

A.V. Markov, O.A. Oreshina, I.V. Likhachev

PROBLEMS AND APPROACHES TO MODELLING CHARACTERISTICS OF RADIO-ABSORBING DISPERSED- FILLED POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Andrey Markov – Head of the Department of Engineering and Quality Management, D. Ustinov Baltic State Technical University (VOENMEH), Doctor of Engineering, professor, St. Petersburg; **e-mail:** markov_av@voenmeh.ru.

Olga Oreshina – assistant, the Department of Higher Mathematics, D. Ustinov Baltic State Technical University (VOENMEH), St. Petersburg; **e-mail:** oreshina_oa@voenmeh.ru.

Ivan Likhachev – post-graduate student, the Department of Engineering and Quality Management, D. Ustinov Baltic State Technical University (VOENMEH), St.-Petersburg; **e-mail:** smile4vanya@mail.ru.

We show the need to develop mathematical models reflecting the connection between the properties and composition of radio-absorbing dispersed-filled polymer composite materials in order to reduce the time of creating new materials at small businesses.

We look at analytical, simulation, analytical-simulation approaches to modelling the mechanical properties of radio-absorbing dispersed-filled polymer composite materials and study their distinctive features.

The analysis and comparison of the approaches in question are carried out. We come to the conclusion that more complex problems can be solved using simulation modelling, and in some cases researchers of radio-absorbing dispersed-filled polymer composite materials can be satisfied with the results obtained using analytical mathematical models.

Keywords: radio-absorbing polymer composite materials; dispersed-filled composites; mechanical properties; mathematical model; simulation modeling.

A.B. Марков, О.А. Орешина, И.В. Лихачев

ПРОБЛЕМЫ И ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Андрей Валентинович Марков – зав. кафедрой инжиниринга и менеджмента качества, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»), доктор технических наук, профессор, г. Санкт-Петербург; **e-mail:** markov_av@voenmeh.ru.

Ольга Анатольевна Орешина – ассистент кафедры высшей математики, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»), г. Санкт-Петербург; **e-mail:** oreshina_oa@voenmeh.ru.

Иван Владимирович Лихачев – аспирант кафедры инжиниринга и менеджмента качества, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ»), г. Санкт-Петербург; **e-mail:** smile4vanya@mail.ru.

В статье показана необходимость разработки математических моделей, отражающих взаимосвязь свойств и состава радиопоглощающих дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с целью сокращения времени на создание новых материалов в рамках малого предприятия. Рассмотрены подходы к моделированию механических свойств радиопоглощающих дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов, а именно: аналитический, имитационный, аналитико-имитационный, отмечены их отличительные особенности. Проведены анализ и сопоставление

этих подходов. Установлено, что более сложные задачи могут быть решены с применением имитационного моделирования, а в отдельных случаях исследователя радиопоглощающих дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов могут удовлетворить результаты, которые можно получить при использовании аналитических математических моделей.

Ключевые слова: радиопоглощающие полимерные композитные материалы; дисперсно-наполненные композиты; механические свойства; математическая модель; имитационное моделирование.

Введение

В настоящее время практически не осталось областей человеческой деятельности, в которой в той или иной степени не использовалось бы математическое моделирование. Особенно это относится к созданию новых функциональных материалов. Это связано с тем, что вновь синтезируемые функциональные материалы предназначены для выполнения вполне конкретных функций, определяемых объектом, где будут применяться материалы, и условиями его эксплуатации. Таким образом, в промышленности сформировался широкий спектр требований к свойствам функциональных материалов, которые трудно поддаются стандартизации. Поэтому разработчики вынуждены под каждый объект создавать материал с уникальными характеристиками [2; 3]. Это достаточно дорогостоящий процесс, т.к. требует привлечения специалистов высокой квалификации и проведения большого количества экспериментальных исследований. Это обуславливает применение методов математического моделирования при создании новых функциональных материалов, где одним из основных процессов является процесс принятия решений по составу будущего материала на основе получаемой информации.

Постановка задачи

Авиакосмическая промышленность является одним из основных заказчиков радиопоглощающих дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (далее – РП ДНПКМ). Конструктивные элементы, выполненные из РП ДНПКМ, защищают радиоэлектронное оборудование от внешнего электромагнитного излучения. Необходимо отметить, что для различных авиакосмических объектов требуются материалы с различным коэффициентом отражения электро-

магнитных волн и механическими характеристиками.

Разработкой РП ДНПКМ занимаются коллективы ученых и исследователей, работающих как в крупных НИИ, так на предприятиях малого бизнеса. Процесс создания нового РП ДНПКМ может быть описан следующим образом: выбор полимера, наполнителя и типа отверждающей смеси, подготовка полимерсодержащей основы, добавление модификатора и перемешивание с полимером, введение в контакт наполнителя, обработка наполнителя, добавление отвердителя к композиционной смеси и его смешивание. В результате получается новый РП ДНПКМ. Далее проводятся экспериментальные исследования с целью определения его физико-механических характеристик, по результатам которых вносятся коррективы в рецептуру РП ДНПКМ. Как правило, требуется несколько таких итераций, чтобы добиться требуемых свойств РП ДНПКМ, что значительно увеличивает время на создание нового материала. Необходимо отметить, что количество итераций зависит от опыта и квалификации разработчика РП ДНПКМ.

Для сокращения цикла на создание нового РП ДНПКМ разработчику необходимо иметь в своем распоряжении инструмент поддержки принятия решения о составе будущего материала, который базировался бы на математических моделях, описывающих свойства РП ДНПКМ в зависимости от его состава [5; 7].

Процесс создания нового РП ДНПКМ является дорогостоящим, на осуществление которого в условиях малого предприятия отводится срок длительностью от одного до полутора месяцев. Данное время затрачивается на изготовление образцов, их выдерживание и проведение испытаний с целью определения значений

механических характеристик. Применение разработанных и доведенных до расчетного уровня математических моделей для РП ДНПКМ с определенным составом и видом полимерного связующего и наполнителя могут сократить время на создание новых материалов до двух-трех недель [6].

Аналитическое моделирование механических характеристик РП ДНПКМ

При аналитическом моделировании механических характеристик РП ДНПКМ процессы физико-химического взаимодействия наполнителя, полимерного связующего и отвердителя необходимо записать в виде некоторых функциональных соотношений.

Аналитический подход в моделировании свойств РП ДНПКМ основан на изучении физического и химического взаимодействия компонентов, входящих в состав композиционного материала. Расчеты производятся, основываясь на законах молекулярной физики и химии, используя при этом различные структуры молекул и молекулярных добавок, входящих в состав композитов.

Расчеты количества добавляемых компонентов осуществляются с помощью формул, которые определяют количество вещества и массы матрицы и наполнителя. Это позволяет проанализировать воздействие добавляемых компонентов на финальную структуру РП ДНПКМ. Для полного анализа структуры композита необходимы более детальное математическое описание и полноценные расчеты. В данной статье приведены лишь базовые принципы, которые могут служить основой для разработки аналитических математических моделей новых функциональных материалов.

Реализация аналитических математических моделей свойств РП ДНПКМ возможна с применением современных программных и аппаратных средств [1; 8].

Имитационное моделирование механических характеристик РП ДНПКМ

При имитационном моделировании реализуется алгоритм, который воспроизводит процесс, связывающий состав РП ДНПКМ и его механические характери-

стики, что позволяет по исходным данным получить сведения о механических характеристиках РП ДНПКМ в зависимости от состава материала.

Основным преимуществом имитационного моделирования является возможность разработки математической модели РП ДНПКМ с большим количеством компонент. Аналитическое же описание взаимодействия компонент с применением законов молекулярной физики и химии потребовало бы привлечения значительных человеческих и материальных затрат. Имитационные модели же позволяют достаточно просто учитывать многочисленные факторы физико-химического взаимодействия компонентов РП ДНПКМ. Поэтому имитационный подход к моделированию является наиболее эффективным методом исследования свойств РП ДНПКМ, особенно на этапе их создания.

Точность имитационных моделей во многом зависит от корректности решения задач графического представления экспериментальных данных, включающего выбор подходящего метода интерполяции или аппроксимации. При этом будем предполагать, что экспериментальные значения механических характеристик РП ДНПКМ, которые описываются кривыми, являются однозначными функциями: одной абсциссе соответствует одна и только одна ордината.

Имитационное моделирование РП ДНПКМ может быть рассмотрено как анализ экспериментов для смесей с ограничениями (множественная регрессия) [4; 9]. В качестве основного ограничения принимается постоянное значение суммы всех компонент ($x_i, i=1 \dots n$, где n – число компонент РП ДНПКМ), равное единице. Полученная зависимость механической характеристики ($y_j, j=1 \dots m$, где m – количество механических характеристик) от процентного содержания компоненты (например, наполнителя) может быть как линейной, так и нелинейной, содержащей несколько экстремумов. Таким образом, к значениям зависимой переменной необходимо подобрать поверхность отклика возрастающей сложности, начиная с линейной функции (с коэффициентами рег-

рессии b_1 , b_2 и b_3), затем продолжая квадратичной (с коэффициентами регрессии b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} и b_{23}) и заканчивая кубической (с коэффициентами регрессии b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123}).

Указанные модели приведены в таблице.

Таким образом, метод имитационного моделирования позволяет решить задачу анализа РП ДНПКМ, включая задачи оценки: вариантов состава нового материала, эффективности различных легирующих добавок, влияния изменения различных компонентов на механические характеристики РП ДНПКМ. Имитационное моделирование механических характеристик РП ДНПКМ может быть положено в основу системы поддержки принятия решений, когда требуется создать новый РП ДНПКМ с заданными механическими характеристиками при определенных ограничениях. Данные модели также могут применяться для оптимизации механических характеристик по некоторым критериям оценки эффективности.

Выводы

Рассматривая различные подходы в моделировании характеристик РП ДНПКМ (на примере механических характеристик) можно заключить, что в данном случае особое место занимает имитационное моделирование, в котором отсутствует непосредственное подобие физическо-химических процессов, происходящих в моделях, реальным процессам. В данном подходе необходимо отобразить лишь некоторую функцию и рассмотреть реальный РП ДНПКМ как «черный ящик», имеющий ряд входов (состав РП

ДНПКМ) и выходов (свойства РП ДНПКМ), и моделировать некоторые связи между выходами и входами. Таким образом, при использовании данного подхода можно провести анализ свойств РП ДНПКМ при различных его составах. При разработке имитационной модели свойств РП ДНПКМ необходимо выделить исследуемую характеристику РП ДНПКМ и формализовать ее в виде некоторых операторов связи между входом и выходом и воспроизвести на имитационной модели данную характеристику.

Аналитический подход использует фундаментальные законы физического и химического взаимодействия компонентов РП ДНПКМ, входящих в состав композиционных материалов. Это позволяет более объективно изучить влияние одного компонента на другой и смоделировать более точно свойства нового композитного материала, сведя к минимуму отклонения расчетных (теоретических) свойств материала от реальных характеристик.

Аналитико-имитационный подход позволяет использовать достоинства как аналитических, так и имитационных моделей. Это важно при синтезе многокомпонентных РП ДНПКМ, когда аналитически сложно описать физико-химическое взаимодействие компонентов создаваемого материала, но в то же время незначительное изменение содержания одного из компонент существенно влияет на физико-механические характеристики. Это может привести к тому, что экспериментальных данных будет недостаточно для разработки адекватной имитационной модели.

Вид математических моделей для трех переменных

Название модели	Вид модели
Линейная модель	$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3$
Квадратичная модель	$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$
Специальная кубическая модель	$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$

ЛИТЕРАТУРА

1. Варжапетян А.Г., Глуценко В.В. Системы управления: Исследование и компьютерное проектирование. М.: Вузовская книга, 2012. 328 с.
2. Каблов Е.Н. [и др.]. Исследование

структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 2–9.

3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климат

тическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 1. С. 15–21.

4. Макарова И.В. [и др.]. Методы планирования эксперимента с использованием пакета Minitab. Набережные Челны, 2016. 146 с.

5. Марков А.В., Ефремов Н.Ю., Орешина О.А. Моделирование свойств полимерных композиционных материалов, используемых в конструкциях летательных аппаратов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2020. № 6. С. 12–16.

6. Марков А.В., Орешина О.А. Автоматизация процесса принятия решения о составе полимерных композиционных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 440–443.

7. Марков А.В., Орешина О.А. Концепция математического моделирования свойств физико-механических характеристик композиционных материалов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2020. № 12. С. 3–6.

8. Марков А.В., Шматко А.Д. Коммуникационное интегрирование систем. СПб.: БГТУ «Военмех», 2005. 160 с.

9. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 1988. 135 с.