

УДК 539.3:519.6

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО МОДУЛЯ ЮНГА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. АВЛАС, А. С. ПУЗАНОВ

Институт математики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Актуальность и цель работы. Композиционные порошковые материалы находят широкое применение во многих высокотехнологичных отраслях промышленности благодаря возможности целенаправленного изменения их физико-механических свойств путём варьирования состава, формы и объёмной доли наполнителя. Одной из ключевых характеристик, определяющих несущую способность и долговечность изделия, является эффективный модуль упругости (модуль Юнга). Экспериментальное определение этого параметра для каждого нового состава требует значительных временных и материальных затрат. В связи с этим особую актуальность приобретают вычислительные методики, позволяющие прогнозировать макроскопические упругие свойства композита на основе анализа его микроструктуры и свойств компонентов.

Целью работы является расширение существующего программного комплекса, реализующего численный метод для определения эффективного модуля Юнга композиционных порошковых материалов в двумерной постановке на основе энергетического баланса и метода контрольного объема, а также апробация комплекса на примере реальных композиционных систем.

Математическая модель и численный метод. В основе разработанного программного комплекса лежит математическая модель, имитирующая физический эксперимент по растяжению представительного объема материала (ячейки периодичности). На контактных границах между различными фазами использованы условия идеальной адгезии.

Эффективный модуль упругости определяется из условия равенства работы внешних сил, затраченной на деформацию представительного объема, и суммарной потенциальной энергии деформации всех ячеек сетки. Такой подход является физически обоснованным и позволяет получать интегральные характеристики композита на основе локальных полей напряжений и деформаций, вычисляемых согласно разработанному ранее численному методу [1].

Проведена апробация программного комплекса для разных композитов, в том числе исследовалась зависимость эффективного модуля от объёмной доли включений для меди с включениями карбида вольфрама (WC) и тефлона (PTFE), а также исследование градиентных покрытий. Полученные результаты качественно согласуются с физическими представлениями и справочными данными для чистых материалов.

Программный комплекс: архитектура и функциональные возможности. Численный метод внедрен в программный комплекс

CompositeMath, предназначенный для автоматизации процесса расчета эффективных характеристик (тепловых и упругих) композиционных порошковых материалов и ориентированный на использование в инженерной практике и научно-исследовательских работах при проектировании новых материалов и оптимизации их состава, предоставляя единую среду для проведения полного цикла виртуальных испытаний.

Комплекс реализован на языке C++ с использованием библиотеки Qt5. Приложение является локальным и предназначено для запуска на десктопных персональных компьютерах под управлением операционных систем семейства Windows. Модульная архитектура комплекса обеспечивает гибкость и возможность расширения функциональности без перестройки всей системы. Хранение исходных данных, настроек расчета и полученных результатов осуществляется в XML-файлах.

В составе комплекса выделены следующие основные модули.

1. Вычислительный модуль (вычислительное ядро комплекса). Содержит реализацию метода контрольного объема для каждого доступного класса задач с предзаданными граничными условиями на разных типах сеток.

2. Модуль управления вычислительными сетками. Содержит структуры данных, реализующих генерацию сетки на основании структуры композита из файла, обработку и хранение данных для численных алгоритмов.

3. Иные технические модули, обеспечивающие работоспособность комплекса.

Для взаимодействия пользователя с вычислительным ядром программного комплекса реализована графическая оболочка в виде отдельного приложения. В рамках данной оболочки пользователь осуществляет ввод и подготовку структуры исследуемого композита, настроек вычислительных алгоритмов, обновляет базу материалов.

Заключение. Разработанная реализация алгоритма для программного комплекса CompositeMath является эффективным инструментом для прогнозирования эффективного модуля Юнга композиционных порошковых материалов. Комплекс позволяет проводить виртуальные испытания, значительно сокращая трудоемкость и стоимость разработки новых материалов. Модульная архитектура и гибкость настроек делают его пригодным для решения широкого круга задач, включая анализ формы, размера, объемной доли включений и температуры на упругие характеристики. Представленные результаты вычислительных экспериментов подтверждают работоспособность и корректность разработанного подхода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громыко, Г. Ф. Численный метод для нахождения эффективного модуля Юнга композиционных порошковых материалов / Г. Ф. Громыко, А. Н. Авлас // Труды Института математики НАН Беларуси. – 2026. – Т. 34, № 1. – С. 96–117.