

Система управления качеством при математическом моделировании и многокритериальном синтезе наномодифицированных композитов специального назначения*

А. Н. Бормотов, И. А. Прошин, М. В. Кузнецова

Аннотация. Композиционные материалы специального назначения представляются как объекты моделирования и управления. Предлагается новый подход к многокритериальному синтезу композиционных материалов как к задаче управления. На основе такого подхода предлагается методология и алгоритмы моделирования и многокритериального синтеза свойств и структуры наномодифицированных композиционных материалов, обладающих повышенными защитными свойствами от воздействия ионизирующих излучений.

Ключевые слова: математическое моделирование, управление качеством, многокритериальный синтез, композиционные материалы, структурообразование, оптимизация структуры и свойств.

Введение

Совершенствование традиционных и внедрение новых технологий, базирующихся на использовании более интенсивных физических воздействий и применении химически активных сред, требует привлечения новых эффективных и долговечных композиционных материалов (КМ), обеспечивающих экологическую безопасность и экономическую эффективность различных производств. В связи с этим приобрело чрезвычайную актуальность решение задач по обеспечению экологической безопасности сооружений подземного захоронения и консервации радиоактивных отходов; локализации радиоактивного загрязнения при радиационных авариях; связыванию потенциально опасных отходов и футеровке ограждающих конструкций. Решение этих задач требует создания эффективных композиционных материалов специального назначения с заданными свойствами.

Подобная задача не может быть решена без учета множества критериев окружающей среды, эксплуатационных характеристик материалов, показателей структуры и свойств, учета рецептуры и технологии, т. е. композиционный материал необходимо рассматривать **системно**, как **сложную техническую систему**, испытывающую на себе комплекс воздействий и имеющую целый ряд управляемых параметров. Такой подход требует обобщения научных основ математического моделирования и многокритериального синтеза радиационно-защитных композиционных материалов (РЗКМ), а также разработки математического аппарата анализа и синтеза РЗКМ, программных комплексов и создания на их основе новых композиционных материалов со строго заданными структурой и свойствами.

Анализ современного состояния теории и практики построения математических моделей и их использования при управлении, прогнозе и изучении различных явлений природы и техники позволяет выбрать для моделирования композиционных материалов в качестве одних из основных — методы построения нелинейных моделей и расширение области использования нелинейных зависимостей, позволяющих расширить возможности, как по созданию и управлению различными структурами РЗКМ, так

* Работа выполнена при поддержке гранта «Математическое моделирование и многокритериальный синтез наномодифицированных композиционных материалов». — ГК № 14.740.11.1066 от 24.05.2011 г. / ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.; рук. Бормотов А. Н. — № ГР 01202173144.

и провести более точные и детальные исследования различных КМ специального назначения.

Подход к синтезу материалов с точки зрения классической теории оптимального управления.

В теории оптимального управления существует следующая принятая последовательность этапов для решения технической задачи:

1. Техническая постановка задачи и выбор технического критерия оптимизации.
2. На основе технической постановки задачи строится математическая модель объекта управления в форме системы операторных уравнений (дифференциальных, интегральных, разностных, дифференциально-разностных, дифференциально-интегральных и т. д.). Далее делается оценка области применения математических моделей. Здесь же выбираются компоненты вектора управления, параметры системы и возмущения, устанавливаются фазовые координаты. При разработке оптимальных систем указываются ограничения на компоненты вектора управления и фазовые координаты. Так, ограничения на фазовые координаты могут дать принадлежность вектора состояния некоторому замкнутому множеству точек n -мерного пространства. Они могут определять прочность, жесткость объекта и т. д. Здесь же указываются ограничения на вектор управления (например, энергопотребление).

На этом же этапе определяются начальные или краевые условия, осуществляется выбор критерия для оценки качества управления.

3. В предположении полной формализации задачи выбирается метод оптимизации. Как правило, предполагается задание математической модели объекта применительно к выбранному методу на его языке. Однако не исключается, когда модель подгоняется под выбранный метод оптимизации. Например, по системе дифференциальных уравнений линейного объекта может быть построен соответствующий функционал качества на основе корней характеристического полинома.
4. Выбор численных методов, реализующих метод оптимизации: методов решения систем дифференциальных уравнений, определения значений функционала качества и т. д.
5. Разработка и отладка программ для решения задачи оптимизации на ЭВМ, не исключая корректировку численных методов для повышения точности и вычислительной эффективности алгоритма.
6. Анализ полученных результатов оптимизации с возможной корректировкой и упрощением, как всей математической задачи, так и отдельных ее элементов. Результаты решения математической задачи являются исходной информацией для

уточнения формулировки технической задачи, и итерационный процесс может повторяться до достижения заданной точности.

Практически без оговорок указанная последовательность может использоваться при синтезе КМ из условий получения требуемых кинетических процессов формирования физико-химических характеристик материалов (плотность, прочность, твердость, параметры тепловыделения, химическая и радиационная стойкость и т. д.).

Основные понятия и определения композиционного материаловедения легко интерпретируются в соответствующих терминах, принятых в теории систем управления.

Объектом исследования (ОИ) является композиционный материал для защиты от радиации, представляющий собой сложную техническую систему взаимосвязанных элементов, в которой протекают процессы структурообразования и деструкции, подлежащие изучению при помощи моделирования (рис. 1).

Моделирование КМ направлено на выявление его внутренних свойств, структуры и взаимосвязей элементов, составляющих ОИ, которые проявляются во взаимодействии композита с окружающей средой и субъектом [1].

В самом общем случае КМ со стороны окружающей среды находится под воздействием целого ряда факторов

$$\bar{Z}(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)]^T,$$

часть из которых

$$\bar{Z}_1(t) = [z_{1_1}(t), z_{1_2}(t), \dots, z_{1_{l_1}}(t)]^T$$

(контролируемые воздействия) может быть измерена, а часть

$$\bar{Z}_2(t) = [z_{2_1}(t), z_{2_2}(t), \dots, z_{2_{l_2}}(t)]^T$$

(неконтролируемые воздействия) — не поддаются измерению или их влияние не существенно. Исследователя (субъекта) интересует взаимосвязь выходных координат объекта (КМ)

$$\bar{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)]^T,$$

характеризующих свойства объекта исследования (ОИ) — РЗКМ, управляющих воздействий

$$\bar{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t)]^T,$$

поступающих со стороны субъекта и возмущений $\bar{Z}(t)$.

Существует множество понятий «**модель объекта**». Примем подход, основанный на представлении

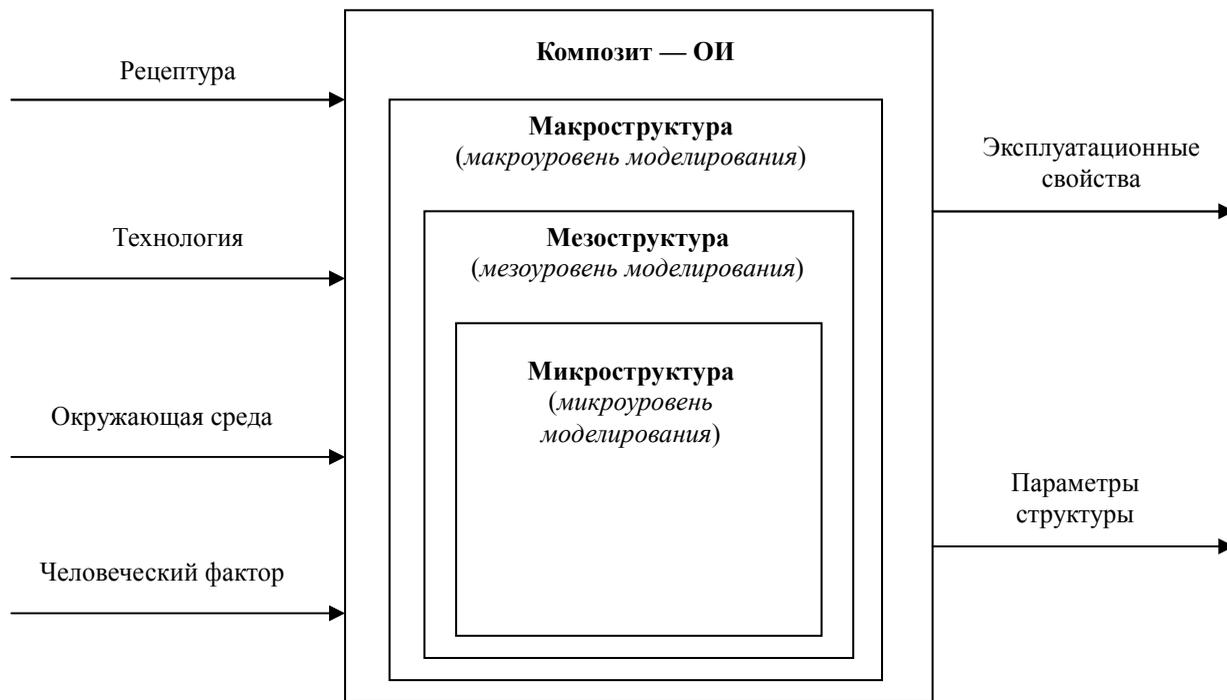


Рис.1. Схема композита как объекта исследования

объекта в виде кибернетической системы, определяемой множеством входных воздействий:

$$\bar{Y}(t) = \{\bar{U}(t), \bar{Z}(t)\} = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t)]^T,$$

среди которых есть контролируемые \bar{Y}^* и неконтролируемые \bar{E} , и множеством характеристик и ограничений \bar{Q} , действующих в системе и накладываемых на \bar{Y}^* и \bar{E} — $A = \{\bar{Y}^*, \bar{E}, \bar{Q}\}$.

Математическая модель кибернетической системы устанавливает отображение F заданных множеств на множество выходных координат объекта

$$\bar{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)]^T : F := \{\bar{Y}^*, \bar{E}, \bar{Q}\} \rightarrow \bar{X},$$

то есть

$$\bar{X} = F\{\bar{Y}^*, \bar{E}, \bar{Q}\}.$$

Основополагающим в моделировании КМ является принцип изоморфизма. Строгий изоморфизм между двумя системами означает наличие взаимно однозначного соответствия не только между входными воздействиями и характеристическими множествами \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 , но и между выходными координатами систем.

Данное утверждение находит подтверждение в работах И. А. Рыбьева [2] о теории искусственных конгломератов в части формулировки законов створа и конгруэнции, а также в работах В. И. Соломатова [3] о полиструктурной теории в части фор-

мулировки принципа полиструктурности композиционных материалов и закона подобия кластерных систем и некоторых других исследователей.

В практических исследованиях КМ предпринимаются попытки построить модель, изоморфную реальной задаче только в отношении ограниченного числа специфических свойств, то есть обладающую ограниченным изоморфизмом.

Создание математических моделей КМ проводят для следующих задач (рис. 2): управления объектом; прогноза выхода объекта; выявления механизма явлений, протекающих в композите.

1. Управление объектом — композиционным материалом

При построении моделей КМ как сложных технических систем и других элементов систем управления предлагается использовать модели «вход — выход» и модели в пространстве состояний. Предлагаемая структура объекта управления (рис. 3) отражает оба эти подхода [4].

Изучение сложной технической системы КМ как объекта управления (ОУ) предполагает определение структуры технического объекта управления, т. е. выявление всех существующих входных (возмущающих, управляющих) воздействий, переменных состояния и выходных координат, а также связи между ними.

Управление объектом	Получение строго заданных структур КМ: наноструктур, бесконечных кластеров, фракталов, сетчатых или линейных полимеров, объемных или каркасных решеток, определенного вида связей или сочетаний химических элементов и пр.
Прогноз выхода объекта	Получение заданных количественных и качественных эксплуатационных характеристик КМ специального назначения: радиационно-защитных, кислотостойких, жароупорных, биостойких и пр.
Выявление механизма явлений	Выявление механизма структурообразования КМ: полимеризация, поликонденсация, топомеханический, сквозь-растворный, смешанный и пр.

Рис.2. Систематизация задач, приводящих к построению математических моделей КМ

Модель системы КМ как объекта управления представляется в виде множества величин, описывающих функционирование реальной системы и объединяющих следующие подмножества (рис. 3).

1. **Управляемые координаты** (управляемые переменные) — совокупность характеризующих поведение объекта управления выходных величин $\bar{X}(t)$, текущими значениями которых требуется управлять для достижения поставленных целей. В модели управляемые координаты задают вектором управляемых переменных

$$\bar{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)]^T.$$

В физическом смысле — это комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств КМ: прочность, плотность, морозостойкость, теплопроводность, водо- и атмосферостойкость, радиационная стойкость и т. д.

2. **Координаты состояния объекта** — внутренние переменные, характеризующие текущее поведение и состояние объекта в отдельные моменты времени. В модели координаты состояния задают вектором состояний

$$\bar{V}(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]^T,$$

т. е. совокупностью значений вектора состояний

$$\bar{V}(t_1), \bar{V}(t_2), \dots, \bar{V}(t_l)$$

в отдельные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_l . Управляемые координаты $\bar{X}(t)$ объекта формируются на ос-

нове координат его состояния $\bar{V}(t)$. Размерность вектора управляемых координат k меньше или равна размерности вектора состояний n . В частном случае управляемые переменные объекта могут совпадать с координатами состояния. В физическом смысле — это параметры структуры КМ специального назначения: вид кристаллической решетки, характер молекулярных связей и их энергетический потенциал, толщина матрицы вяжущего, вид упаковки частиц и их координационное число, гранулометрический состав и диаметры частиц, удельная поверхность наполнителя и наполнителя и пр.

3. **Управляющие воздействия** — совокупность входных величин $\bar{U}(t) \in \bar{Y}(t)$, изменением которых обеспечивают воздействия на объект с целью управления. В модели управляющие воздействия задают вектором

$$\bar{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t)]^T.$$

В физическом смысле — это рецептурно-технологические условия: состав и соотношение компонентов КМ, последовательность совмещения компонентов КМ, определенные режимы обработки исходных компонентов или готовых смесей, режимы перемишивания или др. технологические операции.

4. **Возмущающие воздействия** — совокупность неуправляемых входных величин $\bar{Z}(t) \in \bar{Y}(t)$, изменения которых оказывают нежелательное влияние на состояние объекта $\bar{V}(t)$ и его управляемые координаты $\bar{X}(t)$. В модели возмущающие воздействия задают вектором

$$\bar{Z}(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)]^T.$$

Вектор возмущающих воздействий, в свою очередь, можно разбить на две составляющие — *первую* можно измерить, а *вторую* — нельзя. Возможность измерения возмущающего воздействия позволяет ввести в систему регулирования дополнительный сигнал, что расширяет возможности систем регулирования. В физическом смысле — это действие окружающей среды и нормальные ошибки технологий: непостоянство температуры окружающей среды и исходных компонентов, нормальные ошибки дозирования и технологических переделов, неравномерность распределения физических и химических свойств исходных материалов, примеси, человеческий фактор и т. д.

5. **Внутренние (собственные) динамические параметры объекта** — совокупность величин $\bar{\Theta}(t)$, характеризующих внутренние свойства и количественную причинно-следственную взаимосвязь входных и выходных переменных в математических

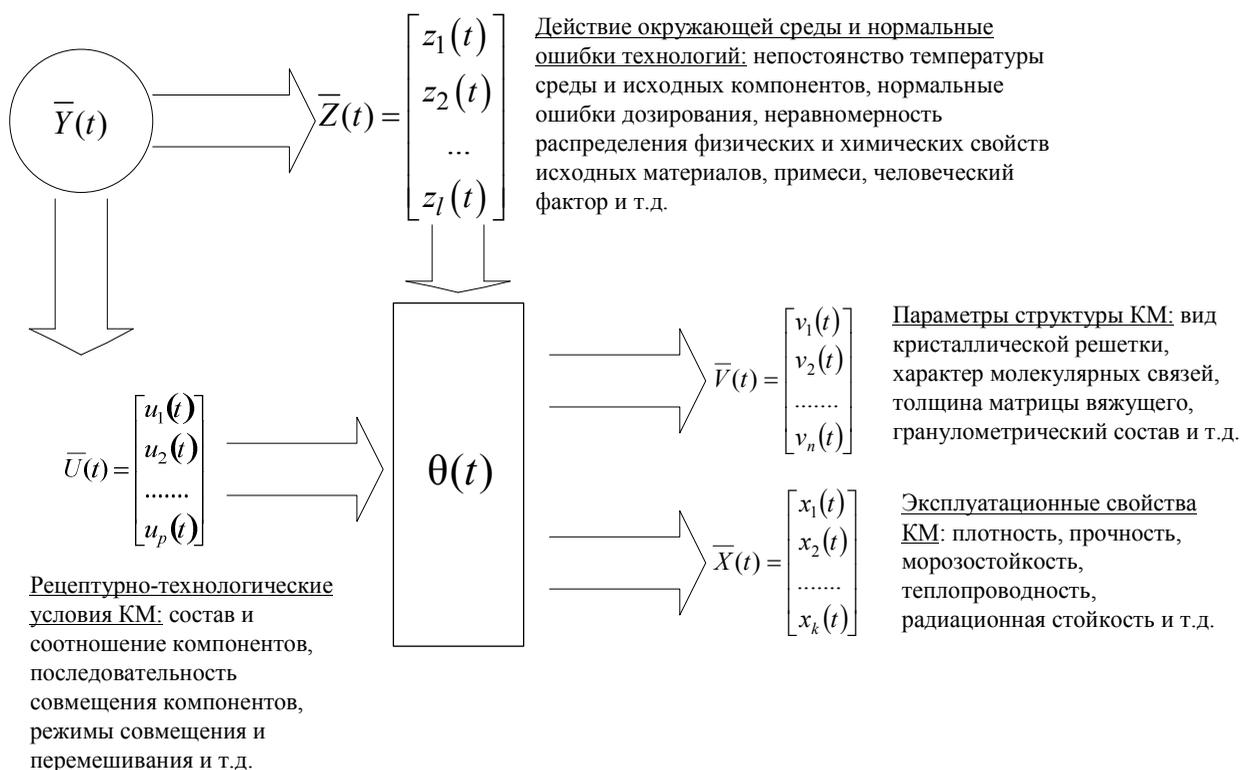


Рис. 3. Структурная схема объекта управления — КМ

моделях объекта. При рассмотрении технических объектов необходимо от внутренних параметров, характеризующих эксплуатационные свойства КМ или технологического процесса приготовления КМ, перейти к динамическим параметрам, предопределяющим внутренние свойства объекта как элемента системы управления с точки зрения динамики его поведения. К таким параметрам при представлении ММ РЗКМ в стандартной форме относятся коэффициенты характеристических уравнений динамических моделей кинетических процессов структурообразования композиционных материалов специального назначения, определяющие степень преобразования входной переменной элемента в выходную в статическом режиме (выход на эксплуатационное значение свойства), и постоянные времени T , обуславливающие скорость кинетического процесса образования структурного элемента КМ или системы (структурного уровня КМ).

Композиционные материалы имеют несколько управляемых и управляющих переменных, совокупности которых в математических моделях могут быть заданы векторами. Совокупность управляющих

$$\bar{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t)]^T$$

и возмущающих

$$\bar{Z}(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)]^T$$

воздействий в модели может быть задана одним вектором входных воздействий

$$\bar{Y}(t) = \{\bar{U}(t), \bar{Z}(t)\} = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t)]^T.$$

Таким образом, и КМ, и технологический процесс синтеза КМ или любой элемент системы КМ рассмотреть как объект управления — это значит выделить часть пространства, в котором протекает процесс структурообразования композита, подлежащий управлению, то есть определить его как систему взаимосвязанных через внутренние динамические параметры ОУ переменных — координат состояния и управляемых координат, управляющих и возмущающих воздействий.

Следовательно, рассмотрение любого элемента структуры (системы) КМ как объекта управления предполагает следующие этапы:

- **определение координат состояния объекта** — переменных, характеризующих поведение объекта в пространстве состояний (параметры структуры КМ);

- **выявление управляемых координат** — выходных переменных, подлежащих в соответствии с технологией управлению (физико-механические и эксплуатационные свойства КМ);
- **установление управляющих воздействий** — величин, посредством которых может быть наиболее эффективно обеспечено управление в заданном диапазоне выходными координатами объекта управления (рецептурно-технологические условия изготовления КМ);
- **нахождение возмущающих воздействий** — входных величин ОУ, влияющих на его управляемые координаты, но которые не могут быть изменены с помощью управляющего устройства или управление которыми не целесообразно (действие окружающей среды и нормальные ошибки технологий);
- **выявление внутренних параметров ОУ** — величин, характеризующих статические и динамические свойства объекта (характеристики кинетических процессов структурообразования);
- **установление критериев управления и ограничений** на входные и выходные переменные, возможных пределов изменения под действием возмущений внутренних параметров объекта (синтез рецептурно-технологических параметров и оптимизация структуры и свойств КМ).

В свете изложенного, можно выделить следующие этапы многокритериального синтеза РЗКМ как задачи управления:

- формулировка целей управления;
- определение объекта управления;
- создание модели объекта управления;
- синтез управления;
- реализация управления.

Создание модели объекта тесно связано с *проблемой идентификации*. Под идентификацией в широком смысле понимается получение или уточнение по экспериментальным данным модели реального объекта, выраженной в тех или иных терминах.

Представим механизм идентификации модели как процесс повышения ранга R модели $M(R)$ — сокращения неопределённости модели посредством выбора из множества моделей

$$M = M(v) = \{M(v+1)\}_{v=0,3},$$

требуемой за счёт привлечения дополнительной информации об объекте. Задача построения модели нетривиальна только в том случае, когда множество M содержит более одного элемента, т. е. имеется исходная неопределённость.

Наименьшая неопределённость при решении задачи идентификации соответствует моделям, заданным множеством полностью определённых моделей

систем третьего ранга, когда известны: класс модели объекта; структура операторов элементов модели, а не определены: параметры модели ОИ.

Таким образом, первая и наиболее простая задача — задача **параметрической идентификации** состоит в поиске параметров модели, удовлетворяющих заданным критериям, что соответствует повышению ранга неопределённости R модели системы со второго до третьего.

Элементы исходного множества M могут различаться структурами операторов и могут быть заданы моделями первого ранга неопределённости, т. е. множеством полностью определённых моделей систем второго ранга, когда известен класс модели и не определены: структура операторов модели; параметры модели.

В результате решения второй задачи — **задачи структурной идентификации** выбирается подмножество структур операторов (в частном случае — единственная структура), что соответствует повышению ранга неопределённости R модели с первого до второго.

Множество M может быть задано моделью нулевого ранга неопределённости (максимальная степень неопределённости), т. е. множеством полностью определённых моделей систем первого ранга (множеством моделей различных классов), когда не определены: класс модели; структура операторов модели; параметры модели.

В результате решения третьей задачи выбирается подмножество классов (в частном случае — единственный класс), что соответствует повышению ранга неопределённости R модели с нулевого до первого.

Совокупность решаемых задач построения ММ РЗКМ образует вложенную структуру, в которой выбор класса модели в качестве внутренних включает задачи структурной и параметрической идентификации. В свою очередь выбор структуры модели охватывает решение задач параметрической идентификации [4].

2. Задача прогноза

Данная задача преследует только одну цель: по известному \bar{Y} определить прогнозируемое состояние \bar{X} объекта. Очевидно, здесь по аналогии с задачами управления можно выделить следующие этапы многокритериального синтеза РЗКМ как задачи управления:

- формулировка целей прогноза;
- определение объекта исследования;
- создание модели объекта.

Отличительной чертой задачи прогноза является количественный характер модели, а не ее форма или структура.

3. Выявление механизма явлений, протекающих в КМ при структурообразовании

Здесь так же можно выделить три этапа многокритериального синтеза РЗКМ как задачи управления:

- формулировка целей исследования;
- определение объекта исследования;
- создание модели объекта.

В отличие от предыдущей задачи, основным здесь является именно выявление формы и структуры модели, т. е. скорее качественная сторона модели, а не количественная.

Нетрудно видеть, что во всех трех сформулированных задачах имеется общий (пожалуй, и наиболее сложный) этап — **создание модели объекта**.

4. Постановка общей задачи построения математических моделей композитов

В большинстве случаев приём содержательного (реалистического) математического моделирования КМ невозможен, так как отсутствует априорная информация о природе искомым соотношений, неизвестен общий вид аналитических уравнений, описывающих эти соотношения. Поэтому идентификацию детерминированных математических моделей и построение стохастических ММ КМ целесообразно проводить с использованием методов аппроксимации, теории подобия, теории вероятностей, дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализа, планирования эксперимента.

На реальном объекте (КМ) регистрируется вектор входных (управляющих

$$\bar{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t)]^T$$

и возмущающих

$$\bar{Z}(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)]^T$$

воздействий

$$\bar{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)]^T,$$

который интерпретируется как вектор определённого признака, характеризующий влияние условий функционирования исследуемой системы, и вектор выходных (управляемых) координат

$$\bar{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t)]^T,$$

интерпретируемый как вектор результирующих показателей, функции отклика или результирующих признаков, характеризующий поведение или эффек-

тивность функционирования (качество) исследуемой системы.

Далее строится ММ, устанавливающая причинно-следственную связь между результирующими \bar{Y} и определёнными \bar{X} факторами, определяется класс допустимых решений F и находится такая векторная функция из этого класса, которая давала бы наилучшую, в определённом смысле, аппроксимацию поведения вектора \bar{Y} на множестве точек — наблюдений $\{x_i\} | i = \overline{1, n}$.

Введём невязки $\delta_{ki} = \delta(f_k(x_i))$, характеризующие погрешности в описании результирующего признака \bar{Y} с помощью функции $f_k(x)$ в точке x_i и функционал качества КМ:

$$\Delta(\bar{f}) = \Delta(\{\delta_{ki}\}, k = \overline{1, p}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}) \quad (1)$$

как меру адекватности ММ $\bar{Y} \approx \bar{f}(x)$.

Таким образом, задача построения ММ КМ в математической формулировке сводится к нахождению такой векторной функции $\bar{f}(x)$ из класса допустимых решений \bar{F} , которая удовлетворяет решению экстремальной задачи вида

$$\Delta(\bar{f}(x)) = \text{extr}_{f \in F} \Delta(f(x)). \quad (2)$$

Конкретный вид невязок δ_{ki} функционала адекватности $\Delta(\bar{f})$ и класса допустимых решений \bar{F} определяется в зависимости от природы исследуемых структурообразующих процессов. При этом задача (2) отыскания стохастической ММ КМ или процесса распадается на две.

Первая задача — задача структурного синтеза — состоит в нахождении класса допустимых решений \bar{F} и определении из этого класса подходящего параметрического семейства функций $\{f(x); \Theta\}$.

Вторая задача — задача параметрической идентификации (синтеза, оптимизации) — сводится к подбору (статистическому оцениванию) значений параметров Θ , на которых достигается экстремум функционала (1).

Из приведенного с очевидностью следует, что оптимизация структуры и свойств материала (объекта) из условий получения оптимальных параметров кинетических процессов (критерии качества) изменением рецептурно-технологических параметров (управляющее воздействие) описывается как **задача оптимального управления**.

Получили схему *двухэтапной оптимизации*, разделяющей процесс управления на два последова-

тельных этапа: *построение программы и синтез механизма реализации этой программы.*

Применимость такой схемы в задачах материаловедения подтверждается управлением различными техническими (структурообразования и рецептура) и технологическими процессами.

При структурообразовании РЗКМ, как и в теории управления представляют интерес критерии оптимальности ко времени переходного процесса (быстродействию) и точности. Особый интерес представляет квадратичный критерий качества, частным случаем которого является критерий вида

$$I = \int_0^T \mathbf{Y}^T(t) \mathbf{Y}(t) dt.$$

Оптимальная по этому критерию система обеспечивает перевод объекта из начального в конечное состояние на промежутке $[0, T]$ при минимуме значения I .

Для скалярной системы последний критерий примет вид:

$$I = \int_0^T y^2(t) dt,$$

а оптимальная по этому критерию система будет системой с минимальной энергией управления.

Заключение

На основе приведенного подхода к многокритериальному синтезу материалов как задаче управления осуществлялась разработка композиционного материала на основе серного и эпоксидного вяжущего, модифицированного наноразмерным модификатором, приготовленным на основе астраленов (наночастиц) и ПАВ неионогенного типа. В качестве наполнителей и заполнителей использовался размолотый бой оптических стекол (тяжелых флинтгов). РЗКМ данного типа обладают повышенными защитными свойствами от воздействия ионизирующих излучений [5–7]. Оптимизация структуры и свойств материала производилась на основе выбора параметров кинетических процессов формирования его физико-механических характеристик (плотности, прочности, радиационной стойкости, набора прочности, тепловыделения, усадки и др.), описывающихся обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Функционал качества принимался в виде

$$\Delta(\bar{f}) = f \lambda_m + a \frac{1}{\lambda_m} + br + c \frac{1}{r},$$

$$\lambda_m = \min_i \{ \lambda_i \}, \quad r = \max_i \left\{ \frac{\lambda_i}{\lambda_m} \right\},$$

где $(-\lambda_i)$ — корни характеристического полинома, $\lambda_i > 0$, $i = \overline{1, k}$; f, a, b, c — весовые константы. Качество материала тем выше, чем меньше $\Delta(\bar{f})$.

Далее строилась обобщенная модель кинетических процессов. При решении задачи использовались области равных оценок качества материала $dk - I \leq \Delta(\bar{f}) < dk$, где k — класс системы; $k = \overline{1, N}$; N — балльность шкалы. Характеристики ингредиентов и материала в целом определялись градиентными методами [8–11].

Дальнейшее исследование и промышленная апробация разработанных композиционных материалов, показали высокую эффективность разработанного подхода при решении задач моделирования, анализа, синтеза наномодифицированных композиционных материалов специального назначения, а также новых композиционных материалов для защиты от ионизирующих излучений.

Литература

1. Самарский А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. — М.: Физматлит, 1997. — 184 с.
2. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение: Учеб. пособие для строит. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 2002. — 701 с.
3. Соломатов В. И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. — В кн: Новые композиционные материалы в строительстве. — Саратов, СПИ, 1981. — 9 с.
4. Бормотов А. Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов специального назначения: дисс... док. техн. наук: 05.13.18: защищена 22.12.2011; утверждена 30.08.2012 / Бормотов Алексей Николаевич. — Пенза, 2011. — 316 с.
5. Строительный раствор [Текст]: пат. 2087448 РФ: МПК⁶ C04B28/26, C04B111:20 / Бормотов А. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Пензенский инж. стоит. ин-т. — № 94006617/03; заявл. 22.02.1994; опубл. 20.08.1997, Бюл. № 17. — 2 с. ил.
6. Строительный полимерраствор для защиты от радиации [Текст]: пат. 2142439 РФ: МПК⁶ C04B26/14, G21F1/10 / Бормотов А. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Пензенская госуд. архит. стоит. академия. — № 97114757/03; заявл. 02.09.1997; опубл. 10.12.1999, Бюл. № 6. — 3 с. ил.
7. Композиция для изготовления радиационно-защитных строительных материалов [Текст]: пат. 2319676 РФ: МПК C04B28/00, G21F1/04 / Бормотов А. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Пензенский госуд. ун-тет. арх. и строит. — № 2006102633/03; заявл. 30.01.2006; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 28. — 4 с.
8. Разработка и управление качеством строительных материалов с регулируемой структурой и свойствами для защиты от радиации. / Бормотов А. Н. и др. // Тр. Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '03. / Ин-т пробл. упр. — М., 2003. — С. 2437–2460.
9. Моделирование процессов структурообразования дисперсных систем. / Прошин А. П. и др. // Тр. Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '05 / Ин-т пробл. упр. — М., 2004. — С. 700–724.

10. The extra-heavy concrete for protection from radiation / Proshin A. P. et al. — В сборнике: Proceedings of the International Conference on Role of Concrete in Nuclear Facilities 2005 International Congress — Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities. Сер. "Role of Concrete in Nuclear Facilities — Proceedings of the International Conference" sponsors: Institution of Civil Engineers, American Concrete Institute, Japan Society of Civil Engineers, University of Dundee, UK; editors: Dhir R. K., Paine K. A., Tang A. M.C., University of Dundee, Concrete Technology Unit. Dundee, Scotland, 2005. — P. 69–76.
11. Model of destruction and method for forecasting of composite materials resistance. / E. V. Korolev et al. — Proc. of the International Conference "Concrete Durability: Achievement and Enhancement", University of Dundee, UK. — HIS BRE Press, 2008. — P. 345–356.

Бормотов Алексей Николаевич. Профессор ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет». Д. т. н. Окончил в 1995 г. Пензенский государственный архитектурно-строительный институт. Количество печатных работ: 140, в т. ч. 8 монографий, 4 патента. Область научных интересов: математическое моделирование технических систем, управление качеством, многокритериальный синтез, наномодифицированные композиционные материалы. E-mail: aleks21618@yandex.ru

Прошин Иван Александрович. Зав. кафедрой ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет». Д. т. н., профессор. Окончил в 1972 г. Пензенский политехнический институт. Количество печатных работ: более 400, в т. ч. 20 монографий, 14 патентов. Область научных интересов: системный анализ, математическое моделирование технических систем, проблемы управления в вентильно-электромеханических системах, обработка информации, информационные технологии. E-mail: proshin@pgta.ru

Кузнецова Марина Владимировна. Вед. н. с. ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет». К. т. н., доцент. Окончила в 1983 г. МАИ им. С. Орджоникидзе. Количество печатных работ: 26, в т. ч. 2 монографии. Область научных интересов: системный анализ, математическое моделирование технических систем, управление в социальных и экономических системах, совершенствование алгоритмов оценивания степени соответствия объекта функциональному назначению. E-mail: kmvnio@yandex.ru