

# МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.П. Соколов**

*МГТУ им. Н.Э.Баумана*

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

E-mail: alsokolo@bmstu.ru

**А.П. Карпенко**

*МГТУ им. Н.Э.Баумана*

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

E-mail: apkarpenko@bmstu.ru

**Ключевые слова:** оптимальное проектирование композиционных материалов, системы автоматизированного проектирования, механика композиционных материалов, технологии разработки САПР, метод гомогенизации, многомасштабное моделирование, обратные задачи механики композитов.

**Аннотация:** Актуальность работы обусловлена важностью создания отечественных САПР композиционных материалов (КМ), разработка которых невозможна без применения обоснованной методологии автоматизированного проектирования КМ с заранее заданными характеристиками, моделей описания различных физико-механических характеристик КМ и их отдельных компонентов, вычислительных методов анализа этих характеристик, а также теоретических основ разработки таких САПР. В работе представляется методология автоматизированного проектирования КМ с заранее заданными характеристиками, особенностью которой является применение проектных процедур, описываемых в форме графовых моделей, построенных на основе заранее определенной модели характеристик проектируемого КМ и обеспечивающих автоматизацию выполнения.

## 1. Введение

Процесс проектирования нового композиционного материала (КМ) обычно тесно связан с проектированием конструкции на его основе [1], при этом требования, предъявляемые к конструкции, транслируются на требования к материалам этой конструкции (рис. 1).

Использование КМ в конструкциях определяет требования к технологиям изготовления и необходимость использования специального оборудования. Поэтому, как правило, технология производства определена заранее и является ограничением при проектировании нового КМ.

Таким образом задача проектирования композитной конструкции носит

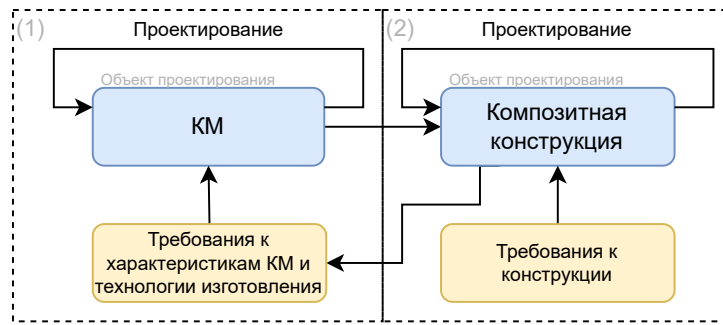


Рис. 1. Взаимосвязь процессов проектирования композитной конструкции и КМ, где: (1) – задача проектирования КМ с заданными характеристиками, (2) – задача проектирования композитной конструкции

многомасштабный характер: для проектирования композитной конструкции с заданными характеристиками необходимо предварительно спроектировать КМ с требуемыми характеристиками, на основе которого будет возможным такую конструкцию создать. В свою очередь, для проектирования КМ с требуемыми характеристиками может быть необходимо предварительно спроектировать (или выбрать) материалы компонентов этого КМ, которые, в общем случае, могут быть другими КМ.

В работе рассматривалась *задача проектирования КМ с заранее заданными характеристиками*, как задача параметрического синтеза, связанная с задачей проектирования соответствующей конструкции лишь через заданные требования к характеристикам планируемого к использованию КМ. Автоматизация процесса решения задачи проектирования КМ (далее, задача АП КМ) предполагает решение многочисленных подзадач (рис. 2), среди которых ключевыми выделены задачи прямой и обратной гомогенизации в различных вариациях.



Рис. 2. Основные задачи АП КМ

## 2. Математическая постановка задачи

С математической точки зрения задача проектирования КМ является задачей оптимизации или обратной задачей, которая заключается в определении таких

характеристик компонентов исследуемого КМ, при которых будут достигаться требуемые качества объекта проектирования, а именно: требуемые характеристики конечного КМ. В механике КМ эти задачи носят название задач *коэффициентной обратной гомогенизации* [2]. Такая задача зачастую предполагает многократное решение т.н. задач *прямой гомогенизации*, а именно: задач расчета эффективных физико-механических характеристик КМ на основе известных характеристик компонентов этого КМ.

Не ограничивая общности, рассмотрим модель КМ, состоящую из  $m$  компонентов с характеристиками  $\omega^\alpha \in \mathbb{R}^n$ , где  $\alpha \in [1..m]$  – номер компонента КМ;  $n$  – число характеристик, определяемое выбранной моделью физико-механического процесса.

Пусть целое  $s \geq 0$  – номер масштабного уровня, который определяет характерный размер  $l_s$  представительного элемента объема (ПЭО)  $V_s \in \mathbb{V}$ , описывающего микроструктуру КМ на масштабном уровне  $s$  (рис. 3), где  $\mathbb{V}$  – множество всех возможных ПЭО. Считаем, что  $l_s \propto 10^{-\rho s}$  м, где  $\rho$  зависит от конкретного КМ и верны неравенства  $2 \lesssim \rho \lesssim 3$ .

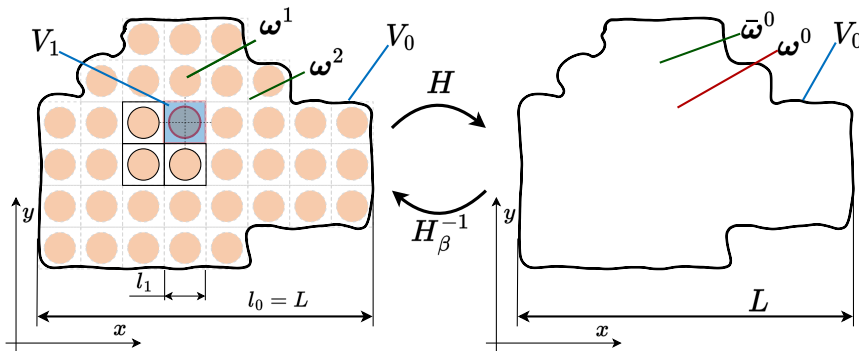


Рис. 3. Прямая и коэффициентная обратная гомогенизация КМ:  $l_0$  и  $l_1$  – характерные размеры  $V_0$  и  $V_1$ , соответственно;  $H$ ,  $H_\beta^{-1}$  – операторы прямой и коэффициентной обратной гомогенизации (глава 3)

Например, для полимерного КМ на основе эпоксидной матрицы и песчаного наполнителя:  $s = 0$  – масштабный уровень композитной конструкции,  $l_0 \propto 10^0 = 1$  м;  $s = 1$  – масштабный уровень основных включений наполнителя (песчинки), характерные размеры которых порядка 1 мм, т.е.  $l_1 \propto 10^{-3}$  м,  $\rho \approx 3$ .

Если не оговорено иное, то микроструктура КМ исследуется на масштабном уровне  $s = 1$ , а его эффективные характеристики – на масштабном уровне  $s = 0$  (уровень конструкции). На рис. 3 слева представлена неоднородная область  $V_0$  проектируемого КМ, обладающего периодической микроструктурой, описываемая ПЭО  $V_1$ , а справа – однородная («гомогенизированная») область, где  $\omega^0, \bar{\omega}^0 \in \mathbb{R}^n$  – эффективные физико-механические характеристики КМ на масштабном уровне  $s = 0$ , полученные численно (осредненные) и экспериментально (или требуемые) соответственно. Исходная область  $V_0$  состоит из наполнителя (сферические включения) и матрицы (связующее) с характеристиками  $\omega^1$  и  $\omega^2$  соответственно.

Задача *прямой гомогенизации* заключается в определении  $\omega^0$  на основе известных характеристик  $\{\omega^\alpha\}_1^m$ , геометрической модели ПЭО  $V_1$ , а также заданном операторе гомогенизации  $H$ , для которого  $\omega^0 = H(V_1, \{\omega^\alpha\}_1^m)$ . В качестве  $H$  использовался метод асимптотического осреднения, разработанный проф. Н.С. Бахваловым [3].

В работе предложена следующая постановка задачи *коэффициентной обратной гомогенизации*: определить такие характеристики  $\omega^{*\beta}$  (возможно, неединственные) некоторого компонента  $\beta$  при известных (требуемых) эффективных физико-механических КМ  $\bar{\omega}^0 \in \mathbb{R}^n$  и известных характеристиках  $\omega^\alpha$  всех остальных компонентов, т.е.  $\alpha \in [1..m]$ ,  $\alpha \neq \beta$ :

$$(1) \quad \omega^{*\beta} = H_\beta^{-1}(V_1, \{\omega^\alpha : \alpha \neq \beta\}_1^m, \bar{\omega}^0) = \underset{\omega^\beta \in \mathcal{D}_H \subset \mathbb{R}^n}{\operatorname{argmin}} M^\lambda(\omega^\beta),$$

$$M^\lambda(\omega^\beta) = \|H(V_1, \omega^1, \dots, \omega^\beta, \dots, \omega^m) - \bar{\omega}^0\|_2^2 + \lambda \|\omega^\beta\|_2^2, \lambda > 0,$$

где  $H_\beta^{-1}$  – оператор одномасштабной обратной гомогенизации, позволяющий идентифицировать характеристики  $\omega^{*\beta}$ ,  $\mathcal{D}_H$  – область определения  $H$ ;  $M^\lambda(\omega^\beta)$  – стабилизирующий функционал А.Н. Тихонова [4, 5];  $\lambda$  – параметр регуляризации.

Постановка *проблемы АП КМ* с заданными характеристиками требует определить: объект проектирования, критерии качества и множество вычислительных методов, необходимых для автоматизированного решения соответствующих задач (рис. 2). В отличие от (1), математическая постановка задачи АП КМ предполагает как определение характеристик  $\omega^{*\beta}$ , так и уточнение им соответствующих эффективных характеристик  $\bar{\omega}^0 \in \mathbb{IR}$ , заданных в форме интервальных оценок (критериев качества).

Решение задачи АП КМ, в том числе, предполагает автоматизацию процедуры выбора оператора прямой гомогенизации на основе модели исследуемого физико-механического процесса.

Задачи обратной гомогенизации и АП КМ, как правило, некорректно поставлены по Адамару. Для преодоления некорректности предложен метод реверсивной многомасштабной гомогенизации (РМГ) [6].

### 3. Методология автоматизированного проектирования КМ

Методология АП КМ предполагает выполнение проектных процедур согласно заданным маршрутам проектирования с целью достижения требуемых критериев качества объекта проектирования (рис. 4). Объектом проектирования в задаче АП КМ является КМ с заданными характеристиками, который формализован его моделью многомасштабной многокомпонентной гетерогенной структуры (ММГС) [6] связанным с ней множеством ПЭО и заданными типами схем армирования на различных масштабных уровнях.

Маршруты проектирования, обеспечивающие решение задач АП КМ, определяются с помощью понятия *графовая модель сложного вычислительного метода* (СВМ) [7]. Методы решения задач прямой и обратной гомогенизации относятся к СВМ и их реализация также возможна с помощью понятия *графовая модель СВМ*. Основные маршруты проектирования: *статический*, сравнительно неизменный для различных задач проектирования КМ, определяющий верхний уровень методологии и реализуемый в форме статической графовой модели  $G_s$ ; *динамический*, зависящий от постановки задачи, обеспечивающий автоматизированное решение задачи прямой гомогенизации и реализуемый в форме динамической графовой модели  $G_d$ , вложенной в  $G_s$ . Детальное описание

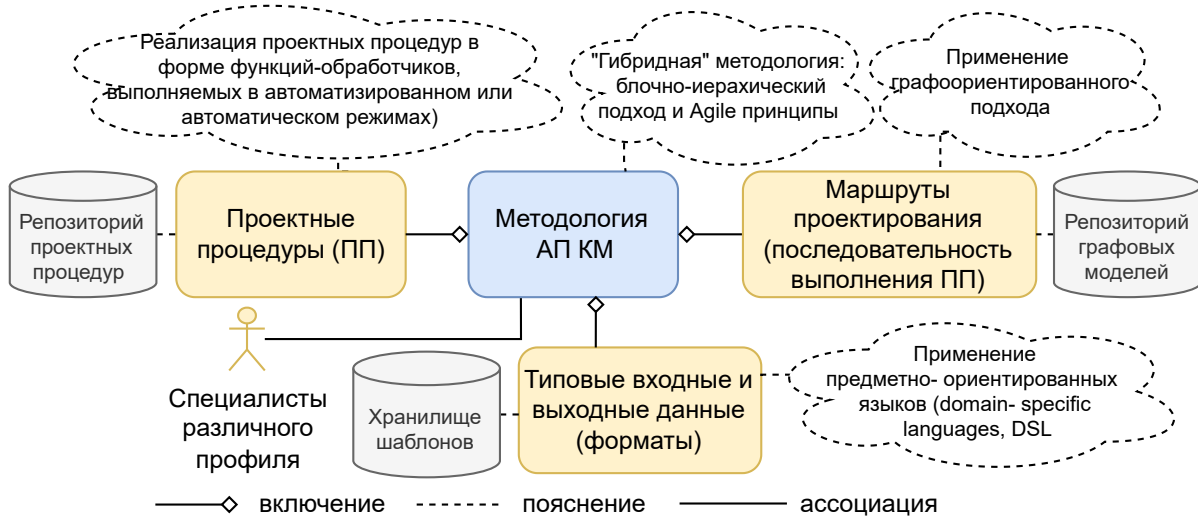


Рис. 4. Концептуальный уровень методологии АП КМ и особенности ее реализации. Понятия графоориентированный подход, функция-обработчик, графовая модель введены в работе [7]

элементов графовых моделей  $G_s$  и  $G_d$  выходит за рамки настоящего материала. Для определения графовых моделей разработан язык aDOT [7] (листинг 1, рис. 5). Обход указанных графовых моделей в автоматизированном режиме определяет маршрут АП КМ и решение поставленной задачи АП КМ с заданными характеристиками в условиях частично определенных входных данных.

```

Листинг 1. Определение графовой модели некоторого
СВМ на языке aDOT
P [type=predicate, binname=lib_preds, entry_func=pass_predicate]
F01 [type=edge, predicate=P, binname=lib_procs, entry_func=f01]
...
H [type=selector, binname=lib_preds, entry_func=sel_func]
S2 [type=node, selector =H]
__BEGIN__ -> S1
S0 -> S1 [edge=F01]
S1 -> S2 [edge=F12]
S2 -> S1 [edge=F21]
S2 -> S3 [edge=F23]
S3 -> __END__ }
    
```

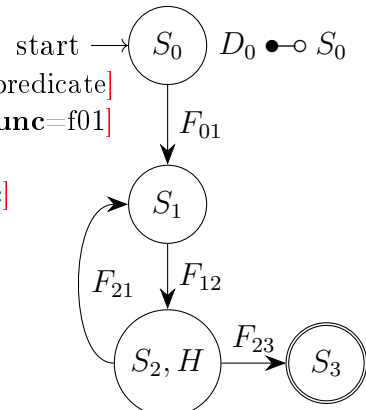


Рис. 5. Графовая модель, определенная в листинге 1

## 4. Заключение

1. Разработана методология автоматизированного проектирования КМ с заранее заданными характеристиками. В основе методологии лежит применение проектных процедур для автоматизированного формирования плана вычислений характеристик проектируемого КМ, используя его заранее

определенную модель характеристик. План представляется в форме графовой модели, обход которой определяет последовательность выполнения проектных процедур АП КМ с заданными характеристиками.

2. Систематизирован процесс АП КМ: определены маршруты проектирования и проектные процедуры (автоматические и автоматизированные), обеспечивающие решение ключевых задач АП КМ.
3. Элементы прототипа САПР КМ описаны в серии опубликованных статей [8–10]
4. На основе графоориентированного подхода разработана графовая модель алгоритма АП КМ: определены функции системы и последовательность их запуска, что скрывает процедуру АП КМ от исследователя, упрощая ее.

Исследование выполнено в рамках подготовки докторской диссертации А.П. Соколова, защищенной 21.12.2023 г.

## Список литературы

1. Смердов А.А. Основы оптимального проектирования композитных конструкций: Учебное пособие по курсу Проектирование композитных конструкций. Ч.1 / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. с. 88.
2. Ватульян А.О. Коэффициентные обратные задачи механики. М.: Физматлит, 2019. 272 с.
3. Бахвалов Н.С. Осредненные характеристики тел с периодической структурой // Докл. АН СССР. 1974. Т. 218, № 5. С. 1040.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 285 с.
5. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. Москва: Наука, 1990. 232 с.
6. Соколов А.П., Першин А.Ю., Щетинин В.Н., Сапелкин А.С. Реверсивная многомасштабная гомогенизация физико-механических характеристик гетерогенных периодических сред с использованием графоориентированного программного подхода // Композиты и наноструктуры. 2017. Т. 9, № 3-4. С. 25–38.
7. Соколов А.П., Першин А.Ю. Графоориентированный программный каркас для реализации сложных вычислительных методов // Программирование. 2019. Т. 47, № 5. С. 43–55.
8. Соколов А.П., Першин А.Ю. Система автоматизированного проектирования композиционных материалов. Часть 1: концепции, архитектура и платформа разработки // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 8–9. С. 72–83.
9. Соколов А.П., Першин А.Ю. Система автоматизированного проектирования композиционных материалов. Часть 2: вычислительная подсистема, распределенные вычисления с применением графоориентированного подхода // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 10. С. 49–63.
10. Соколов А.П., Голубев В.О. Система автоматизированного проектирования композиционных материалов. Часть 3: графоориентированная методология разработки средств взаимодействия пользователь-система // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 2. С. 43–57.