

УДК 539.3

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2011 г.

А.Л. Медведский, А.С. Курбатов

Московский авиационный институт (государственный технический университет)

mdv66@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Рассмотрена методика определения эффективных упругих характеристик пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов по результатам наноиндентирования наполнителя и связующего. По результатам эксперимента построена математическая модель гомогенного материала, обладающего ортотропными упругими свойствами. Эффективные упругие характеристики композиционного материала определяются по результатам численного решения шести модельных задач, соответствующих одноосному растяжению по трем координатным осям, а также трем сдвигам в координатных плоскостях.

Ключевые слова: материалы композиционные, наноиндентирование, метод конечных элементов.

Представительный объем материала

В настоящей работе исследуется 4Д-Л армированный углерод-углеродный композиционный материал, представительный объем которого показан на рис. 1 (связующее условно не показано).

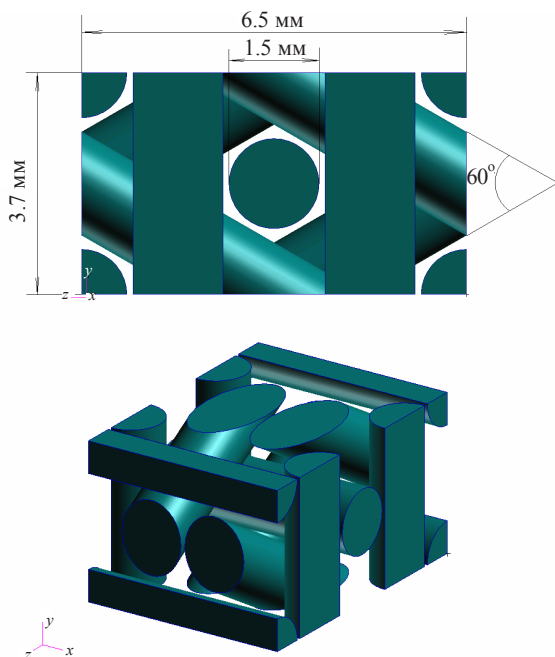


Рис. 1

Углеродная матрица моделируется однородным изотропным линейно-упругим материалом, а армирующие волокна кругового поперечного сечения – линейно-упругим трансверсально-изотропным однородным материалом. Предполагает-

ся, что на границе волокна и связующего реализуются условия идеального контакта, эквивалентные равенству векторов перемещений и напряжений компонентов композита.

Определение эффективных характеристик гомогенного материала

Эффективные упругие характеристики определяются из решения шести модельных задач, соответствующих растяжению представительного объема по трем координатным осям и трем сдвигам в координатных плоскостях [1]. Для определения тензора упругих констант гомогенного материала решается следующее матричное уравнение

$$D = \Sigma \Xi^{-1}, \quad (1)$$

где Σ – матрица средних по объему компонентов шести напряженных состояний, Ξ – матрица средних по объему компонентов шести деформированных состояний в модельных задачах.

Средние значения компонентов тензоров напряжения и деформации вычисляются следующим образом (V – объем представительного элемента):

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma dV, \quad \hat{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon dV. \quad (2)$$

Определение упругих характеристик компонентов на микроуровне

Эксперимент на приборе NanoTest 600 проводился по следующей методике. Образец УУКМ

размером 13×13 мм и толщиной 1.5 мм закреплялся на подложке при помощи клея, затем образец подводился к индентору. Индентирование образца проводилось в 10 точках с интервалом 20–30 мкм. Нагрузка увеличивалась с постоянной скоростью до достижения заданной максимальной нагрузки (для скорости 0.05 мН/с – 1 мН). Скорость индентирования менялась в соответствии с величиной максимальной нагрузки из расчета, что цикл нагрузки должен занимать 20 с. Затем максимальная нагрузка фиксировалась на 10 с и определялся так называемый «крип»-эффект, т.е. при фиксированной (постоянной) нагрузке происходило дальнейшее увеличение глубины индентирования. Разгрузка проводилась с той же скоростью, что и нагружение. В данном эксперименте использовался «индентор Берковича» с углом при вершине 65.3° и радиусом закругления 200 нм. Исследуемые зоны материала представлены на рис. 2 (*a* – поперечное сечение стержня, *b* – продольное сечение стержня, *в* – связующее).

В результате обработки экспериментальных данных получены значения приведенного модуля упругости для стержня как в продольном, так и в поперечном направлении, а также для углеродного связующего (табл. 1). Полученные упругие характеристики компонентов использованы для расчета эффективных упругих констант реального углерод-углеродного композиционного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-01-00731-а).

Список литературы

1. Соколкин Ю.В. и др. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций. М.: Наука, Физматлит, 1996. 240 с.
2. Медведский А.Л., Корнев Ю.В., Курбатов А.С. Исследование физико-механических свойств 4D углерод-углеродного композиционного материала на макро- и микроуровне при действии высоких температур // Тр. МАИ. Вып. №41. <http://www.mai.ru/science/trudy/>

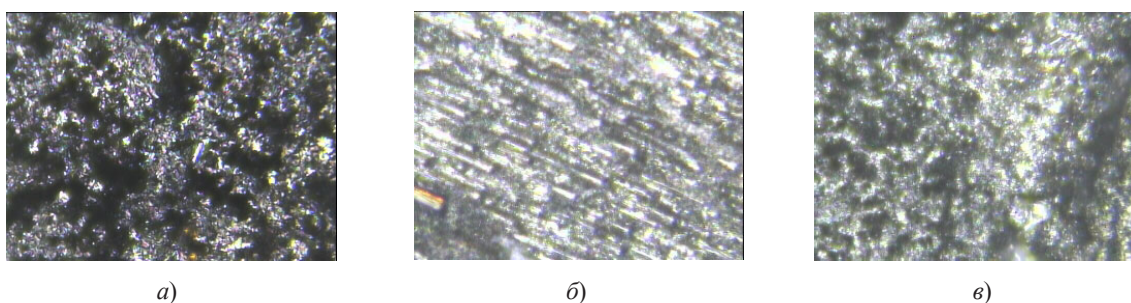


Рис. 2

Таблица 1

	Стержень в продольном направлении	Стержень в поперечном направлении	Связующее
Максимальная глубина проникновения, нм	621.32	1223.81	2284.86
Пластическая глубина проникновения, нм	572.99	1159.63	1749.41
Твердость, ГПа	1.21	0.30	0.20
Приведенный модуль, ГПа	46.37	17.53	7.41
Упругое восстановление	0.08	0.05	0.03
Подагливость контакта, нм/мН	6.43	8.54	9.37
Пластическая работа, кДж	0.93	2.13	2.74
Упругая работа, кДж	0.49	0.66	0.81
Номер индента	4	6	1

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECTIVE ELASTIC PROPERTIES
OF SPATIALLY REINFORCED COMPOSITE MATERIALS***A.L. Medvedsky, A.S. Kurbatoff*

A new method of determining effective elastic properties of spatially reinforced carbon-carbon composites is proposed. The method is based on nano-indentation of both filling material and binding agent and the finite element simulation. A new model of a homogeneous elastic orthotropic material is constructed, where all effective elastic properties are computed from the numerical solutions of six problems modeling three pure tensions and three pure shears.

Keywords: composite materials, nano-indentation, finite element method.