромагнитным полем. К материалам первой группы предъявляются жесткие требования к их механическим и радиотехническим свойствам во всем радиочастотном диапазоне их эксплуатации.

Производство углеродных материалов является весьма дорогим, поэтому при выборе материала следует учитывать не только его физические свойства, но и стоимость. Наибольший

*Дмитриенко Герман Вячеславович, доктор технических наук, профессор кафедры «Самолетостроение».  
E-mail: dmitrienko.german@yandex.ru  
Мухин Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».*

Таблица 1. Типовые параметры КМ

Свойства	Характеристики значения и применение
Низкая плотность	1,7 - 2,0 Г/см <sup>3</sup>
Высокий модуль упругости	200 - 400 ГПа
Высокая прочность при сжатии	2,3 - 3,5 ГПа
Очень низкий коэффициент теплового расширения	$2 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$
Высокая электропроводность	$10^3 - 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$
Высокая теплопроводность	6-140 Вт м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
Высокие усталостные характеристики	
Высокая коррозионная стойкость	Реагирует только с сильными окислителями при высоких температурах
Биосовместимость	
Низкий коэффициент трения, хорошая износостойкость	Особенно у композиционных материалов на основе высокомодульных волокон

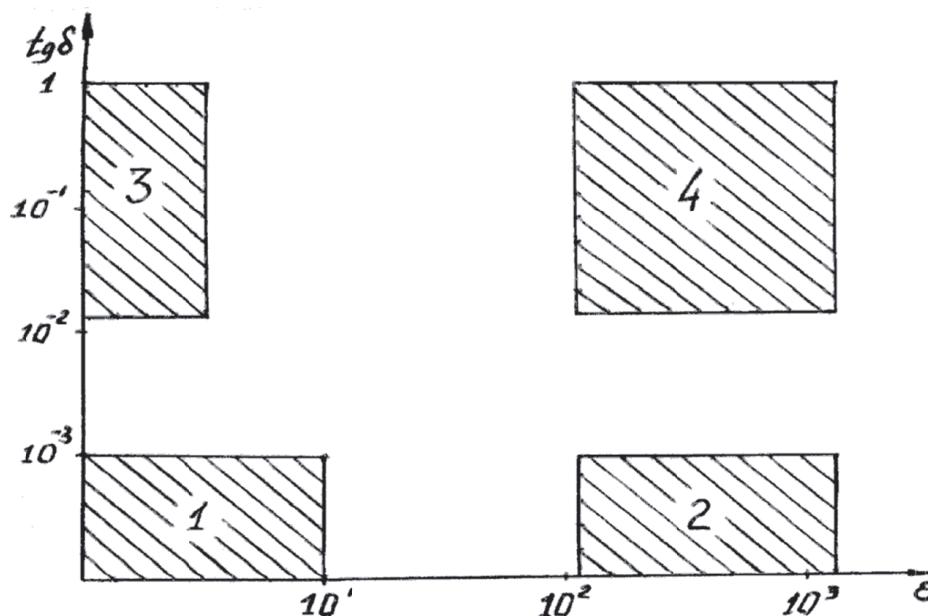


Рис.1. Классификация диэлектрических параметров КМ

интерес представляют КМ в тех областях применения, в которых используются электродинамические характеристики диэлектрических материалов. В силу перечисленных факторов главные области их применения – авиационная и ракетно-космическая промышленность, где главными критериями являются электродинамические и механические характеристики и свойства материала. Проведем их подробную классификацию.

Первым направлением применения КМ являются антенные обтекатели и укрытия [1, 2], назначение которых - защита антенных устройств РЛС от воздействия окружающей среды в условиях полета и защита от электромагнитных излучений.

Вторым направлением применения является космос. В космической промышленности композиционные материалы активно используются при изготовлении геостационарных спутников и антенных систем для различных видов связи, вещания [4, 5] и для дальней космической разведки.

Третьим направлением применения композиционных материалов стало использование их в качестве радиолокационной защиты в военной авиации и ВМФ.

Четвертое направление - перспективность применения радиопоглощающих материалов и покрытий для улучшения работы РЛС [6], в частности:

- для обеспечения требуемого закона распределения отраженного сигнала по апертуре зеркальных антенн посредством установки радиопоглощающих элементов, определенным образом распределенных по апертуре;

- для устранения влияния интерференции переотраженных от соседних объектов электромагнитных волн (для устранения ложного эха).

Пятое направление - углеродосодержащие композиционные материалы [6] применяются в специальных конструкциях защиты антенн, благодаря своим механическим и температурным характеристикам.

Еще одним применением является использование углеродосодержащих материалов для экранирования от электромагнитных помех в специальных условиях, т.к. по своим свойствам они близки к металлам по проводимости, но имеют целый ряд преимуществ: устойчивость к химическим реагентам, большая износостойкость, высокие электротехнические характеристики и независимость проводимости от температуры.

Что касается композиционных материалов с углеродной матрицей (углерод-углеродные композиты), то они широко используются при изготовлении носовых обтекателей и ракетных двигателей. Среди других областей применения углерод-углеродных композитов - высокотемпературные трубопроводы, компоненты для ядерных реакторов, электрические контакты, горячие уплотнители. В настоящее время с развитием новых технологий, изготовление композиционных конструкций стало дешевле, в связи с чем они получили возможность широкого применения и в гражданской авиации, причем количество деталей, изготовленных из углеродных композитов, продолжает расти с каждым годом.

## ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Из проведенного ранее анализа видно, что существует большое количество типов КМ, для диагностики у многих углеродных КМ нет эталонного образца, с которым производится сравнение в процессе диагностики. Для этих целей создается идеализированный образец, который выступает в качестве эталона. Процесс создания физического эталонного образца имеет высокую стоимость и долгие сроки реализации. Для удешевления процесса предлагается использовать цифровой двойник (цифровую модель) образца КМ, который используется в процессе диагностики и в процессах оценки соответствия образца КМ заявленным производителем параметрам.

На производстве используется до 15-20 типов КМ. Процесс их диагностики нуждается в

автоматизации со сведением затрат на процесс к минимуму.

## ПУТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для автоматизации процесса диагностики образцов углеродных КМ необходимо использовать и применять цифровую модель или цифровой двойник образца.

Цифровая модель образцов КМ – цифровое представление о всех свойствах материала. Модель предназначена для хранения и математического моделирования. Цифровую модель можно создавать в метрологической лаборатории на предприятии, можно передавать от производителя, можно получать от третьих заинтересованных сторон, обладающих такими правами распространения. Цифровая модель будет представлять собой структурированную базу данных, содержащую информацию о образце КМ.

Методы хранения. Цифровая модель хранится в виде структурированных файлов и занимает относительно мало места на машинных носителях. Кроме того, условия ее хранения более мягкие по сравнению с хранением эталонного образца КМ.

В результате имеем цифровые модели на каждый используемый КМ в авиастроении на предприятии, которые могут корректироваться, дополняться, использоваться в более сложных математических моделях авиационного изделия. Кроме того, весь процесс диагностики можно легко автоматизировать и конечные результаты хранить в электронном виде.

Схематично это выглядит так (рис. 2).

В преобразовательном датчике или устройстве происходит преобразование образца КМ  $X$  в электрический сигнал  $Q = F(X)$ , в котором отражены все свойства образца КМ. В блоке сравнения с мерой производится вычисление отклонения от образцовой меры  $\Delta = F(X) - N|Q$ , где  $N|Q$  - значения эталонного образца. В блоке «Результаты измерения» производятся вычисления значения  $X$  образца КМ  $X = F^{-1}\{q|Q\}$ .

Для проведения полноценного процесса диагностики необходима цифровая модель диагностируемого материала, точнее сказать, его цифровой двойник, описывающий все параметры КМ. Получение такой модели дает возможность проводить математическое моделирование материала, его характеристик в различных эксплуатационных условиях, тем самым снижая затраты на натурные испытания, которые подтверждают результаты математического моделирования.

Точность математического моделирования будет определяться тем, насколько точно и полно представлена цифровая модель образца КМ.

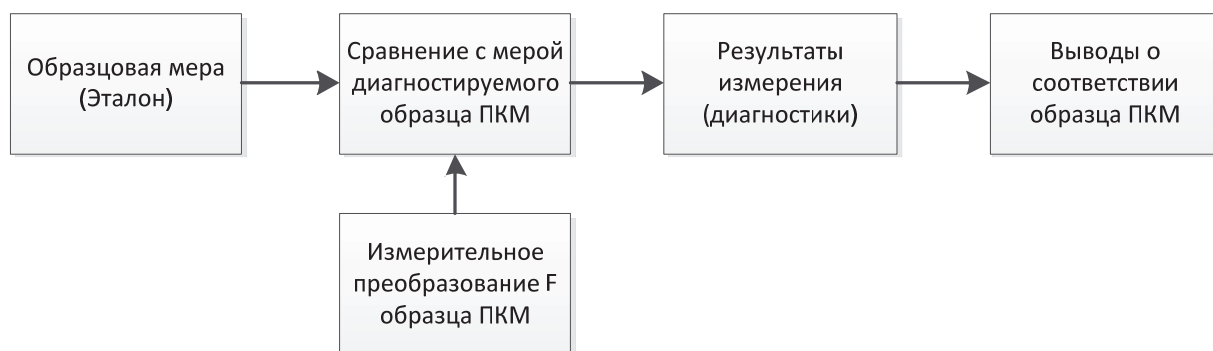


Рис.2. Метрологическая схема измерения

Цифровая модель или двойник образца КМ должна включать в себя:

- свойства объекта (электродинамические или электрические параметры), информацию о его поведении в условиях эксплуатации;
- библиотеку всех его характеристик, которые могут использоваться в эксплуатационных условиях;
- возможность дополнять или корректировать цифровую модель образца материала;
- пригодность для цифрового или компьютерного моделирования различных реальных и нереальных экспериментов.

Цифровая модель представляет собой базу данных (БД), которая используется не как архив данных, а как площадка-элемент для компьютерного моделирования, с целью получения новых знаний о материале. Кроме того, цифровая модель должна иметь возможность интегрирования в другие более сложные цифровые модели установок и систем.

### ВЫВОДЫ

Цифровая модель КМ позволяет многосторонне ее использовать как в качестве эталона при измерении на соответствие заявленным требованиям, так и в процессе математического моделирования. Кроме того, она позволяет в процессе диагностики устранить или скорректировать следующие неопределенности, возникающие в процессе измерения-диагностики:

Неполное определение измеряемой величины. Эталон передает один из параметров КМ, цифровая модель существенно расширяет набор контролируемых параметров.

Нерепрезентативность выборки (измерения проводятся на образце КМ, не представляющем измеряемую величину). Цифровая модель в любой момент может дополняться и улучшаться.

Неточное значение, описанное эталоном или образцовой мерой.

Аппроксимации и предположения, используемые в методе и методике измерений (измерительной процедуре).

Изменчивость в повторных наблюдениях при неизменных условиях измерений. Цифровая модель может включать особенности и аномалии, возникающие в процессе диагностики.

Упрощается сам процесс диагностики КМ в заводских условиях, используя минимальную измерительную информацию, получаемую в процессе входного контроля.

Также, используя процесс автоматизации измерений, цифровая модель может уточняться, корректироваться и дополняться. Кроме того, можно использовать машинное обучение в процессе диагностики как новых, так и существующих материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Обтекатели летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 120 с.
2. Макалистер Л., Лакман У. Многонаправленные углерод-углеродные композиты // В кн. Прикладная механика композитов. М.: Мир. 1989. С. 226-294.
3. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
4. Анпилогов В.Р., Колчеев Г.Н. Антенные системы геостационарных спутников связи и вещания // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. № 3, С.3-17
5. Surrey Satellite to Buld US Air/Force Spacecraft // Flight.Int. 1997.141. № 475. С 21.
6. Михайлов Г.Д., Сергеев В.И., Соломин Э.А., Воронов В.А. Методы и средства уменьшения радиолокационной заметности антенных систем. // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 4-5. С. 41-53.
7. ГОСТ Р 54500.1-2011 Неопределенность измерения. Часть 1. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.
8. Цветков В.Я. Цифровые карты и цифровые модели // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 4-2. С. 348-351.

**AUTOMATION OF THE PROCESS OF DIAGNOSTICS  
OF CARBON COMPOSITE MATERIALS USING A DIGITAL MODEL**

© 2019 G.V. Dmitrienko, D.V. Mukhin

Ulyanovsk State Technical University,  
Separate Structural Unit “Institute of Aviation Technologies and Management”,  
Ulyanovsk

The article considers the ideology of automation of diagnostics of carbon composite materials by radio wave methods, based on the use of mathematical models.

*Keywords:* diagnostics, automation, carbon composite materials, digital model.

DOI: 10.24411/1990-5378-2019-00054

---

*German Dmitrienko, Doctor of Engineering Sciences,  
Associate Professor, Professor at the Department of Aircraft  
Engineering E-mail: dmitrienko.german@yandex.ru  
Dmitry Mukhin, Candidate of Engineering Sciences, Associate  
Professor at the Department of Aircraft Engineering.*