

ФІЗИКА

УДК 678.01:539.3

*Зазимко Н. М., Малержик М. П.,
Малержик П. М., Мініч Л. В., Олалі Н. В.
Національний педагогічний університет
імені М. П. Драгоманова (м. Київ, Україна)*

ФІЗИКО МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕЛІНІЙНО ПРУЖНИХ МІКРО- І НАНОКОМПОЗИТІВ З ВУГЛЕЦЕВИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ

Отримано комплект фізичних сталей для чотирьох типів волокнистих композитів, матрицею в яких є епоксидна смола з добавками полістирола або скла. Наповнювачем були вуглецеві мікрОВОлокна, графітові мікрОВОлоса, вуглецеві зигзагоподібні та хіральні нанотрубки з об'ємним вмістом від 1 до 30%. Прокоментовано отримані значення фізичних сталей.

Ключеві слова: *волокнисті композити, мікро-, наноккомпозити, вуглецеві мікрОВОлокна, хіральні нанотрубки, мікрОВОлокна, полістирол.*

За останні роки поява нових об'єктів, які досліджуються в нанофізиці та нанохімії привернула увагу до них тієї частини вчених-механіків, що працюють в напрямку досліджень багатофазових середовищ. Значна кількість публікацій в цій галузі присвячена питанням континуального опису різного типу наночастинок (насамперед, вуглецевих нанотрубок) [1]. Одною з перших спроб загального методологічного погляду на механіку матеріалів була здійснена в роботі [2], де розглянуто взаємозв'язок підходів і методів у розділах механіки матеріалів – макромеханіки (10-2 – 10-5), мезомеханіки (10-3 – 10-8), мікромеханіки (10-4 – 10-8), наномеханіки (10-2 – 10-5). Головною об'єднуючою ознакою у виділених розділах є врахування в матеріалі наявності внутрішньої структури, а роздільною ознакою – допустимий діапазон змін характерного розміру неоднорідності у внутрішній структурі матеріалу. При числових розрахунках в роботі [3] використовувалася зсувна модель, а також повна структурна модель другого порядку (лінійна модель суміші), проте, виникає необхідність в розробленні розрахункових моделей для композитів із жорсткою та м'якою характеристикою нелінійного деформування.

У даній публікації в межах основних моделей досліджуються фізико-механічні сталі чотирьох типів композитів. Такі дані отримані з метою побудови таблиць числових значень і будуть використані для вивчення різниці в еволюції початкового профілю трьох типів механічних хвиль при їх поширенні в композитах.

Об'єктом дослідження є волокнисті композити, в яких волокна утворені з вуглецю, а матеріалом матриці є епоксидна смола ЕПОН-828 з наступними властивостями: густина

$\rho = 1,21 \cdot 10^3$ кг/м³, модуль Юнга $E = 2,65$ ГПа, модуль зсуву $G = 0,96$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,40$.

Наповнювачі: №1 – промислове вуглецеве мікрволокно з середнім діаметром 8 мікрон, густиною $\rho = 1,75 \cdot 10^3$ кг/м³, модулем Юнга $E = 228$ ГПа, модулем зсуву $G = 88$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,30$;

№2 – графітові вуса із середнім діаметром 1 мікрон, густиною $\rho = 1,25 \cdot 10^3$ кг/м³, модулем Юнга $E = 1,0$ ТПа, модулем зсуву $G = 385$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,30$;

№3 – зигзагоподібні вуглецеві нанотрубки із середнім діаметром трубки 10 нм, густиною $\rho = 1,33 \cdot 10^3$ кг/м³, модулем Юнга $E = 0,648$ ТПа, модулем зсуву $G = 221$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,33$;

№4 – хіральні вуглецеві нанотрубки із середнім діаметром трубки 10 нм, густиною $\rho = 1,40 \cdot 10^3$ кг/м³, модулем Юнга $E = 1,24$ ТПа, модулем зсуву $G = 477$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,30$;

Композити з нелінійно деформівною матрицею, основу якої, у випадку отримання матеріалу з м'якою характеристикою нелінійності, становила суміш смоли ЕПОН-828 і полістирола. Полістирол є продуктом полімеризації стирула $[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$ [4] і має відповідні властивості в рамках нелінійної моделі Мурнагана [5]. Густина полістирола $\rho = 9,95 \cdot 10^2$ кг/м³, $E = 2,56$ ГПа, модуль зсуву $G = 1,14$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,30$; пружні модулі третього порядку (сталі Мурнагана) – $A = -10,8$ ГПа; $B = -7,85$ ГПа; $C = -9,81$ ГПа. Як матеріал з жорсткою характеристикою нелінійності був взятий матеріал в якому основу матриці складала суміш епоксидної смоли і скла – (пірекс). Фізичні властивості скла $\rho = 1,05 \cdot 10^3$ кг/м³, пружні модулі другого порядку: модуль Юнга $E = 2,56$ ГПа, модуль зсуву $G = 1,14$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,30$; пружні модулі третього порядку (сталі Мурнагана) – $A = -10,8$ ГПа; $B = -7,85$ ГПа; $C = -9,81$ ГПа.

Властивості сумішей смола – полістирол і смола – скло обчислювалися за правилом Ройса – Фойгта.

Наведені дані про матрицю і волокна використовувалися для обчислення фізичних констант у моделях, які суттєво відрізняються між собою, а деякі з таких моделей взагалі не мають спільних фізичних сталих.

В загальному випадку досліджувані нами волокнисті композити будемо вважати трансверсально-ізотропним континуумом з квадратично пружно нелінійним потенціалом Мурнагана [5]. Композит успадкує таку нелінійність від ізотропної нелінійності матриці, яка містить в собі нелінійно деформівний полістирол. Використаємо потенціал Мурнагана модифікований для трансверсальної ізотропії, у відповідності з яким константи третього порядку у напрямку вздовж і поперек волокна будуть різні

$$W(\varepsilon_{ik}) = -C_{ikik}(1 - \delta_{ik})(\varepsilon_{ik})^2 + \frac{C_{iimm}\varepsilon_{mm}^2}{2} + \frac{A_i\varepsilon_{ik}\varepsilon_{ik}\varepsilon_{ik}}{3} + B_i\varepsilon_{ik}^2\varepsilon_{ik} + \frac{C_i\varepsilon_{ii}^3}{3};$$

$$C_{1111} = C_{2222}, \quad C_{2233} = C_{1313}, \quad C_{1313} = C_{2323}, \quad C_{1212} = \frac{C_{1111} - C_{1122}}{2},$$

$$A_1 = A_2, \quad B_1 = B_2, \quad C_1 = C_2.$$

Розглядуваний нами пружний континуум має одну вісь симетрії і перпендикулярну до неї площину ізотропії, тому в лінійному випадку характеризується матрицею пружних сталих з п'ятьма незалежними сталими $C_{1111}, C_{3333}, C_{4444}, C_{1313}, C_{2211}$. Ці константи використовуються переважно при аналізі хвиль.

Нехай плоскі пружні хвилі поширюються вздовж вісі симетрії, то можливі два типи поляризації і можливі два типи хвиль: поздовжня хвиля з фазовою швидкістю

$V_{ph} = \sqrt{(C_{3333} / \rho)}$ та поперечна хвиля з поляризацією у площині ізотропії (з поляризацією вздовж вісі абсцис), фазова швидкість у якій $V_{ph} = \sqrt{(C_{1313} / \rho)}$.

Якщо хвилі поширюються перпендикулярно вісі симетрії, то можливі три типи поляризації і три типи хвиль: поздовжня хвиля з фазовою швидкістю $V_{ph} = \sqrt{(C_{1111} / \rho)}$, поперечна хвиля з поляризацією у напрямку симетрії і фазовою швидкістю $V_{ph} = \sqrt{(C_{4444} / \rho)}$; поперечна хвиля з поляризацією у напрямку, що утворює праву трійку з двома першими напрямками поляризації (віссю ординат) і поширюється з фазовою швидкістю $V_{ph} = \sqrt{\frac{C_{1111} - C_{2211}}{2\rho}}$.

Для обчислення сталих були використані аналітичні формули для макроскопічних (ефективних) сталих односкерованих волокнистих композитів [3], які добре узгоджуються з експериментальними результатами для волокнистих мікрокомпозитів [6],

$$E = c_m E_m + c_f E_f + \frac{4\mu_m c_m c_f (v_f - v_m)^2}{[1 - c_f(1 - 2v_m)] + c_m(1 - 2v_m)(\mu_m / \mu_f)};$$

$$G = \mu_m \frac{1 + c_f + c_m(\mu_m / \mu_f)}{c_m + (1 + c_f)(\mu_m / \mu_f)};$$

$$v = v_m - \frac{2(1 - v_m)c_f(v_m - v_f)}{[1 + c_f(1 - 2v_m)] + c_m(1 - 2v_f)(\mu_m / \mu_f)};$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{v^2}{E} + \frac{1 - 2v^2}{4\mu_m} \frac{c_m + (1 - 2v_f)(\mu_m / \mu_f)}{1 - c_f(1 - 2v_m) + c_m(1 - 2v_f)(\mu_m / \mu_f)}$$

$$G = \mu_m \frac{(3 - 4v_m) + c_f + c_m(\mu_m / \mu_f)}{(3 - 4v_m)c_m + [1 + (3 - 4v_m)c_f](\mu_m / \mu_f)};$$

де допущено, що матриця і волокна ізотропні, і через $E_m, E_f, \mu_m, \mu_f, v_m, v_f$ позначені модулі Юнга, модулі зсуву (Ляме), коефіцієнти Пуассона матриці та волокна.

Далі обчислюємо значення ефективної густини реф, ефективних модулів E, E', G, G', v, v' (поздовжнього і поперечного розтягу, поздовжнього і поперечного зсуву, коефіцієнти Пуассона при поперечному розтязі і поздовжньому зсуву) і модулів

$$C_{ef} = E \frac{1 - v^2}{(1 + v')[(1 - v') - 2v(E' / E)]}, A_{ef} = c_m A_m, B_{ef} = c_m B_m, C_{ef} = c_m C_m,$$

для значень об'ємного вмісту всіх чотирьох типів волокна $c_f = 0,10$ – мікрволокон (мкв), мікрвоусів (мквс), зигзагоподібних нанотрубок (Z – NT), хіральных нанотрубок (C – NT).

Таблиця 1

стала	мкв	мквс	Z – NT	C – NT
$\rho_{ef} 10^3 \text{ кг/м}^3$	1,25	1,30	1,21	1,22
$E \text{ ГПа}$	25,25	102,5	67,30	126,5

стала	МКВ	МКВС	Z – NT	C – NT
E' ГПа	3,730	3,800	3,730	3,810
G	1,210	1,215	1,217	1,218
G'	1,155	1,158	1,158	1,58
ν	0,38	0,38	0,38	0,38
ν'	0,58	0,64	0,60	0,64
C_{ef}	35,75	152,00	95,25	188,4
A_{ef}	-0,97	-0,97	-0,97	-0,97
B_{ef}	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70
C_{ef}	-0,88	-0,88	-0,88	-0,88

В таблиці 2 наведені значення ефективних пружних сталих Мурнагана для матриці із суміші смола – полістирол і 4 типів волокон, а також для матриці із суміші смола – пірекс і 4 типи волокон.

Таблиця 2

Композит	Об'ємний вміст волокон, %	Пружні сталі Мурнагана		
		A, ГПа	B, ГПа	C, ГПа
Смола – полістирол волокна № 1 – № 4	1	-1,07	-0,78	-0,97
	10	-0,97	-0,71	-0,88
	20	-0,86	-0,63	-0,76
	30	-0,76	-0,55	-0,69
Смола – скло волокна № 1 – № 4	1	12,28	-25,00	34,65
	10	11,15	-22,70	31,50
	20	9,90	-20,18	28,00
	30	8,70	-17,70	24,50

Аналіз даних таблиці 1 показує, що помітно виділяються два факти. Так як модулі Юнга волокон вищі на декілька порядків від модуля Юнга матриці, то технічна стала E , також, перевищує решту технічних сталих (E' , G , G').

Коефіцієнти Пуассона ν' перевищують відоме в ізотропній теорії пружності граничне значення 0,5. Очевидно, що для цих коефіцієнтів в трансвесально-ізотропних матеріалах виконуються уже не всі обмеження відомі з ізотропної теорії.

Особливістю даних таблиці 2 є те, що спостерігається залежність обчислених значень від нелінійних властивостей матриці і відсутність впливу на пружні сталі Мурнагана типу волокна. Можна припустити, що вуглецеві волокна не проявляють нелінійних властивостей пружного деформування. Помітна залежність пружних сталих від об'ємного вмісту волокон має лінійний характер, а причиною цього є спрощене правило обчислення і усереднення властивостей матриці, як суміші двох матеріалів.

Використана література:

1. Gao X.–L. Finite deformation continuum model for singlled carbon nanotubus / X.–L. Gao // Int. J. Solids and Structures. – 2003. – 40. – P. 7329–7337.
2. Гузь А. Н. Наноматеріали. О механіке наноматеріалов / А. Н. Гузь, Я. Я. Руцицкий // Прикл. механіка. – 2003. – 39, № 1. – С. 36–69.
3. Ванін Г. А. Микромеханіка композиційних матеріалов / Г. А. Ванін. – К. : Наук. думка, 1985. – 304 с.
4. Справочник по композиційним матеріалам. В 2-х книгах / под ред. Дж. Любіна. – М. : Машиностроение, 1988. – 447 с. – 580 с.
5. Murnaghan F. D. Finite deformation on elastic solids, 4. / F. D. Murnaghan. – N. –Y., 1951.

6. Малежик М. П. Оптично-чутливі матеріали для моделювання хвильових напружень в анізотропних тілах / М. П. Малежик // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 1. – С. 99–103.

References:

1. Gao X.–L. Finite deformation continuum model for singlled carbon nanotubus / X.–L. Gao // Int. J. Solids and Structures. – 2003. – 40. – P. 7329–7337.
2. Guz A. N. Nanomaterialy. O mehanike nanomaterialov / A. N. Guz // Prikl. Mehanika. – 2003. – 39, № 1. – S. 36-69.
3. Vanin G. A. Mikromehanika kompozitsyonnyh materialov / G. A. Vanin. – K. : Nauk. Dumka, 1985. – 304 s.
4. Spravochnik po kompozitsyonnym materialam. V 2-h knigah. Pod red. G. Lubina. – M. : Mashinostroenie, 1988. – 447 s. – 580 s.
5. Murnaghan F. D. Finite deformation on elastic solids, 4 / Murnaghan F. D. – N.–Y., 1951.
6. Malezhyk M. P. Optichno–chutlyvi materialy dlya modeluvania hvyli napryzhen v anizotropnyh tilah / M. P. Malezhyk // Fiz. him. mehanika materialiv. – 2004. – № 1. – S. 99-103.

Зазимко Н. М., Малежик М. П., Малежик П. М., Мініч Л. В., Олалі Н. В. Фізико-механические свойства нелинейно упругих микро- и нанокмполитов с углеродными наполнителями.

Получено комплект физических постоянных для четырёх типов волоконных композитов, матрицей которых есть эпоксидная смола с добавками полистирола или стекла. Наполнителем были углеродные микроволокна, графитовые микроусы, углеродные зигзагоподобные и хоральные микротрубки с объёмным содержанием от 1 до 30%.

Для нахождения постоянных были использованы аналитические формулы для макроскопических постоянных волокнистых композитов [3], которые согласуются с экспериментальными результатами для волокнистых микрокомполитов. Прокомментировано полученные результаты.

Анализ данных показывает, что заметно выделяются два факта: модули Юнга волокон выше на несколько порядков от модуля Юнга матрицы, техническая постоянная, также, превышает остальные технические постоянные.

Предложено таблицы особенностью, которых есть то, что наблюдается зависимость вычисленных данных от нелинейных характеристик матрицы и отсутствия влияния на упругие постоянные Мурнаганна типу волокна. Можно припустить, что углеродные волокна не проявляют нелинейных свойств упругой деформации. Заметна зависимость упругих постоянных от объёмного содержания волокон имеет линейный характер, а причиной этого есть упрощенное правило нахождения и усреднения свойств матрицы, как смеси двух материалов.

Ключевые слова: волокнистые композиты, микро-, нанокмполиты, углеродные микроволокна, хоральные нанотрубки, микроволокна, полистирол.

Annotation

It is received the complete set of physical constants for four types of fiber composites which matrix is epoxy pitch with additives of polystyrene or glass. To fill there were carbon microfibrres, graphite micromoustaches, carbon a zigzag choral microtubes similar that with the volumetric maintenance from 1 up to 30%. It is commented the received results.

Keywords: fibred compos, nanocompos, chorale nanotubes.