

М. П. Семенюк, Н. Б. Жукова, Н. І. Іванова

Про моделювання недосконалого контакту фаз при розрахунку ефективних механічних характеристик нанокompозитів

(Представлено членом-кореспондентом НАН України І. С. Чернишенком)

Запропоновано наближений підхід для визначення ефективних характеристик нанокompозитів при наявності часткової взаємодії між фазами. В основу розрахунків покладено відомі методи мікромеханіки композитів. Досліджено залежність механічних характеристик нанокompозитів від об'ємного вмісту наповнювача та розміру області несучільного контакту.

У роботах [1–3] виконано аналіз проблем механіки композитів, які створюються за допомогою технології “bottom-up”, починаючи з атомів та молекул у вигляді нанотрубок, нановолокон, нанопластинок та інших нанорозмірних елементів і полімерної (або металічної) матриці. З цього аналізу випливає, що дуже важливою є проблема моделювання взаємодії фаз нанокompозита в зоні контакту компонентів. У зв'язку з практичною неможливістю врахування всіх факторів, якими супроводжується деформування міжфазного шару, автори [1, 2] пропонують використати продуктивний в механіці конструкцій підхід, коли застосовуються спрощення без втрати суті задачі. В даному випадку таким спрощенням є двостороння оцінка впливу взаємодії фаз, де в першому варіанті розглядається бездефектний контакт компонентів, а в другому — контакт з проковзуванням по геометричній поверхні, що розділяє фази [4].

Нижче наводиться наближений підхід до розрахунку ефективних характеристик нанокompозитів при наявності часткової взаємодії між фазами (рис. 1, а, б). Включення в роз-

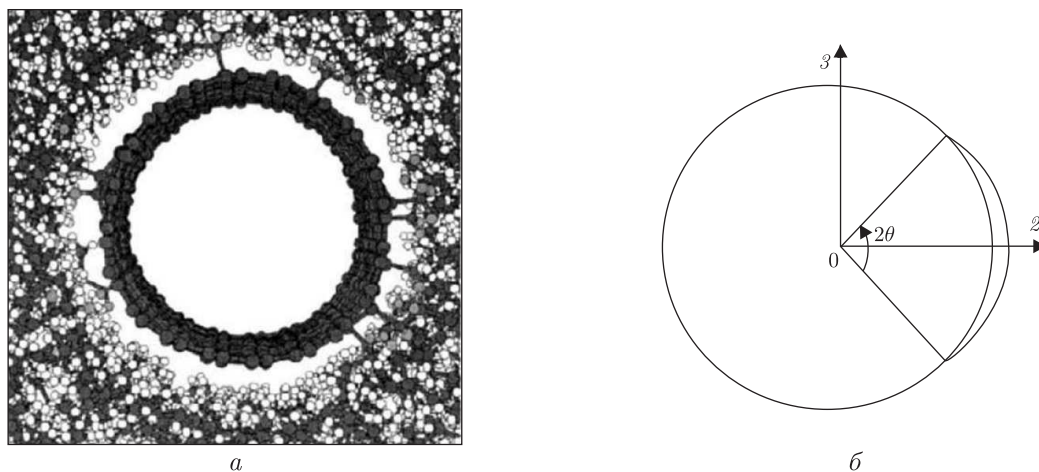


Рис. 1

рахункову модель параметра, що характеризує розмір області недосконалого контакту фаз, розширює можливості континуальної моделі деформування наноккомпозитів.

Механічні властивості композитів з недосконалим контактом фаз. Розглядається матеріал, що складається з паралельних циліндричних включень, які в континуальному наближенні являють собою одношарові частинки (SWNT) і матриці. У роботах [5, 6] отримано аналітичні розв'язки задач статки для волокнистих середовищ з різними періодичними структурами. Однак у формулах першого наближення ефекти, що зумовлені особливостями розташування волокон у поперечному перетині елементарної комірки, не враховуються. Для врахування нерівномірної щільності дискретних зв'язків між нановолокном і матрицею в континуальній моделі вважаємо, що на міжфазній границі є ділянки розриву суцільності — тріщини, які можуть бути довільно розташовані по периметру волокна, але мають однакову величину. Щоб отримати вирази для наведених характеристик такого матеріалу, використовуємо отриманий в [5] розв'язок для випадку, коли тріщини мають не тільки однакову величину, але і орієнтацію. При постановці задачі у [5] прийнято, що волокнисте середовище однорідне вздовж волокон.

Осі системи координат розташовані так, що вісь 1 збігається з напрямком волокон, вісь 2 перпендикулярна до волокна і ділить тріщину з центральним кутом 2θ навпіл (рис. 1, б), вісь 3 — перпендикулярна до площини, утвореної осями 1 і 2. Волокна і сполучне вважаються ізотропним і пружними з модулями Юнга E_a і E , коефіцієнтами Пуассона ν_a та ν відповідно. Волокнисте середовище з недосконалим контактом подібного виду на макрорівні буде ортотропним з невідомими дев'ятьма незалежними коефіцієнтами. Співвідношення пружності мають для композиту, що розглядається, такий вигляд:

$$\varepsilon = a\sigma, \quad (1)$$

де — $\varepsilon = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, 2\varepsilon_{44}, 2\varepsilon_{55}, 2\varepsilon_{66})$, $\sigma = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{44}, \sigma_{55}, \sigma_{66})$ — вектори, компоненти яких є компонентами тензорів деформацій і напружень; a — матриця шостою порядку з ненульовими коефіцієнтами

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{E_1}, & a_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_2}, & a_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_3}, \\ a_{22} &= \frac{1}{E_2}, & a_{23} &= -\frac{\nu_{23}}{E_3}, & a_{33} &= \frac{1}{E_3}, \\ a_{44} &= \frac{1}{G_{23}}, & a_{55} &= \frac{1}{G_{13}}, & a_{66} &= \frac{1}{G_{23}}, & a_{ij} &= a_{ji}. \end{aligned} \quad (2)$$

При заданих об'ємному вмісті волокон ξ , сполучного $\eta = 1 - \xi$, куті розкриття тріщини 2θ технічні сталі (2) визначаються за допомогою формул [5]:

$$\begin{aligned} E_1 &= \xi E_a + \eta E + \frac{8\xi\eta(\nu_a - \nu)^2 mGG_a}{u_{26}}, \\ \frac{1}{E_2} &= \frac{\nu_{21}^2}{E_1} + \frac{1 + \kappa}{4G} \frac{u_{23} - \xi G_a \Omega(\theta)}{u_{24}(\lambda_1) + u_{25}}, & \frac{1}{E_3} &= \frac{\nu_{31}^2}{E_1} + \frac{1 + \kappa}{4G} \frac{u_{23} - \xi G_a \mu(\theta)}{u_{24}(\lambda_2) + u_{25}}, \\ G_{12} &= G \frac{u_{11} - u_{12}}{u_{22} + u_{12}}, & G_{13} &= G \frac{u_{11} + u_{12}}{u_{22} - u_{12}}, \\ G_{23} &= G \frac{(1 + \kappa)[1 + \xi\chi(\theta)]G_a + \eta(1 + \kappa_a)G}{(1 + \kappa)[1 - \xi\chi(\theta)]G_a + (1 + \kappa_a)(1 + \xi\kappa)G}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{21}\nu_{31}}{E_1} + \frac{1}{2Gu_{24}(\lambda_1)}[(1 + \kappa)G_a + (1 + \kappa_a)(1 + \xi\kappa)G - 0,5\xi(1 + \kappa)G_a(\Omega(\theta) + \kappa(1 + 4\beta^2)\sin^2\theta)],$$

$$\nu_{21} \approx \nu_{31} = \nu + \frac{\xi(1 + \kappa)(\nu_a - \nu)mG_a}{u_{26}},$$

де

$$\kappa = 3 - 4\nu, \quad \chi(\theta) = (\cos\theta - 2\beta\sin\theta)e^{-2\beta(\pi-\theta)} - \frac{\sin^4\theta(1 + 4\beta^2)^2}{4[1 + (\cos\theta + 2\beta\sin\theta)e^{2\beta(\pi-\theta)}]},$$

$$m(1 + e^{2\beta\pi}) = 1 + (\cos\theta - 2\beta\sin\theta)e^{2\beta(\pi-\theta)}, \quad e^{2\beta\pi} = \frac{G + \kappa G_a}{G_a + \kappa_a G},$$

$$u_{11} = (1 + \xi\cos\theta)G_a + \eta G, \quad u_{12} = \frac{1}{2}\xi G_a \sin^2\theta, \quad u_{22} = (1 - \xi\cos\theta)G_a + (1 + \xi)G,$$

$$u_{23} = \kappa G_a + (1 + 2\xi)[G_a + (1 + \kappa_a)G], \quad u_{24}(\lambda_1) = (1 + \kappa)[1 + \eta + \xi\lambda_1(\theta)]G_a,$$

$$u_{25} = 2\eta(1 + \kappa_a)G, \quad u_{26} = \xi(1 + \kappa)mG_a + 2\eta(G_a + \kappa_a G) - \eta(1 + \kappa_a)mG,$$

$$\Omega(\theta) = q + m(1 + e^{2\beta\pi}) + 2\kappa(\cos\theta - 2\beta\sin\theta)e^{-2\beta(\pi-\theta)} - 0,5(1 + 4\beta^2)[\kappa + 2 + \kappa q(1 + e^{2\beta\pi})^{-1}]\sin^2\theta,$$

$$4\lambda_{1,2}(\theta) = 2q + 2m(1 + e^{2\beta\pi}) + 4(\cos\theta - 2\beta\sin\theta)e^{-2\beta(\pi-\theta)} \pm (1 + 4\beta^2)[\xi + q(1 + e^{2\beta\pi})^{-1}]\sin^2\theta,$$

$$\mu(\theta) = q + m(1 + e^{2\beta\pi}) + (1 + 8\beta^2)\sin^2\theta + 2\kappa(\cos\theta - 2\beta\sin\theta)e^{-2\beta(\pi-\theta)} + 0,5(1 + 4\beta^2)[1 + \kappa q(1 + e^{2\beta\pi})^{-1}]\sin^2\theta,$$

$$q = (1 + \kappa)mG \frac{m(1 + e^{2\beta\pi}) - (1 + 4\beta^2)\sin^2\theta}{2(G_a + \kappa_a G) - (1 + \kappa_a)mG}.$$

У виразі $\chi(\theta)$ при $\theta = \pi$ (повне відшарування) у другому доданку знаменник стає рівним нулю. Однак, враховуючи те, що $\sin^4\theta$ при $\theta \rightarrow \pi$ буде малою величиною вищого порядку, другий доданок слід покласти рівним нулю.

Формули (3) отримано для випадку симетричного відносно осей координат розміщення на поверхні волокна областей недосконалого контакту компонентів. Узагальнення цього варіанту формул для розрахунку ефективних характеристик при довільному розміщенні розривів суцільності можна отримати, провівши їх перерахунок відносно системи координат, яка повернута навколо осі 1 на деякий кут α . У новій системі координат армований волокнами матеріал буде мати тільки одну площину пружної симетрії, перпендикулярну до напрямку волокон. Замість співвідношень (1) матимемо

$$\varepsilon' = a'\sigma', \tag{4}$$

де не рівні нулю коефіцієнти матриці a визначаються таким чином:

$$\begin{bmatrix} a'_{11} \\ a'_{12} \\ a'_{13} \\ a'_{14} \\ a'_{22} \\ a'_{23} \\ a'_{24} \\ a'_{33} \\ a'_{34} \\ a'_{44} \\ a'_{55} \\ a'_{56} \\ a'_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & u_2 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & -u_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -u_2 & 0 & 0 \\ u_3 & u_4 & 0 & u_5 & 0 \\ u_6 & 0 & 0 & u_5 & 0 \\ 0 & 0 & -u_4 & 0 & -2u_5 \\ u_3 & -u_4 & 0 & u_5 & 0 \\ 0 & 0 & -u_4 & 0 & 2u_5 \\ u_7 & 0 & 0 & -u_5 & 0 \\ u_8 & u_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_9 & 0 & 0 \\ u_8 & -u_9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha \\ \cos 4\alpha \\ \sin 4\alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Константи u_i , що використовуються в (5), знаходяться за допомогою виразів:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{1}{2}(a_{12} + a_{13}), & u_2 &= \frac{1}{2}(a_{12} - a_{13}), & u_3 &= \frac{1}{8}(3a_{22} + 2a_{23} + 3a_{33} + a_{44}), \\ u_4 &= \frac{1}{2}(a_{22} - a_{33}), & u_5 &= \frac{1}{8}(a_{22} - 2a_{23} + a_{33} - a_{44}), \\ u_6 &= \frac{1}{8}(a_{22} + 6a_{23} + a_{33} - a_{44}), & u_7 &= \frac{1}{2}(a_{22} - 2a_{23} + a_{33} + a_{44}), \\ u_8 &= \frac{1}{2}(a_{55} + a_{66}), & u_9 &= \frac{1}{2}(a_{55} - a_{66}). \end{aligned} \quad (6)$$

Відзначимо, що в [5] також розглянуто випадок довільного розташування тріщин. Частина формул цієї роботи збігаються з наведеними вище, інші мають вигляд, який складно використовувати при розрахунках. У реальних композитах з недосконалим контактом компонентів значення кутів α змінюються від 0 до π . Якщо у представницькому об'ємі матеріалу розподіл значень α стохастично рівномірний по всіх волокнах, що укладені в цей об'єм, то усереднені деформації і напруження не будуть залежати від напрямку осей 2 і 3. Армований матеріал на макрорівні буде трансверсально ізотропним, оскільки площина, що перпендикулярна до волокон, ізотропна. Усереднені значення пружних констант a_{ij} будуть дорівнювати величинам, наведеним у першому стовпці матриці в співвідношенні (5). Серед них всього п'ять незалежних, тому що $a'_{12} = a'_{13}$, $a'_{22} = a'_{33}$, $a'_{55} = a'_{66}$, $a'_{22} - a'_{23} = a'_{44}/2$. Для трансверсально ізотропного тіла співвідношення (1) запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= b_{11}\varepsilon_{11} + b_{12}\varepsilon_{22} + b_{13}\varepsilon_{33}, & \sigma_{22} &= b_{12}\varepsilon_{11} + b_{22}\varepsilon_{22} + b_{23}\varepsilon_{33}, \\ \sigma_{33} &= b_{12}\varepsilon_{11} + b_{23}\varepsilon_{22} + b_{22}\varepsilon_{33}, & \sigma_{23} &= 2b_{44}\varepsilon_{23}, & \sigma_{13} &= 2b_{55}\varepsilon_{13}, & \sigma_{12} &= 2b_{66}\varepsilon_{12}, \end{aligned} \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned}
b_{11} &= \frac{a'_{22} + a'_{23}}{\Delta}, & b_{12} &= -\frac{a'_{12}}{\Delta}, & b_{22} &= \frac{a'_{11}a'_{22} - (a'_{12})^2}{(a'_{22} - a'_{23})\Delta}, \\
b_{23} &= -\frac{a'_{11}a'_{22} - (a'_{12})^2}{(a'_{22} - a'_{23})\Delta}, & \Delta &= a'_{11}a'_{22} + a'_{11}a'_{23} - 2(a'_{12})^2, \\
b_{44} &= \frac{1}{a'_{44}}, & b_{55} &= \frac{1}{a'_{55}}, & b_{66} &= \frac{1}{a'_{66}}, & b_{22} - b_{23} &= 2b_{44}.
\end{aligned} \tag{8}$$

У роботі [7] співвідношення (7) покладені в основу підходу, що дозволяє отримати усереднені характеристики армованого тіла з довільною орієнтацією волокон. При обертанні осі 1, спрямованої вздовж волокон, відносно фіксованої осі x'_i і заданні деформації в напрямку осі 3' встановлено, що середні значення $\sigma'_{ij}/\epsilon'_{33}$ в напрямку волокон знаходяться за допомогою виразів

$$\left. \frac{\sigma'_{33}}{\epsilon'_{33}} \right|_{\text{ср}} = \frac{1}{15}(3b_{11} + 4b_{12} + 8b_{22} + 8b_{66}), \tag{9}$$

$$\left. \frac{\sigma'_{22}}{\epsilon'_{33}} \right|_{\text{ср}} = \frac{1}{15}(b_{11} + 8b_{12} + b_{22} - 8b_{66} + 5b_{23}). \tag{10}$$

Оскільки тіло з довільною орієнтацією волокон на макрорівні є ізотропним, то враховуючи те, що права частина рівняння (9) дорівнює $E(1 - \nu)/((1 + \nu)(1 - 2\nu))$, а (10) дорівнює $\nu E/((1 + \nu)(1 - 2\nu))$, знаходимо

$$\begin{aligned}
E &= \frac{(2b_{11} + 7b_{22} - 5b_{23} - 4b_{12} + 12b_{66})(b_{11} + 2b_{22} + 2b_{23} + 4b_{12})}{D}, \\
\nu &= \frac{3(b_{11} + b_{22} + 5b_{23} + 8b_{12} - 4b_{66})}{D}, \\
D &= 3(4b_{11} + 9b_{22} + 5b_{23} + 12b_{12} + 4b_{66}).
\end{aligned} \tag{11}$$

Подібний розв'язок одержано в [7] для ізотропного середовища, що еквівалентно композиційному, отриманому хаотичним армуванням матриці довгими волокнами. Відмінною особливістю формул (11) є те, що при їх виведенні враховується недосконалий контакт компонентів. Ці формули використовуються також у разі волокон кінцевої довжини. Якщо відношення довжини волокон до діаметра досить велике, то, як впливає з результатів роботи [7], ефектами на кінцях волокон можна знехтувати.

Вплив структури і недосконалого контакту компонентів на механічні властивості композитів, що складаються з полімерної матриці і нанотрубок як наповнювача. Механічні властивості матриці прийемо відповідними епоксидній смолі, для якої модуль пружності $E = 0,315 \cdot 10^{10}$ Па, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,382$ [5]. Значення модуля пружності нанотрубок і коефіцієнта Пуассона можуть змінюватися в широких межах [8]. Використовуючи дані роботи [8], прийемо $E = 1,127$ ТПа, $\nu = 0,19$. Розглянемо два варіанти нанокомпозитів. У першому випадку вважаємо, що довгі нанотрубки розподілені в матриці рівномірно (вид упаковки не враховується) і паралельно до деякого напрямку. Області недосконалого контакту матриці і нанотрубок розподілені так, що на макрорівні композит можна розглядати як трансверсально ізотропне тіло з площиною ізотропії, перпендикулярної до напрямку волокон. У другому варіанті вважаємо, що розподіл трубок

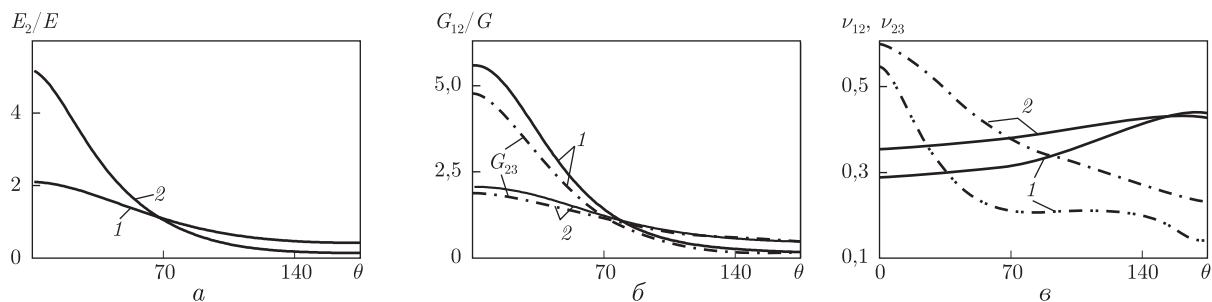


Рис. 2

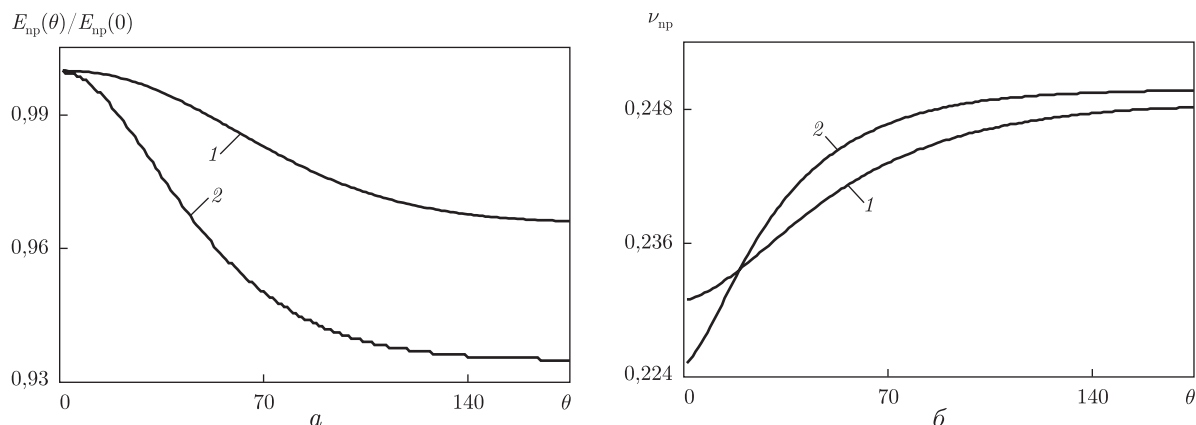


Рис. 3

також рівномірний, але спрямовані вони можуть бути довільно з однаковою ймовірністю відносно осей тривимірної системи координат. На макрорівні такий матеріал буде ізотропним [7]. На рис. 2, 3 у вигляді графіків наведено результати розрахунку характеристик для двох вказаних типів композитів. Криві 1 і 2 на рис. 2, а ілюструють залежність модуля E_2 від величини кута θ при об'ємному вмісті наповнювача $\xi = 0,35$ і $\xi = 0,7$ відповідно. Видно, що при $\xi = 0,7$ модуль E_2 більше, ніж при $\xi = 0,35$, але тільки до $\theta = 67^\circ$. Якщо ж область розриву суцільності стає такою, що $\theta > 67^\circ$, то $E_2|_{\xi=0,7} < E_2|_{\xi=0,35}$. При перетині кривих буде $E_2 = E$ в обох випадках. Такі ж залежності для модулів зсуву G_{12} і G_{23} наведені на рис. 2, б. Суцільні криві 1 і 2 — це функції $G_{12}(\theta)/G$, а штрихпунктирні — $G_{23}(\theta)/G$. Перетин кривих 1 і 2 має місце при $\theta = 78^\circ$, коли $G_{ij} = G$. Якщо ж $\theta > 78^\circ$, то значення обох модулів зсуву стають менше модуля зсуву сполучного, причому більш помітно при $\xi = 0,7$.

Вплив недосконалого контакту компонентів на коефіцієнти Пуассона ν_{21} і ν_{23} показано на рис. 2, в кривими 1 і 2 при $\xi = 0,35$ і $\xi = 0,7$ відповідно. Суцільні криві обчислені для коефіцієнта ν_{21} , штрихпунктирні — для коефіцієнта ν_{23} . Спостерігається зростання коефіцієнта ν_{21} як при $\xi = 0,35$, так і при $\xi = 0,7$, і зменшення коефіцієнта ν_{23} . Оскільки модуль E_1 практично не залежить від величини кута θ (доданок у формулі (3) істотно перевищує всі інші), то внаслідок рівності $\nu_{21}E_2 = \nu_{12}E_1$ незмінним буде також коефіцієнт ν_{12} .

Незначна залежність модуля E_1 від величини кута θ відображується на модулі $E_{пр}$ довільно армованого композиту. На рис. 3, а наведені дані про змінюваність цього модуля при зростанні області недосконалого контакту сполучного і наповнювача. Значення відношення $E_{пр}(\theta)/E_{пр}(0)$ при $\xi = 0,35$ (1) і $\xi = 0,7$ (2) зменшуються зі зростанням кута θ ,

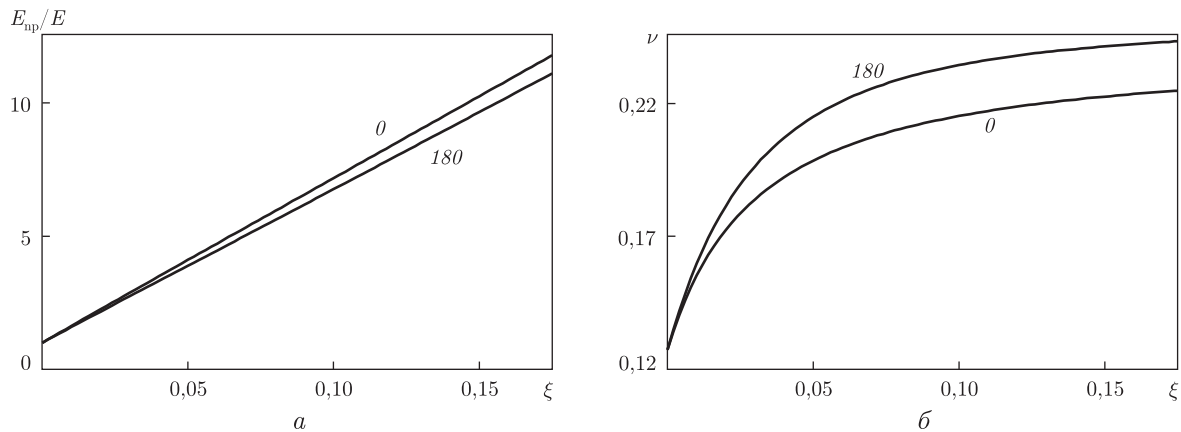


Рис. 4

причому більш помітно при $\xi = 0,7$. Однак в обох випадках це відношення не менше 0,9. При тому ж об'ємному вмісті наповнювача залежності коефіцієнта Пуассона ілюструють криві на рис. 3, б.

Становить інтерес більш детально вивчення залежності характеристик $E_{\text{пр}}$ і $\nu_{\text{пр}}$ при малому об'ємному вмісті нанотрубок і граничних значеннях кута θ . На рис. 4, а наведено графіки залежності $E_{\text{пр}}(\xi)/E$ при $\theta = 0^\circ$ і $\theta = 180^\circ$. Криві 0 і 180 відрізняються незначно. При вмісті наповнювача $\xi = 0,01$ відношення $E_{\text{пр}}(\xi)/E = 1,63$, коли $\theta = 0^\circ$ і $E_{\text{пр}}(\xi)/E = 1,60$, коли $\theta = 180^\circ$. Відповідно при $\xi = 0,02$ отримуємо $E_{\text{пр}}(\xi)/E = 2,25$ і $E_{\text{пр}}(\xi)/E = 2,17$.

Як бачимо, наповнення полімерного сполучного нанотрубками порядку 1–2% від об'єму призводить до збільшення модуля Юнга ізотропного композита в 1,5–2 рази. Це можна використовувати для створення високомодульних зв'язуючих при виробництві композитів, армованих звичайними волокнами або односпрямованими наночастинками. Отриманий результат узгоджується з відомими даними [9]. При довільній орієнтації волокон вплив типу граничних умов на міжфазних поверхнях неістотно позначається на ефективних характеристиках матеріалу. Цей висновок підтверджується також графіками $\nu_{\text{пр}}(\xi)$ при $\theta = 0^\circ$ і $\theta = 180^\circ$, наведеними на рис. 4, б.

Дослідження залежності модулів однонаправленого композита від величини об'ємного вмісту нановолокон ξ показало, що поздовжній модуль практично пропорційний параметру ξ , поперечний модуль і модулі поздовжнього і поперечного зсуву збільшуються з ростом ξ тільки при відсутності або наявності незначних розшарувань на міжфазній границі. Якщо розрив суцільності охоплює більше третини периметра волокна, то збільшення вмісту волокон надає зворотний ефект — вони зменшуються. Довільно армований композит менше реагує на наявність розривів суцільності. Частково цей ефект залежить від розрахункової моделі, що застосовується, згідно з якою волокна сприймають навантаження однакові в будь-якому напрямку.

Одержані результати використані в роботі [10] при розрахунку стійкості циліндричних оболонки, виготовлених з матеріалу з властивостями, що відповідають наведеним на рис. 2–4. Це дало можливість виявити деякі особливості функціонування нанокompозитів в конструкціях вказаного типу.

1. Гузь А. Н., Руцицкий Я. Я. Наноматериалы. О механике наноматериалов // Прикл. механика. – 2003. – 39, № 11. – С. 36–58.

2. Гузь А. Н., Руцицкий Я. Я., Гузь И. А. Введение в механику нанокompозитов. – Киев: Ин-т механики им. С. П. Тимошенко, 2010. – 398 с.
3. Thostenson E. T., Chunya Li, Chou T. W. Nanocomposites in context (review) // Composites Science and Technology. – 2005. – **65**. – P. 491–516.
4. Гузь А. Н., Руцицкий Я. Я., Гузь И. А. О построении основ механики нанокompозитов // Прикл. механика. – 2007. – **43**, № 3. – С. 3–36.
5. Ванин Г. А. Микромеханика композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 304 с.
6. Ванин Г. А., Семенюк Н. П. Устойчивость оболочек из композиционных материалов с несовершенствами. – Киев: Наук. думка, 1987. – 200 с.
7. Кристенсен Р. М. Введение в механику композитов. – Москва: Мир, 1982. – 334 с.
8. Lau K. T., Chong G., Hui D. A critical review on nanotube and nanotube / nanoclay related polymer composite materials // Composites. Part B. – 2006. – **37**. – P. 425–436.
9. Odegard G. V., Gates T. S., Wise K. E. et al. Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites // Composite Science and Technology. – 2003. – **63**. – P. 1671–1687.
10. Семенюк Н. П., Бабич И. Ю., Жукова Н. Б. Влияние неполной адгезии компонентов на механические свойства и устойчивость цилиндрических оболочек из нанокompозитов // Прикл. механика. – 2010. – **46**, № 12. – С. 47–57.

*Институт механіки ім. С. П. Тимошенка
НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 22.04.2013

Н. П. Семенюк, Н. Б. Жукова, Н. И. Иванова

О моделировании несовершенного контакта фаз при расчете эффективных механических характеристик нанокompозитов

Предложен приближенный подход к определению эффективных характеристик нанокompозитов при наличии частичного взаимодействия между фазами. В основу расчетов положены известные методы микромеханики композитов. Исследована зависимость механических характеристик нанокompозитов от объемного содержания наполнителя и размера области несплошного контакта.

N. P. Semenyuk, N. B. Zhukova, N. I. Ivanova

On modeling the imperfect contact of phases at the calculation of effective mechanical characteristics of nanocomposites

An approximate approach to the definition of effective characteristics of nanocomposites in the presence of a partial interaction between phases is proposed. The calculations are based on the known methods of the micromechanics of composites. The dependence of mechanical characteristics of nanocomposites on the volumetric amount of a filler and the size of the incomplete contact area is researched.