

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.06.028>

УДК 539.3

В.М. Бистров, <https://orcid.org/0000-0001-6648-8449>

В.А. Декрет, <https://orcid.org/0000-0001-6590-6426>

В.С. Зеленський, <https://orcid.org/0000-0001-9497-1243>

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

E-mail: numer@inmech.kiev.ua

Приповерхнева втрата стійкості у шаруватому композитному матеріалі при недосконалому контакті між шарами

Представлено академіком НАН України В.М. Назаренком

З використанням основних співвідношень тривимірної лінеаризованої теорії стійкості у рамках моделі кусково-однорідного середовища отримано розв'язок задачі стійкості шаруватого композитного матеріалу при стисканні поверхневим навантаженням вздовж напрямку армування. Розглянуто випадок недосконалого контакту між шарами, який моделюється періодичною системою макротріщин у вигляді математичного розрізу з вільними від напружень берегами. Використана розрахункова модель для граничних умов на бічних сторонах багатошарового зразка з композитного матеріалу, які відповідають умовам симетрії. Досліджено вплив розміру тріщин на згасання форм приповерхневої втрати стійкості та критичні навантаження. Для чисельного розв'язку задачі використано метод сіток на основі модифікованого варіаційно-різницевого підходу. В рамках обчислювального експерименту застосовані послідовні і паралельні алгоритми методів Холецького та ітерування підпростору.

Ключові слова: шаруватий композитний матеріал, поверхнєве навантаження, недосконалий контакт, макротріщина, форма втрати стійкості, критичне навантаження, метод сіток, паралельні обчислення.

Одним із можливих механізмів руйнування односпрямованих композитних матеріалів (КМ) при стисканні вздовж напрямку армування є втрата стійкості армуючих шарів і волокон [1]. При стисканні односпрямованих КМ поверхневим навантаженням цей механізм може мати характер приповерхневої втрати стійкості у структурі КМ з формами втрати стійкості, згасаючими при віддаленні від завантаженої граничної поверхні. Такий механізм відповідає руйнуванню матеріалу у вигляді зминання торців зразків та елементів конструкцій із КМ і його дослідження складає одну із неklasичних проблем механіки руйнування композитів [2]. Як правило, явище приповерхневої нестійкості передуює внутрішній нестійкості. У зв'язку з цим її дослідження дозволяє встановити мінімальне значення критичних параметрів навантаження, при яких може відбутися втрата несучої здатності у армуючих компонентах біля заванта-

Цитування: Бистров В.М., Декрет В.А., Зеленський В.С. Приповерхнева втрата стійкості у шаруватому композитному матеріалі при недосконалому контакті між шарами. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2022. № 6. С. 28—35. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.06.028>

женої поверхні. Наявність технологічних та експлуатаційних дефектів і недосконалостей у структурі КМ потребує урахування їх впливу на втрату стійкості у структурі КМ. Зокрема, це стосується випадку ослаблення адгезії між компонентами КМ внаслідок таких дефектів як непроклеї та розшарування, тріщини тощо. За наявності тріщин поряд із втратою стійкості у структурі КМ при стисканні вздовж тріщин може відбуватися такий механізм руйнування як локальна втрата стійкості стану рівноваги матеріалу, який оточує тріщини [1, 3]. При дослідженні руйнування КМ вказані механізми доцільно розглядати сумісно.

Одним із найбільш точних підходів при розгляді вказаної проблеми є застосування тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформованих тіл (ТЛТСДТ) [4, 5] в рамках моделі кусково-однорідного середовища. На основі такого підходу механізм руйнування КМ, якому відповідає приповерхнева втрата стійкості у структурі КМ при ідеальному контакті між компонентами, досліджений зокрема у роботах [6–8]. Вплив недосконалості міжшарового контакту на втрату стійкості у внутрішній структурі КМ досліджено у роботах [9–11]. Результати, які стосуються приповерхневої втрати стійкості у структурі КМ за наявності недосконого контакту між компонентами КМ практично відсутні.

При моделюванні недосконого контакту між компонентами КМ найбільш поширеним підходом є застосування моделей типу моделі пружинного шару (spring-layer model), коли вздовж усієї лінії контакту задається пропорційний зв'язок між стрибком переміщень і тангенціальними зусиллями на контакті. Інший підхід може полягати у застосуванні на ділянках контакту компонентів КМ таких граничних умов, які відповідають ідеальному з'єднанню шарів та дефектам міжшарової адгезії різної природи. Дефекти, зокрема, можуть бути представлені або тріщинами з вільними від зусиль берегами або “дефектами із зв'язаними берегами”, які відповідають умовам проковзування, коли умова неперервності зберігається лише для нормальних компонент переміщень і напружень [10].

У даній роботі представлена розрахункова модель для дослідження приповерхневої втрати стійкості у структурі КМ при недосконому контакті між шарами КМ, який моделюється системою міжшарових макротріщин у вигляді математичного розрізу з вільними від напружень берегами. Макротріщинами вважаються тріщини, довжина яких є порівняною або перевищує товщину армуючих шарів КМ. Досліджено вплив розміру тріщин на критичні навантаження та форми втрати стійкості у структурі КМ. Як представницький елемент КМ використана багатошарова розрахункова область з граничними умовами на бічних сторонах розрахункової області, які відповідають умовам симетрії [7, 8]. Для чисельного розв'язку задач зазначеного класу застосовано метод сіток на основі модифікованого варіаційно-різницевого підходу [12].

Постановка задачі. Розглянемо задачу визначення критичних параметрів стійкості двоконтактного шаруватого КМ регулярної структури за наявності недосконого контакту між шарами (рис. 1, а) для схеми навантаження, яка відповідає одноосьовому стисканню шарів наповнювача в напрямку осі Ox_2 поверхневим навантаженням постійної інтенсивності p^0 і призводить до неоднорідного напружено-деформованого стану у околі навантаження (статичного крайового ефекту). Це навантаження задається наступним співвідношенням:

$$p(x_1) = \sigma_{22}(x_1, 0) = \begin{cases} p^0, & -h_a/2 + kh \leq x_1 \leq h_a/2 + kh, \quad k = 0, \pm 1, \dots, \\ 0, & \text{для інших } x_1. \end{cases} \quad (1)$$

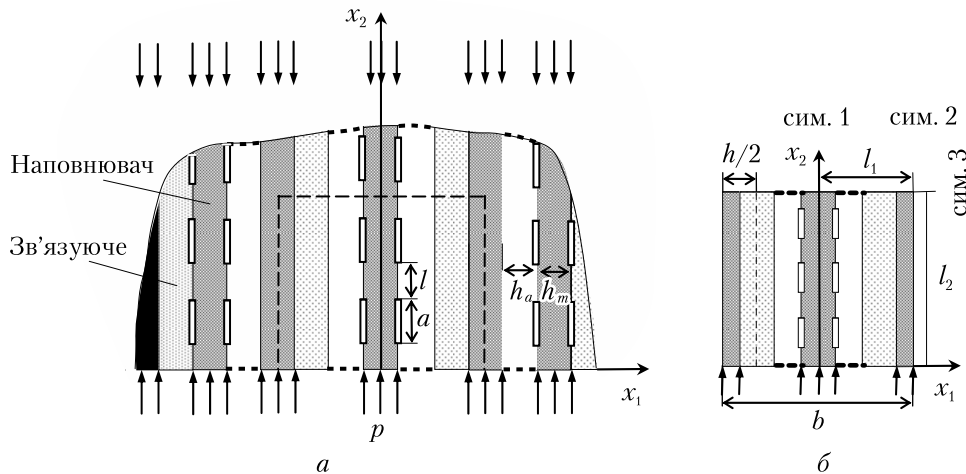


Рис. 1. Шаруватий КМ із недосконалим контактом між армуючими шарами і матрицею (а); представницький елемент матеріалу (б), сим 1, сим 2, сим 3 — вісі симетрії, $x_1 = 0, x_1 = l_1, x_2 = l_2$

Тут $h = h_a + h_m$ — параметр структури шаруватого КМ; h_a, h_m , — відповідно товщина шару наповнювача (армуючого шару) і шару зв'язуючого (матриці). Припускаємо, що на нескінченності навантаження до армуючих шарів прикладається за такою ж схемою. Уздовж осі Ox_3 навантаження не змінюється. Виходячи з умов симетрії навантаження і регулярності структури КМ, задачу розв'язуємо для представницького елемента матеріалу, якому відповідає розрахункова область скінченних розмірів. На підставі результатів роботи [8] розмір цієї області в напрямку осі Ox_1 відповідає періоду b поверхневого навантаження і складає $l_1 = b/2 = 8h$. Розмір у напрямку Ox_2 встановлюється за результатами обчислювального експерименту і повинен відповідати умові сталого значення параметрів стійкості КМ і умові сталого характеру згасання крайового ефекту в околі поверхневого навантаження при подальшому зростанні вказаного розміру. Зазначена розрахункова область показана на рис. 1, б. Вважаємо, що для такої геометрії розрахункової області і умов навантаження отримані результати будуть відповідати КМ, який моделюється напівнескінченною областю. Крайні шари представницького елемента є армуючими шарами.

Припускаючи, що матеріал наповнювача і зв'язуючого є досить жорстким, при дослідженні стійкості будемо застосовувати другий варіант теорії малих докритичних деформацій [4, 5]. Поверхнєве навантаження вважаємо “мертвим”, що забезпечує виконання достатніх умов застосовності статичного методу дослідження стійкості. При використанні статичного методу задача стійкості зводиться до узагальненої задачі на власні значення, в якій мінімальне власне значення μ визначає критичне навантаження, а відповідна власна функція $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ — форму втрати стійкості. Задачу розглядаємо в двовимірній постановці для випадку плоскої деформації в площині x_1Ox_2 . Недосконалий контакт між шарами моделюється міжшаровими тріщинами у вигляді математичних розрізів з вільними від напружень берегами.

Початковий стан із урахуванням симетрії навантаження визначаємо із наступних основних співвідношень лінійної теорії пружності для області $\bar{\Omega} = \{(x_1, x_2) | 0 \leq x_1 \leq l_1; 0 \leq x_2 \leq l_2\}$: рівняння рівноваги

$$\sigma_{ij,i}^0 = 0, \quad x \in \bar{\Omega}; \quad (2)$$

граничні умови

$$\begin{aligned} \sigma_{21}^0 = 0 \wedge u_2^0 = 0, \quad 0 \leq x_1 \leq l_1 \wedge x_2 = l_2; \\ \sigma_{12}^0 = 0 \wedge u_1^0 = 0, \quad (x_1 = 0 \vee x_1 = l_1) \wedge (0 \leq x_2 \leq l_2); \\ \sigma_{22}^0 = p \wedge \sigma_{21}^0 = 0, \quad 0 \leq x_1 \leq l_1 \wedge x_2 = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

умови ідеального контакту на границі між компонентами КМ

$$[\sigma_{1j}^0] = 0, \quad [u_j^0] = 0; \quad (4)$$

умови недосконалого контакту на ділянках границі між центральним армуючим шаром і матрицею, які відповідають наявності на межі розділу компонент КМ математичних розрізів із вільними від напружень сторонами

$$\sigma_{1j}^{0(a)} = 0, \quad \sigma_{1j}^{0(m)} = 0; \quad (5)$$

співвідношення між компонентами напружень σ_{ij} , деформацій ϵ_{ij} та переміщень u_i у межах компонента КМ

$$\sigma_{ij}^0 = \delta_{ij} A_{ik} \epsilon_{kk}^0 + 2(1 - \delta_{ij}) G \epsilon_{ij}^0, \quad \epsilon_{ij}^0 = \frac{1}{2}(u_{i,j}^0 + u_{j,i}^0), \quad i \neq j, \quad (6)$$

де

$$A_{11} = A_{22} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad A_{12} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (7)$$

Основні співвідношення ТЛТСДТ для визначення критичних параметрів стійкості КМ мають такий вигляд: рівняння у збуреннях

$$(\sigma_{ij} + \mu \sigma_{in}^0 u_{j,n}),_i = 0, \quad x \in \Omega; \quad (8)$$

граничні умови

$$\begin{aligned} (\sigma_{12} + \mu \sigma_{22}^0 u_{1,2}) = 0 \wedge u_2 = 0, \quad 0 \leq x_1 \leq l_1 \wedge x_2 = l_2; \\ u_1 = 0 \wedge (\sigma_{12} + \mu \sigma_{11}^0 u_{2,1}) = 0, \quad (x_1 = 0 \vee x_1 = l_1) \wedge (0 \leq x_2 \leq l_2); \\ (\sigma_{j2} + \mu p u_{j,2}) = 0, \quad 0 \leq x_1 \leq l_1 \wedge x_2 = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

умови ідеального контакту між шарами

$$[\sigma_{1j} + \mu \sigma_{1n}^0 u_{j,n}] = 0, \quad [u_j] = 0; \quad (10)$$

умови недосконалого контакту на ділянках границі між центральним армуючим шаром і матрицею, які відповідають наявності на межі розділу компонент КМ математичних розрізів із вільними від напружень сторонами

$$\sigma_{1j}^{(a)} + \mu \sigma_{1n}^{0(a)} u_{j,n}^{(a)} = 0, \quad \sigma_{1j}^{(m)} + \mu \sigma_{1n}^{0(m)} u_{j,n}^{(m)} = 0 \quad (11)$$

Співвідношення між збуреннями напружень σ_{ij} , деформацій ϵ_{ij} і переміщень u_i у межах компонента КМ мають вигляд (6), (7).

Критичне навантаження визначається наступним чином:

$$p_{кр} = \min |\mu| / l_1 \int_0^{x_1 \leq l_1} p(x_1) dx_1 = \min |\mu| p^0 h_a / h, \quad (12)$$

де $\min |\mu|$ — мінімальне за модулем власне число задачі (8) — (11). Вигляд співвідношення (12) відображає той факт, що стискує навантаження прикладаємо тільки до армуючих шарів.

В (6), (7) A_{ij} , E , G , ν — модулі пружності, модуль Юнга, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона компоненти КМ. Позначення в (2) — (12) є загальноприйнятими, і індекси змінюються від 1 до 2 ($\wedge, \vee$ — знаки логічного множення і додавання). Верхнім індексом “0” позначені компоненти напружень для докритичного стану, який визначається на основі розв’язку задачі (2) — (7). Індекс, що позначає належність до шару КМ, у співвідношеннях (2) — (5), (8) — (10) для зручності опущений; у співвідношеннях (5), (11) позначення “(a)” для верхнього індекса відноситься до наповнювача (армуючого шару), позначення “(m)” — до зв’язуючого (матриці). У співвідношеннях (4) та (10) $[f(x)] = f(x-0) - f(x+0)$ — стрибок функції $f(x)$.

Чисельний розв’язок. Задачі визначення докритичного стану на основі співвідношень (2) — (7) і задача визначення критичних параметрів стійкості КМ (8) — (12) розв’язані методом сіток з використанням концепції базової схеми [12]. Для розв’язування дискретних задач застосовані ефективні чисельні методи [13]. В даному випадку алгебраїчна задача визначення початкового стану розв’язувалась прямим методом Холецкого. Дискретна задача стійкості на власні значення розв’язувалась методом ітерування підпростору. В рамках обчислювального експерименту для розв’язування дискретних задач великої розмірності застосовані паралельні алгоритми вказаних методів [14]. Методика проведення відповідних обчислень представлена у роботі [15].

Числові результати та їх аналіз. Результати отримані для розрахункової моделі, наведеної на рис. 1, б. Розрахунки одержані для наступних механічних та геометричних характеристик КМ (індекс “a” відноситься до армуючого шару, індекс “m” — до матриці): відношення модулів Юнга армуючих шарів і матриці $E_a E_m^{-1} = 50, 100, 500$; коефіцієнти Пуассона $\nu_a = \nu_m = 0, 3$; довжини макротріщин складали $a = h, 2h, 3h$, де $h = h_a + h_m$. Розмір розрахункової області у напрямку осі Ox_2 , визначений за результатами обчислювального експерименту, становив $l_2 = 20l_1 = 160h$.

На рис. 2 представлені форми втрати стійкості $u_2^*(l_1/2, x_2^*) = u_2(l_1/2, x_2/h) / u_2^{\max}$ у перерізі $x_1 = l_1/2$ середнього армуючого шару представницького елемента КМ, де $u_2^{\max}$ —

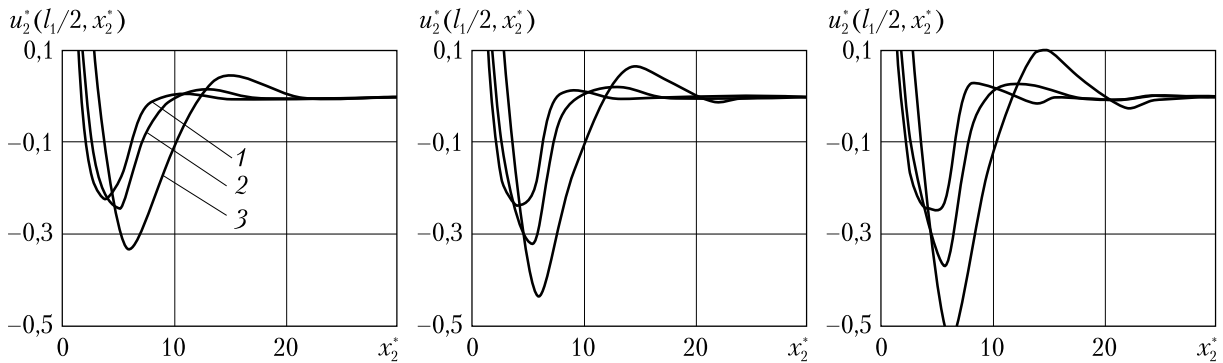


Рис. 2. Приповерхневі форми втрати стійкості у середньому армуючому шарі представницького елемента КМ при ідеальному контакті (а) за наявності міжшарових тріщин розміром $2h$ (б), за наявності міжшарових тріщини розміром $3h$ (в) для різних значень E_a/E_m : 1 – 50; 2 – 100; 3 – 500

максимальне значення збурення переміщень в зазначеному перерізі. Графіки відображають залежність форм втрати стійкості від довжини a макротріщин та відношення E_a/E_m модулів Юнга армуючого шару та матриці. Форми втрати стійкості мають хвилюподібний характер із згасаючою амплітудою при віддаленні від завантаженої граничної поверхні КМ. За наявності тріщин та при збільшенні їх довжини таке згасання відбувається менш швидко та проявляється у більш значній мірі для випадку жорсткіших армуючих шарів.

На рис. 3 показана залежність критичних навантажень для випадку ідеального та недосконалого контакту між армуючими шарами та матрицею від величини відношення E_a/E_m для різних значень довжини макротріщин. Наявність недосконалого контакту між шарами КМ і збільшення розміру тріщин зумовлює зменшення критичних навантажень та впливає більшою мірою на критичні навантаження у порівнянні із ідеальним контактом при більш високих значеннях відношення E_a/E_m .

Висновки. Розрахункова схема на основі ТЛТУДТ і моделі кусково-однорідного середовища, коли як представницький елемент КМ використовується багатшарова розрахункова область з граничними умовами на бічних сторонах розрахункової області, які відповідають умовам симетрії, дозволяє досліджувати механізм руйнування при зминанні торців зразків і елементів конструкцій з КМ шаруватої структури з урахуванням недосконалого контакту між шарами.

Моделювання недосконалого контакту шляхом застосування граничних умов на ділянках контакту компонентів КМ, які відповідають дефектам міжшарової адгезії у вигляді макротріщин з вільними від напружень берегами, дозволяє досліджувати вплив ослаблення адгезії на критичні навантаження та форми втрати стійкості у структурі КМ.

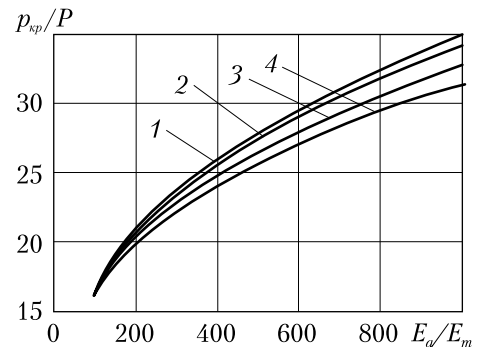


Рис. 3. Залежність критичного навантаження від відношення модулів пружності армуючих шарів та матриці: 1 – ідеальний контакт; 2 – ряд міжшарових тріщин розміром h ; 3 – $2h$; 4 – $3h$

Наявність міжшарових тріщин та збільшення їх довжини зумовлюють зменшення швидкості згасання форм втрати стійкості та зменшення критичних навантажень і впливає більшою мірою на таке зменшення для випадку більш жорстких армуючих шарів.

Таким чином, ослаблення міжшарової адгезії за наявності макротріщин призводить до зменшення міцності КМ та їх руйнування внаслідок приповерхневої втрати стійкості у структурі КМ при зменшених значеннях критичних навантажень у порівнянні із ідеальним контактом між шарами КМ.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гузь А.Н. Основы механики разрушения композитов при сжатии: В 2-х т. Т. 1. Разрушение в структуре материала. 592 с. Т. 2. Родственные механизмы разрушения. 736 с. Киев: Литера, 2008.
2. Guz A.N. Nonclassical Problems of Fracture/Failure Mechanics: On the Occasion of the 50th Anniversary of Research (Review). II. *Int. Appl. Mech.* 2019. **55**, № 3. P. 239–295. <https://doi.org/10.007/s10778-019-00954-2>
3. Guz A.N., Bogdanov V.L., Nazarenko V.M. Fracture of Materials Under Compression Along Cracks. *Advanced Structured Materials*, Vol. 138. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 490 p.
4. Гузь А.Н. Основы трехмерной теории устойчивости деформируемых тел. Киев: Вища школа, 1986. 512 с.
5. Guz A.N. Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies. Berlin: Springer, 1999. 555 p.
6. Guz A.N., Kokhanenko Yu.V. Numerical Solution of Three-Dimensional Stability Problems for Elastic Bodies. *Int. Appl. Mech.* 2001. **37**, № 11. P. 1369–1399.
7. Bystrov V.M., Dekret V.A., Zelenskii V.S. Loss of Stability in a Composite Laminate Compressed by a Surface Load. *Int. Appl. Mech.* 2017. **53**, № 2. P. 156–163.
8. Быстров В.М. Краевой эффект и приповерхностная потеря устойчивости в слоистом композитном материале при сжатии поверхностной нагрузкой. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2019. № 10. С. 29–37. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.10.029>
9. Guz I.A. Composites with interlaminar imperfections: substantiation of the bounds for failure parameters in compression. *Compos Part B*. 1998. **29**, № 4. P. 343–350.
10. Soutis C., Guz I.A. Fracture of layered composites by internal fibre instability: Effect of interfacial adhesion. *Aeronaut J.* 2006. **110**, № 1105. P. 185–195.
11. Guz I.A., Menshykova M., Soutis C. Internal instability as a possible failure mechanism for layered composites. *Phil. Trans. R. Soc.* 2016. **A 374**. P. 1841–1847. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0019>
12. Григоренко Я.М., Шевченко Ю.В., Василенко А.Т. и др. Численные методы. Механика композитов: В12-и т. Под общ. ред. А.Н. Гузя. Т. 11. Киев: А.С.К., 2002. 448 с.
13. Pissanetzky S. Sparse Matrix Technology. London: Academic Press, 1984. 321 p.
14. Химич А.Н., Молчанов И.Н., Попов А.В., Чистякова Т.В., Яковлев М.Ф. Параллельные алгоритмы решения задач вычислительной математики. Киев: Наук. думка, 2008. 247 с.
15. Dekret V.A., Bystrov V.M., Zelenskiy V.S. Numerical analysis of the buckling of near-surface short fibers in a weakly reinforced composite material. *Int. Appl. Mech.* 2021. **57**, № 11. P. 687–699. <https://doi.org/10.007/s10778-022-01118-5>

Надійшло до редакції 13.06.2022

REFERENCES

1. Guz, A. N. (2008). Fundamentals of the compressive fracture mechanics of composites. Edition in 2 volumes (Vol. 1. Fracture in structure of materials. Vol. 2. Related mechanisms of fracture.) Kyiv: LITERA (in Russian).
2. Guz, A. N. (2019). Nonclassical Problems of Fracture/Failure Mechanics: On the Occasion of the 50th Anniversary of Research (Review). II. *Int. Appl. Mech.*, 55, No. 3, pp. 239-295. <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00954-2>
3. Guz, A. N., Bogdanov, V. L. & Nazarenko, V. M. (2020). Fracture of Materials Under Compression Along Cracks. *Advanced Structured Materials*, Vol. 138. Cham: Springer Nature Switzerland AG.

4. Guz, A. N. (1986). Fundamentals of three-dimensional theory of stability of deformable bodies. Kyiv: Vysha Shkola (in Russian).
5. Guz, A. N. (1999). Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies. Berlin: Springer-Verlag Heilberg.
6. Guz, A. N. & Kokhanenko Yu. V. (2001). Numerical Solution of Three-Dimensional Stability Problems for Elastic Bodies. *Int. Appl. Mech.*, 37, No. 11, pp. 1369-1399.
7. Bystrov, V. M., Dekret, V. A. & Zelenskii, V. S. (2017). Loss of Stability in a Composite Laminate Compressed by a Surface Load. *Int. Appl. Mech.*, 53, No. 2, pp. 156-163.
8. Bystrov, V. M. (2019). End effect and near-surface buckling in a laminate composite material compressed by a surface load. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 10, pp. 29-37 (in Russian).
<https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.10.029>
9. Guz, I. A. (1998). Composites with interlaminar imperfections: substantiation of the bounds for failure parameters in compression. *Compos Part B.*, 29, No. 4, pp. 343-350.
10. Soutis, C. & Guz, I. A. (2006). Fracture of layered composites by internal fibre instability: Effect of interfacial adhesion. *Aeronaut J.*, 110, No. 1105, pp. 185-195.
11. Guz, I. A., Menshykova, M. & Soutis, C. (2016). Internal instability as a possible failure mechanism for layered composites. *Phil. Trans. R. Soc., A* 374., pp. 1841-1847. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0019>
12. Grygorenko, Ya. M., Shevchenko, Yu. N., Vasilenko, A. T. et al. (2002). Computational methods. Mechanics of composites: In 12 volumes. Editor-in-Chief A.N. Guz. Vol.11. Kyiv: A.S.K. (in Russian).
13. Pissanetzky, S. (1984). Sparse Matrix Technology. London: Academic Press (in Russian).
14. Khimich, A. N., Molchanov, I. N., Popov, A. V., Chistyakova, T. V. & Yakovlev, M. F. (2008). Parallel Algorithms for Solving Problems of Computational Mathematics. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
15. Dekret, V. A., Bystrov, V. M. & Zelenskiy, V. S. (2021). Numerical analysis of the buckling of near-surface short fibers in a weakly reinforced composite material. *Int. Appl. Mech.*, 57, No. 11, pp. 687-699.
<https://doi.org/10.1007/s10778-022-01118-5>

Received 13.06.2022

V.M. Bystrov, <https://orcid.org/0000-0001-6648-8449>

V.A. Dekret, <https://orcid.org/0000-0001-6590-6426>

V.S. Zelenskiy, <https://orcid.org/0000-0001-9497-1243>

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: numer@inmech.kiev.ua

NEAR-SURFACE BUCKLING IN LAMINATE

COMPOSITE MATERIAL WITH IMPERFECT INTERLAYER CONTACT

Using the basic relations of the three-dimensional linearized theory of stability within the model of a piecewise-homogeneous medium, a solution is obtained for the problem of stability of a layered composite material under compression by a surface load along the reinforcement direction. The case of imperfect contact between layers is considered, which is modeled by a periodic system of macrocracks in the form of a mathematical section for the stress-free crack surfaces. A calculation model is used for the boundary conditions on the sides of a multilayer sample made of a composite material that meet the symmetry conditions. The influence of the crack size on the damping of near-surface buckling modes and critical loads is studied. For the numerical solution of the problem, the grid method based on a modified variational-difference approach was used. Within the framework of the computational experiment, serial and parallel algorithms of the Cholesky methods and subspace iteration were applied.

Keywords: *layered composite material, surface load, imperfect contact, macrocrack, buckling mode, critical load, grid method, parallel computing.*