Выбор оптимальной структуры композита с использованием генетического алгоритма

Ю.В. Геренг, Ю.Н. Сидоренко
Томский государственный университет

Рассматривается задача оптимизации параметров структуры армирования композита. Управляемыми параметрами являются объемное содержание армирующих элементов и тип структуры армирования материала. Критерий оптимальности записывается относительно характеристик жесткости и живучести композита. Для поиска оптимальных значений управляемых параметров использован генетический алгоритм. Показано, что метод обладает высокой скоростью сходимости уже при малых объемах популяции решений.

В основе технологий создания многих современных конструкционных материалов лежит идея объединения в единый комплекс компонентов, обладающих разными физико-механическими свойствами. В результате такого подхода стало возможным создание материалов (композитов), наилучшим образом приспособленных для работы в определенных условиях, способных удовлетворять именно тем требованиям, которые предъявляются к ним при эксплуатации.

Наличие возможности управления параметрами, влияющими на свойства композитов, в процессе их проектирования и производства определяет актуальность задач, связанных с оптимальным выбором таких параметров. Среди факторов, оказывающих влияние на механические свойства композитов, одними из наиболее важных являются механические свойства компонентов материала, параметры структуры армирования, образованной компонентами, и технологические параметры. Задачи оптимизации композитов являются, как правило, многопараметрическими, а их решение в общем случае осложняется необходимостью моделирования механического поведения материала в процессе всего его жизненного цикла: от создания до практического применения.

В последние годы при решении сложных (многопараметрических, многоэкстремальных) задач оптимизации стали применяться эволюционные подходы [1], в частности, широкую известность приобрели генетические алгоритмы (ГА). Такие методы решения задач оптимизации в той или иной степени основаны на имитации эволюционных процессов в биологических популяциях, подчиняющихся закону естественного отбора.

В работе рассматривается возможность использования генетических алгоритмов при оптимизации параметров структуры армирования волокнистого композита. Для оценки качества материала выбраны характеристики его жесткости и живучести.

Полагается, что элементы армирования (волокна) имеют одинаковый диаметр, а одноосное нагружение ведется в плоскости, нормальной к направлению армирования материала. Подобный вид нагружения для волокнистых композитов является наиболее опасным, поскольку может приводить к расслоению материала. В качестве управляемых параметров выбраны объемное содержание волокон и тип структуры армирования. Тип структуры определяется по наличию или отсутствию порядка в расположении волокон в объеме композита и может принимать одно из двух значений: регулярное или стохастическое армирование.

Поскольку при стохастическом армировании все механические характеристики композита являются случайными величинами, критерий оптимальности записывается относительно параметров, характеризующих распределение локальных значений модуля упругости (математическое ожидание и интерквартильная широта) [2]. При этом математическое ожидание представляет собой эффективный модуль упругости, а интерквартильная широта распределения может рассматриваться в качестве характеристики живучести материала, поскольку ее уменьшение свидетельствует о возрастании доли однотипных локальных конфигураций структурных элементов, что, в свою очередь, ведет к проявлению свойства равнопрочности у элементарных объемов материала и, как следствие, к снижению его живучести.

Для определения параметров распределения локальных значений модуля упругости формируется представительная выборка таких значений. Каждый элемент выборки представляет собой результат решения задачи определения механического отклика элементарного объема композита на внешнее контрольное нагружение. В математическом отношении данная задача описывается системой уравнений теории упругости, в которую входят уравнения равновесия, уравнения Коши и уравнения состояния. Задача решается численно с явным учетом конфигурации структурных элементов композита в пределах выбранного элементарного объема [3]. На внешних границах объема ставятся граничные условия в смешанном виде с учетом выбранного типа контрольного нагружения, на внутренних границах (границах раздела компонентов) используются условия равенства компонент вектора перемещений (условия склейки). Решение этой задачи позволяет найти поле компонент тензоров напряжений и деформаций в пределах эле-

ментарного объема композита и вычислить локальное значение эффективного модуля упругости материала в точке, отождествляемой с выбранным конкретным элементарным объемом. Повторение данной процедуры для точек, выбираемых с использованием генераторов случайных положений в пределах представительного объема материала, позволяет сформировать выборку локальных значений модуля упругости. Оценка представительности выборки выполняется по мере ее формирования. Полученная таким образом выборка хорошо описывается вейбулловским законом распределения.

Решение задач оптимизации с использованием эволюционных подходов сопряжено с необходимостью многократных вычислений значений целевой функции. В рассматриваемой задаче целевая функция определялась относительно параметров жесткости и живучести композита, и ее вычисление для каждого набора управляемых параметров (как это было показано выше) представляет собой решение крайне трудоемкой в вычислительном отношении задачи о нахождении эффективных механических свойств композита со стохастической структурой армирования.

Для повышения эффективности алгоритма нахождения оптимального решения реальный объект исследования (математическая модель композита со стохастической структурой) заменялся упрощенной моделью (метамоделью). В качестве метамодели использовалась полиномиальная кусочно-непрерывная аппроксимация целевой функции исходной задачи. Для построения такой аппроксимации значения целевой функции находились для нескольких наперед заданных комбинаций управляемых параметров (объемного содержания волокон для каждого типа структуры). Построенная метамодель использовалась в дальнейшем для вычисления значений целевой функции в рамках генетического алгоритма поиска оптимального решения.

Для нахождения комбинации управляемых параметров, при которой целевая функция достигает максимума, использовался один из простейших вариантов ГА с единственной популяцией решений. Каждое решение в популяции кодировалось битовой строкой, одна часть которой содержала информацию об объемном содержании волокон в композите, другая – о типе структуры армирования. На каждой итерации для популяции решений выполнялись обычные «генетические» процедуры: отбор (методом турнирной селекции), скрещивание кодов отобранных решений, мутация. Результатом выполнения данных процедур являлась замена исходной популяции решений новой популяцией («смена поколений»). Для каждого нового «поколения» проводилась оценка сходимости решения. В качестве критерия сходимости

использовалась величина максимального отклонения объемного содержания волокон в субпопуляции для каждого из типов структуры армирования от его среднего значения в субпопуляции. Оценка качества каждого решения в популяции выполнялась в рамках параллельного алгоритма с использованием стандарта MPI.

Описанный алгоритм использовался для поиска параметров структуры армирования композита TiNi-TiC, обеспечивающих ему максимальные показатели жесткости и живучести, в интервале объемного содержания армирующих элементов от 10 до 50%. Полученные результаты показали, что алгоритм обладает высокой скоростью сходимости уже при сравнительно малых объемах популяции решений. При этом увеличение объема популяции сопровождается увеличением количества итераций («поколений»), необходимых для достижения сходимости. Данное обстоятельство означает, что при решении подобных задач может быть найден некоторый «критический» объем популяции, обеспечивающий нахождение оптимального решения, превышение которого приводит лишь к увеличению вычислительных затрат, снижающих эффективность алгоритма. Показано, что в рамках принятых допущений оптимальной с точки зрения повышения жесткости и живучести композита будет стохастическая структура армирования с максимально высоким объемным содержанием включений (до 50%).

Литература

1. **Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.** Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
2. **Кремер Н.М.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 573 с.
3. **Сидоренко Ю.Н.** Прогнозирование механических свойств стохастических композиционных материалов: Дисс. … канд. физ.-мат. наук. Томск, 2004. 142 с.