

В. А. Декрет

Про дослідження стійкості композитних матеріалів, армованих нанотрубками

(Представлено академіком НАН України О. М. Гузем)

Розглянуто модель “волокон нескінченної довжини” та модель “волокон скінченних розмірів” для дослідження стійкості композитних матеріалів, армованих нанотрубками. Проведено порівняльний аналіз двох моделей у тривимірній теорії стійкості композитних матеріалів. Результати аналізу одержані в рамках тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл.

На сьогодні значний інтерес становить дослідження композитних матеріалів, армованих нанотрубками, що мають більші значення модуля пружності, високу міцність при деформаціях. Одним з основних механізмів руйнування під дією стискуючого навантаження однонаправлених волокнистих композитів, до класу яких можна віднести композитні матеріали, армовані нанотрубками, є втрата стійкості наповнювача в структурі матеріалу. Для побудови теорії руйнування нанокомпозитів при стисканні в роботі [1] запропоновано моделювати нанотрубки нескінченно довгими циліндрами кругового поперечного перерізу (модель “нескінченно довгих волокон”). Переважна кількість результатів в цьому напрямі одержана в рамках моделі “нескінченно довгих волокон”, коли аналізуються періодичні (вздовж довжини) форми втрати стійкості. Однак при подальших дослідженнях, результати яких наведено в роботі [2], було встановлено, що для порівняно коротких волокон значення критичних деформацій, отримані із застосуванням моделі “нескінченно довгих волокон”, істотно відрізняються від результатів, одержаних із застосуванням моделі “волокон скінченних розмірів”, коли матриця вважається нескінченною, а наповнювач моделюється циліндричним волокном скінченних розмірів (рис. 1).

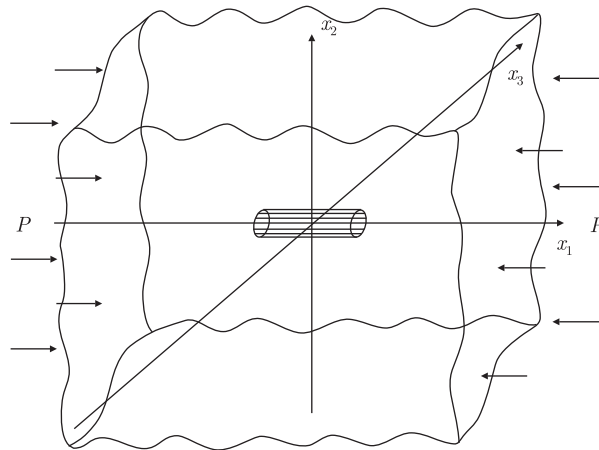


Рис. 1

Слід відзначити, що моделі “нескінченно довгих волокон” та “волокон скінченних розмірів”, а також отримані на їх основі результати повинні бути узгоджені між собою. В зв’язку з цим необхідно визначити інтервал зміни геометричного параметра, що характеризує “скінченність” волокна. Таким параметром може бути величина LD^{-1} , відношення довжини волокна L до його діаметра D . Деяку інформацію про межі зміни параметра LD^{-1} можна одержати із класифікації композитних матеріалів, запропонованої в численних публікаціях; нижче скористаємося відомостями, викладеними в [3]. Так, під шаруватими композитними матеріалами розуміють композитні матеріали, в яких геометричні розміри армуючих елементів в одному із напрямів значно (на кілька порядків) менші, ніж геометричні розміри в двох інших взаємно перпендикулярних напрямках. Під волокнистими композитними матеріалами розуміють композитні матеріали, в яких геометричні розміри армуючих елементів в двох взаємно перпендикулярних напрямках мають один і той же порядок і є значно (на кілька порядків) меншими за геометричні розміри в третьому взаємно перпендикулярному напрямі. Під зернистими композитними матеріалами розуміють композитні матеріали, в яких геометричні розміри армуючих елементів в трьох взаємно перпендикулярних напрямках є величинами одного порядку.

З цього випливає, що при дослідженні втрати стійкості наповнювача в структурі композитних матеріалів, армованих нанотрубками, в рамках моделі “волокон скінченних розмірів” нижню границю для параметра LD^{-1} можна вибрати таким чином:

$$LD^{-1} \geq 10. \quad (1)$$

При істотно меншому значенні LD^{-1} порівняно з (1) у відповідності з наведеною класифікацією можна вважати переходом до моделі зернистих композитних матеріалів.

В публікаціях щодо нанокомпозитів [2–7] та в ряді інших робіт проведено аналіз геометричних розмірів одношарових вуглецевих нанотрбок (SWCNT) та багатошарових вуглецевих нанотрбок (MWCNT), що можна розглядати як потенційні наповнювачі нанокомпозитів. Зокрема, в [2] відзначено публікації, де розглядаються одношарові, двошарові, тришарові та чотиришарові CNT з геометричними параметрами $LD^{-1} = 9,1$.

Таким чином, можна вважати, що із прийнятої класифікації композитних матеріалів (шаруваті, волокнисті, зернисті) та із існуючих прикладів сучасних вуглецевих нанотрбок для моделі “волокон скінченних розмірів” відносно визначення нижньої границі для геометричного параметра LD^{-1} можна прийняти вираз (1).

Розглянемо відомості, які відносяться до вибору верхньої границі для геометричного параметра LD^{-1} стосовно моделі “волокон скінченних розмірів”. Для визначення верхньої границі геометричного параметра LD^{-1} , що забезпечує проведення порівняльного аналізу результатів для моделей “нескінченно довгих волокон” та “волокон скінченних розмірів”, можна виходити із таких двох типів міркувань.

По-перше, можна виходити із міркувань, що впливають із визначення двох моделей та класифікації композитних матеріалів. В цьому випадку прийнята верхня границя для геометричного параметра LD^{-1} повинна бути такою, щоб забезпечувався асимптотичний перехід від моделі “волокон скінченних розмірів” до моделі “нескінченно довгих волокон”; ця ситуація відповідає узгодженню результатів за двома моделями. В цьому випадку умовно для верхньої границі можна прийняти

$$LD^{-1} \leq k \cdot 1000, \quad (2)$$

де значення k слід підбирати залежно від конкретних композитних матеріалів, що розглядаються.

По-друге, можна виходити із характерних значень геометричного параметра LD^{-1} , які відповідають різним конструкційним композитним матеріалам; в цьому випадку можна також перевірити реалістичність умов типу (2).

При такому підході розглянемо наноккомпозити, які утворені шляхом армування матриці волокнами у вигляді різних наноутворень із використанням вуглецевих нанотрубок CNT. В роботах [2–7] аналізуються публікації щодо наноматеріалів та наводяться дані стосовно геометричних розмірів наноутворень, що можуть бути використані як наповнювачі в наноккомпозитах:

багатошарові вуглецеві нанотрубки (MWCNT), одержані методом хімічного охолодження із парів

$$D < 50 \text{ нм}; \quad L > 1000 \text{ нм}; \quad LD^{-1} > 200; \quad (3)$$

ансамблі із CNT

$$D = (30\text{--}50) \text{ нм}; \quad L > 50000 \text{ нм}; \quad LD^{-1} \geq 1000; \quad (4)$$

наномотузки

$$D = (10\text{--}20) \text{ нм}; \quad L > 100000 \text{ нм}; \quad LD^{-1} > 5000; \quad (5)$$

чашкоподібно укладені вуглецеві нановолокна (CSNF, cup-stacked type carbon nano-fibers)

$$D = (80\text{--}100) \text{ нм}; \quad L = (500\text{--}1000; 2500\text{--}10000; 200000) \text{ нм}; \quad LD^{-1} \leq 2500. \quad (6)$$

Дані про геометричний параметр LD^{-1} у вигляді (3)–(6), які відносяться до різних наноутворень, що можуть бути використані для зміцнення матриці нановолокнами, свідчать про те, що умова типу (2) для визначення верхньої границі в моделі “волокон скінченних розмірів” також може бути використана для наноккомпозитів при виборі величини k в (2) у вигляді $0,5 < k \leq 5,0$.

Таким чином, із вищенаведеного аналізу випливає, що вираз типу (2) стосовно наноккомпозитів при оцінці верхньої границі (для геометричного параметра LD^{-1}) прийнятний для порівняльного аналізу результатів, одержаних для волокнистих композитів в задачах стійкості у випадку моделей “нескінченно довгих волокон” та “волокон скінченних розмірів”.

Постановка задач у рамках моделі “волокон скінченних розмірів” розглядалася в роботах [9–14] для випадків одного та двох волокон скінченних розмірів, а також періодичного ряду однакових волокон скінченних розмірів. Дослідження стійкості виконується із застосуванням статичного методу тривимірної лінеаризованої теорії стійкості, коли початковий стан визначається із рівнянь лінійної теорії пружності. При цьому композитний матеріал моделюється кусково-однорідним середовищем, коли матеріал в межах компонента композита вважається однорідним та виконуються контактні умови на межі компонентів. Компоненти композита вважаються лінійно пружними та ізотропними. Отже, із застосуванням моделі “волокон скінченних розмірів” в рамках плоскої задачі в площині x_1Ox_2 при одноосьовому стисканні вздовж осі Ox_1 отримуємо ситуацію, наведену на рис. 2, де штриховою лінією виділено прямокутник з розмірами l_1 вздовж осі Ox_1 та l_2 — вздовж осі Ox_2 . Вказаний прямокутник використовується при чисельному методі розв’язання задач; при цьому розміри

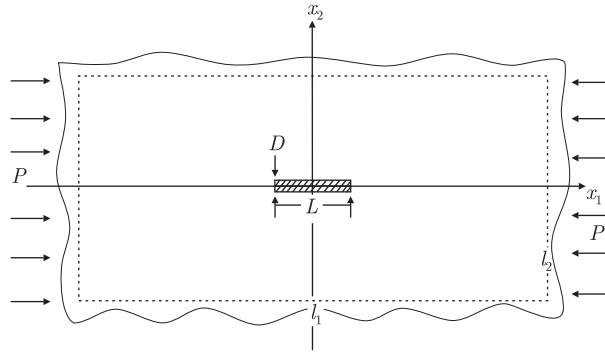


Рис. 2

прямокутника збільшуються при обчислювальному експерименті до таких значень, коли подальше збільшення істотно не впливає на величину критичної деформації у відповідності з методами робіт [9–14] та ряду інших публікацій.

Розглянемо результати дослідження стійкості для нанокомпозитів з полімерною матрицею з модулем Юнга $E_m = 2,68$ ГПа та коефіцієнтом Пуассона $\nu_m = 0,4$. Для вибору значень параметра $E_a E_m^{-1}$, характерних для нанокомпозитів з полімерною матрицею, скористаємося відомостями про властивості нановолокон, наведеними в роботах [2–7]. Так в [2], обмежуючись аналізом властивостей багатошарових та одношарових вуглецевих нанотрубок (MWCNT, SWCNT), автори радять при обчисленнях застосовувати властивості “середніх” CNT, для модуля Юнга яких запропоновано значення $E_m \approx (1,0–1,2)$ ТПа. Враховуючи властивості вибраної полімерної матриці, для “середніх” CNT отримуємо оцінку параметра $E_a E_m^{-1}$ у вигляді: $373 \leq E_a E_m^{-1} \leq 448$.

Наведемо результати для нанокомпозитів з полімерною матрицею для більш широкого набору значень параметра $E_a E_m^{-1}$ у вигляді

$$E_a E_m^{-1} = 285; 373; 448; 500; 1000. \quad (7)$$

Останні два значення параметра $E_a E_m^{-1}$ в (7) відповідають ситуаціям, які можуть виникати в технологічних процесах створення нанокомпозитів, що пов’язані з суттєвою залежністю властивостей полімерної матриці від температури.

Згідно з вищенаведеними міркуваннями, порівняльний аналіз проведемо для інтервалу зміни геометричного параметра LD^{-1} , що визначається нижньою границею (1) та верхньою границею типу виразу (2), при $0,5 < k \leq 5,0$; покажемо, що при даному моделюванні досить провести порівняння в інтервалі

$$10 \leq LD^{-1} \leq 2310. \quad (8)$$

Результати обчислень в інтервалі (8) зміни параметра LD^{-1} у вигляді залежності величини $|\varepsilon_{11}^{крa}|$ ($\varepsilon_{11}^{крa}$ відповідає критичному значенню деформації вздовж осі Ox_1 в середній точці армуючого елемента (волокна) при $x_1 = 0$ та $x_2 = 0$) від геометричного параметра LD^{-1} наведені на рис. 3, де штриховими лініями зображені результати, що відносяться до моделі “нескінченно довгих волокон”, суцільними лініями — результати щодо моделі “волокон скінченних розмірів”.

Відзначимо, що на рис. 3 подано результати тільки для значень параметра $E_a E_m^{-1} = 373; 448; 1000$, оскільки при $E_a E_m^{-1} = 285; 500$ вони мають аналогічний характер.

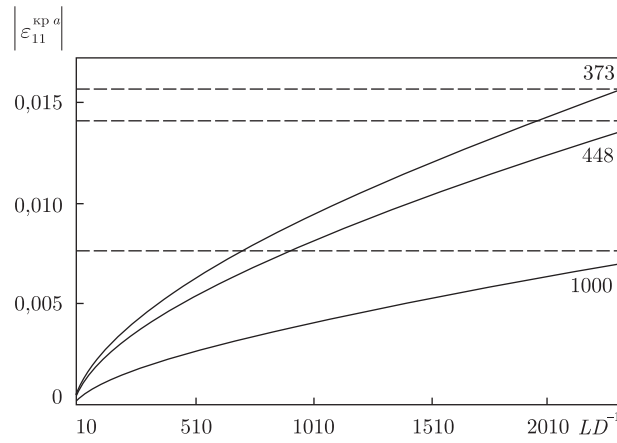


Рис. 3

З рис. 3 випливає, що для вказаних значень параметра $E_a E_m^{-1}$ при збільшенні геометричного параметра LD^{-1} в інтервалі (8) критичні значення деформацій вздовж осі Ox_1 (рис. 2), обчислені в рамках моделі “волокон скінченних розмірів”, асимптотично прямують до критичних значень вказаних деформацій, обчислених в рамках моделі “нескінченно довгих волокон”. При наближенні геометричного параметра LD^{-1} до значення $LD^{-1} = 2310$, що відповідає верхній границі інтервалу (8), критичні значення вказаних деформацій, обчислені в рамках моделей “волокон скінченних розмірів” та “нескінченно довгих волокон”, практично збігаються.

Таким чином, для порівняно коротких волокон одержано істотні відмінності критичних значень деформацій вздовж осі Ox_1 , обчислених в рамках моделей “волокон скінченних розмірів” та “нескінченно довгих волокон”. Крім того, відзначимо, що всі результати для нанокompозитів з полімерною матрицею, отримані в рамках моделей “волокон скінченних розмірів” та “нескінченно довгих волокон”, є узгодженими, а також значення верхньої границі в (8) виявилось достатнім, щоб довести вищенаведене твердження.

1. Guz A. N., Roger A. A., Guz I. A. Developing a compressive failure theory of nanocomposites // Int. Appl. Mech. – 2005. – 41, No 3. – P. 233–255.
2. Guz A. N., Dekret V. A. On two models in the three-dimensional theory of stability of composite materials // Ibid. – 2008. – 44, No 8. – P. 839–854.
3. Guz A. N. Three-dimensional theory of stability of a carbon nanotube in a matrix // Ibid. – 2006. – 42, No 1. – P. 19–31.
4. Guz A. N., Guz I. A. On models in the theory of stability of multi-walled carbon nanotubes // Ibid. – 2006. – 42, No 6. – P. 617–628.
5. Guz A. N., Rushchitsky J. J. Nanomaterials. On mechanics of nanomaterials // Ibid. – 2003. – 39, No 11. – P. 1271–1293.
6. Guz A. N., Rushchitsky J. J., Guz I. A. Establishing fundamentals of the mechanics of nanocomposites // Ibid. – 2007. – 43, No 3. – P. 247–271.
7. Guz I. A., Roger A. A., Guz A. N., Rushchitsky J. J. Developing the mechanical models for nanomaterials // COMPOSITES: Part A. – 2007. – 38. – P. 1234–1250.
8. *Современные композиционные материалы*: Пер. с англ. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – Москва: Мир, 1970. – 672 с.
9. Guz A. N., Dekret V. A., Kokhanenko Yu. V. Planar stability problem of composite weakly reinforced by short fibers // Mech. of Advanc. Mater. and Struct. – 2005. – No 12. – P. 313–317.
10. Декрет В. А. Розв’язання плоскої задачі стійкості композитного матеріалу, армованого двома короткими волокнами // Доп. НАН України. – 2003. – № 8. – С. 37–40.

11. Декрет В. А. Плоска задача стійкості композита, армованого двома паралельними короткими волокнами // Доп. НАН України. – 2003. – № 12. – С. 38–41.
12. Dekret V. A. Plane instability for a composite reinforced with a periodic row of short serial fibers // Int. Appl. Mech. – 2006. – **42**, No 6. – P. 90–100.
13. Dekret V. A. Plane instability for a composite reinforced with a periodic row of short parallel fibers // Ibid. – 2008. – **44**, No 5. – P. 498–504.

Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка
НАН України, Київ

Надійшло до редакції 18.03.2009

V. A. Dekret

On the research of the stability of composite materials reinforced by nanotubes

The models of “infinite fibers” and “short fibers” in the three-dimensional theory of the stability of nanotube reinforced composite materials are discussed. All results are obtained in the framework of the three-dimensional linearized theory of the stability of deformable bodies.