

Численная оценка эффективных нелинейно-упругих свойств резинокордного композита при конечных деформациях с учетом слабосжимаемости резины

Научный руководитель – Яковлев Максим Яковлевич

Базир Ярослав Андреевич

Студент (специалист)

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: yaroslav.bazir@yandex.ru

Резинокордный композит представляет собой многослойный материал, состоящий из обрешеченных нитей корда (стальных или текстильных), ориентированных под различными углами в соседних слоях. Данный материал широко используется в конструкции пневматических шин (каркас, брекер) и в процессе эксплуатации испытывает значительные нагрузки, приводящие к конечным деформациям. Корректное описание его механического поведения требует учета геометрической и физической нелинейности, а также слабосжимаемости резиновой матрицы.

Работа посвящена численной оценке эффективных определяющих соотношений резинокордного композита в рамках нелинейной теории упругости при конечных деформациях. В качестве кинематических характеристик используются аффинор деформаций и тензор деформаций Грина, а напряженное состояние описывается вторым тензором напряжений Пиолы–Кирхгофа. Для кордных нитей применяется модель материала Мурнагана, учитывающая нелинейность упругого отклика, а для резины – модель Муни-Ривлина со слабосжимаемой постановкой (введение объемной добавки к потенциалу деформации).

В работе рассматривается представительный объем (RVE), геометрически соответствующий периодической структуре композита. Эффективный материал определяется из условия равенства средних напряжений при одинаковых перемещениях граней представительного объема. Для построения эффективных характеристик решается последовательность краевых задач теории упругости при различных видах нагружения: одноосных растяжениях и сжатиях, сдвигах, их композициях и всестороннем нагружении. Граничные условия формулируются в виде заданных напряжений на границе деформированного объема при наложении связей, исключающих жесткое движение и поворот ячейки, а также обеспечивающих периодичность.

По результатам численного решения задач методом конечных элементов производится осреднение полей напряжений и деформаций. Далее с использованием метода наименьших квадратов строятся аппроксимационные зависимости между компонентами эффективных тензоров напряжений и деформаций с точностью до второго порядка малости по деформациям. Получены выражения для эффективных тензоров четвертого и шестого порядков, удовлетворяющие необходимым симметриям упругого материала. Инвертирование соотношений осуществляется методом Синьорини.

Отдельное внимание уделено влиянию слабосжимаемости резины на шаровую часть тензора напряжений и на структуру граничных условий. Показано, что учет объемной составляющей потенциала деформации существенно влияет на эффективные модули при всестороннем и комбинированном нагружении.

Полученные результаты сопоставлены с приближенными аналитическими оценками (правило смесей, формулы Кристенсена, модель двухслойного резинокорда Бидермана). Проведено сравнение линейных и нелинейных эффективных характеристик, показано проявление анизотропии и нелинейного упрочнения при конечных деформациях.

Предложенный подход позволяет систематически строить нелинейные эффективные определяющие соотношения для гетерогенных композитов периодической структуры и может быть использован при моделировании напряженно-деформированного состояния элементов пневматических шин и других армированных эластомерных конструкций.

Источники и литература

- 1) Бидерман В. Л. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытание, эксплуатация) / под общ. ред. В. Л. Бидермана. — М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1963.
- 2) Левин В. А., Зингерман К. М. Точные и приближенные аналитические решения при конечных деформациях и их наложении. — М.: Физматлит, 2016. — (Нелинейная вычислительная механика прочности: в 5 т. Т. III).
- 3) Кристенсен Р. Введение в механику композитов / пер. с англ. А. И. Бейля, Н. П. Жмуда; под ред. Ю. М. Тарнопольского. — М.: Мир, 1982.
- 4) Лурье А. И. Теория упругости. — М.: Наука, 1970.
- 5) Лурье А. И. Нелинейная теория упругости. — М.: Наука, 1980.
- 6) Победря Б. Е. Механика композиционных материалов. — М.: Издательство Московского университета, 1984.