

УДК 539.3

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРАКТИЧЕСКИ НЕСЖИМАЕМОЙ МАТРИЦЫ С НАНОПОЛНИТЕЛЯМИ

© 2011 г.

А.Н. Власов

Институт прикладной механики РАН, Москва

bah1955@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Предложены трехфазная модель (матрица–слой–включение) композитного материала с практически несжимаемой матрицей и ее численная реализация, которая описывает эффект усиления при уменьшении размеров частиц наполнителя. Проведены расчеты по определению эффективного модуля Юнга и объемного модуля деформации композитного материала наполненного частицами шунгита в зависимости от радиуса включений. Показано, что оценка эффективных модулей деформации таких материалов, полученная расчетом, удовлетворительно согласуется с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: трехфазная модель композитного материала, эффективные механические характеристики, задача на ячейке, конечно-элементный расчет.

Введение

Согласно многочисленным исследованиям отечественных и зарубежных ученых, варьирование механических свойств композиционных материалов достигается путем их наполнения дисперсными частицами различной природы. При этом существенное влияние на механические свойства может оказывать размер частиц наполнителя. В этом случае эффект усиления связан с их удельной поверхностью и ее структурой, которая, по существу, и определяет контактный слой. В настоящее время приобрела актуальность проблема оптимального проектирования композитных материалов конструкционного и функционального назначения, в частности шинных резин, и оценки их механических свойств. Именно механическими свойствами последних определяется технический прогресс в ряде важных промышленных областей – автомобилестроении, авиационной и космической отраслях и др.

С учетом сказанного, целью настоящего исследования становится разработка аналитико-численных методов оценки деформационных характеристик гиперупругих полимерных композитов.

Определение эффективных деформационных характеристик

Рассмотрим эластомерные композиты на основе бутадиен-стирольной матрицы и нано-

микроразмерные наполнители – частицы минерала шунгит (40 и 200 нм соответственно). Будем решать задачу определения их эффективных деформационных характеристик в зависимости от радиуса включений с объемной долей наполнения 2%.

В силу шероховатой структуры поверхностного слоя наполнителя естественно предположить, что контактный слой (переходная зона) содержит как материал матрицы, так и материал наполнителя, т.е. определяется материалом эластомерной матрицы и минерального наполнителя. В рамках этого предположения примем, что значение модуля Юнга контактного слоя E_L определяется правилом смесей: $E_L = v'_M E_M + v'_I E_I$, где E_M, E_I – модуль Юнга матрицы и наполнителя соответственно; v'_M и v'_I – относительная доля материала матрицы и наполнителя в объеме контактного слоя соответственно. Толщина контактного слоя l определялась по результатам экспериментальных исследований и в расчетах принималась $l = 25$ нм.

Для оценки эффективных упругих характеристик воспользуемся методом асимптотического усреднения Бахвалова [1]. Обоснование применимости этого метода к оценке механических свойств структурно неоднородных сред, в частности композитов, структура которых отлична от периодической, показана в [2].

Процедура усреднения свойств композитных материалов сводит задачу определения эффектив-

ных характеристик к последовательному решению задач на ячейке с периодическими краевыми условиями. Эти задачи определяют так называемые функции быстрых переменных $N_k(\xi)$, через которые находятся эффективные характеристики.

Оценка деформационных характеристик эластомерных композитных материалов, наполненных как наночастицами, так микрочастицами шунгита, осуществлялась с применением численных расчетов. Для этого решались задачи на ячейке. Их решение было выполнено в 3D-постановке. Численное решение было получено с использованием программного комплекса, разработанного на основе объектно-ориентированного подхода в программировании, в котором реализована модификация метода конечных элементов, именуемая блочным аналитико-численным методом [3].

В расчетах в соответствии с результатами экспериментальных данных [4] принимались следующие значения механических свойств компонентов, составляющих композитный материал: модуль деформации бутадиен-стирольной матрицы $E_M = 135$ МПа; модуль деформации минерала шунгит $E_I = 1.5$ ГПа; модуль деформации контактного слоя $E_L = 1.0$ ГПа. Коэффициенты Пуассона компонентов, составляющих композитный материал, в расчетах назначались следующими: для наполнителя и контактного слоя $\nu = 0.3$, для матрицы $\nu = 0.4999$.

Ячейка периодичности моделировалась параллелепипедом размером $L_1 \times L_2 \times L_3$, а включение – шаром радиуса R , расположенным в центре параллелепипеда вместе со сферическим слоем ширины l .

На рис. 1 представлены результаты расчетов

по определению: а) эффективного модуля Юнга E , б) объемного модуля деформации K композитного материала, наполненного частицами шунгита, в зависимости от радиуса включения.

Сравнение модулей деформации, полученных в экспериментальных исследованиях и расчетом, приведено в таблице.

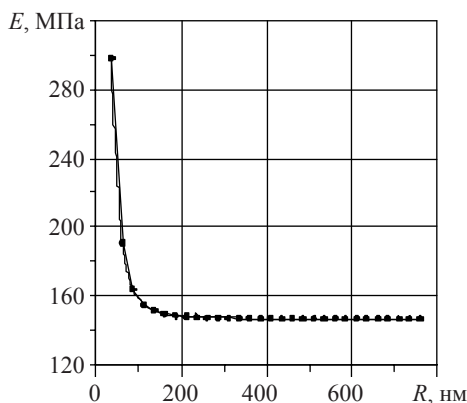
Таблица

Вариант	Расчет	Эксперимент (ИПРИМ РАН, [4])	
	E , МПа	E , МПа	Разброс значений E , МПа
Нано-частицы	167	~193	(170, 216)
Микро-частицы	153	~140	(126, 154)

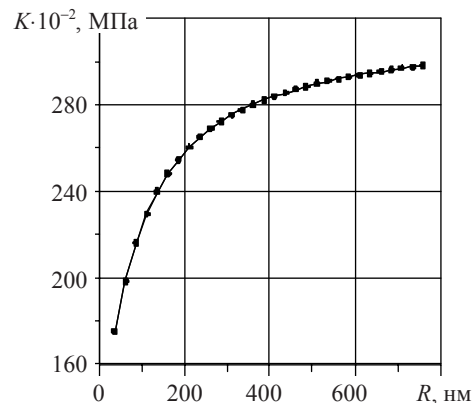
Из таблицы видно, что оценка эффективных модулей деформации композитных материалов, наполненных частицами шунгита, полученная расчетом, удовлетворительно согласуется с результатами экспериментальных исследований. Экспериментальные данные определений модуля деформации соответствуют деформациям материала не более 105 нм.

Заключение

Предложена трехфазная модель (матрица–слой–включение) композитного материала с практически несжимаемой матрицей и ее численная реализация, которая описывает эффект усиления при уменьшении размеров частиц наполнителя. По мнению авторов, усиление определяется межфазным слоем, свойства и размер которого зависят от материала матрицы, наполнителя и структуры его поверхности, которая может быть охарактеризована хаусдорфовой (фрактальной) размерностью.



а)



б)

Рис. 1

Список литературы

1. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука, 1984. 352 с.
2. Власов А.Н., Мерзляков В.П. Усреднение деформационных и прочностных свойств в механике скальных пород. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. 208 с.
3. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мнушкин М.Г., Тропкин С.Н. // Инженерные системы – 2010: Тр. Междунар. научно-практич. конф. Москва, 6–9 апреля, 2010. М.: РУДН, 2010. С. 78–88.
4. Корнев Ю.В. и др. // Каучук и резина. 2008. №6. С. 18–23.

ESTIMATION OF DEFORMATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS ON THE BASIS OF A PRACTICALLY INCOMPRESSIBLE MATRIX WITH NANO-INCLUSIONS*A.N. Vlasov*

A three-phase model including a practically incompressible matrix, an interface layer and a filler (schungite particle) is presented together with its analytical-numerical implementation for composite materials with scale effect of strengthening when reducing the sizes of particles. Based on the model, were carried out a series of computations for determining effective Young and bulk deformation moduli of composite materials filled with particles of inclusions of various radii. It is shown, that the estimates of the effective moduli agree satisfactorily with the results of experimental analyses and demonstrate a marked trend of scale strengthening for this type of composite materials.

Keywords: three-body model of composite material, effective mechanical characteristics, problem on the cell, finite element analysis.