

В. А. Декрет

Про два механізми руйнування композитного матеріалу, слабкоармованого короткими волокнами поблизу вільної поверхні

(Представлено академіком НАН України О. М. Гузем)

Виконано дослідження напружено-деформованого стану композитного матеріалу, слабкоармованого короткими волокнами поблизу вільної плоскої граничної поверхні. Встановлено, що в даному процесі поблизу поверхні виникає несиметричний докритичний напружено-деформований стан, який призводить до початкового викривлення волокна, що може призвести до руйнування композита. Наведено результати розрахунків та зроблено висновок, що при дослідженні нестійкості композитного матеріалу, слабкоармованого короткими волокнами поблизу вільної поверхні, під дією стискуючого навантаження, направлено вздовж волокон, необхідно виконувати аналіз сумісної дії кількох явищ (механізмів), що мають місце в зазначеному процесі та можуть привести до руйнування композита.

У роботі [1] наведено результати дослідження явища втрати стійкості композитного матеріалу, слабкоармованого короткими волокнами поблизу вільної граничної поверхні, що є продовженням дослідження явища приповерхневої втрати стійкості шаруватих та волокнистих композитних матеріалів із застосуванням тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл (наприклад, [2, 3]). Однак при подальших дослідженнях, результати яких детально подані в [4], було встановлено, що під дією стискуючого навантаження в композитному матеріалі, слабкоармованому короткими волокнами поблизу вільної граничної поверхні, виникає несиметричний докритичний напружено-деформований стан, що призводить до початкового викривлення волокна. Це, в свою чергу, також може стати причиною руйнування композита. Отже, при дослідженні нестійкості композитного матеріалу, слабкоармованого короткими волокнами поблизу вільної граничної поверхні, під дією стискуючого навантаження, направлено вздовж волокон, необхідно виконувати аналіз сумісної дії кількох явищ (механізмів), що мають місце в зазначеному процесі та можуть привести до руйнування композита.

Очевидно, що при досить великій відстані між включенням та поверхнею напружено-деформований стан є симетричним відносно поздовжньої осі волокна. В такому випадку може мати місце явище внутрішньої втрати стійкості композита, дослідження якого детально викладено в роботах [5]. По мірі наближення наповнювача до граничної поверхні, згідно із [1], може спостерігатись явище втрати стійкості, що реалізується в приповерхневій зоні. Разом з тим, з наближенням включення до граничної поверхні виникає початкове викривлення волокна, зумовлене несиметричністю основного напружено-деформованого стану, що також може стати причиною руйнування композитного матеріалу.

Розглянемо плоску задачу визначення напружено-деформованого стану композитного матеріалу, слабкоармованого короткими волокнами поблизу плоскої вільної граничної поверхні, під дією стискуючого навантаження, направлено вздовж волокон. В зв'язку з ма-

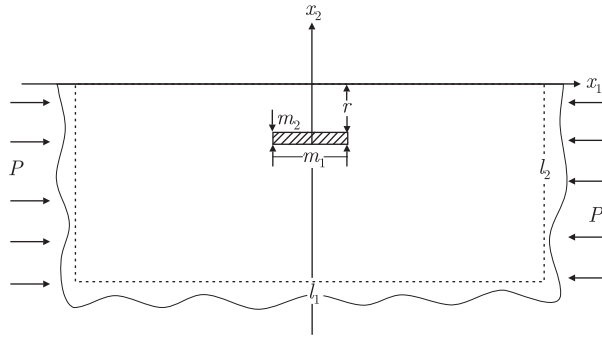


Рис. 1

лим об'ємним вмістом наповнювача, взаємодія між волокнами не враховується. Таким чином, в декартових координатах $x_1 O x_2$, композитний матеріал моделюється напівнескінченною матрицею, наповненою одним коротким волокном, направленим вздовж осі $O x_1$, що збігається з вільною граничною поверхнею, та розміщеним на відстані r від неї. Вздовж осі $O x_1$ на композит діє стискуюче навантаження постійної інтенсивності P (рис. 1). Композитний матеріал моделюється кусково-однорідним середовищем, коли матеріал в межах компонента композита вважається однорідним, а на межі компонентів виконуються відповідні контактні умови. Компоненти композита будемо вважати лінійно-пружними та ізотропними.

Дослідження напружено-деформованого стану будемо проводити в рамках класичної лінійної теорії пружності ізотропного тіла, для якої рівняння рівноваги та співвідношення пружності запишемо у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \sigma_{ij}^0 = 0; \quad \sigma_{ij}^0 = \delta_{ij} \lambda \varepsilon_{nn}^0 + 2\mu \varepsilon_{ij}^0, \quad 2\varepsilon_{ij}^0 = \frac{\partial u_i^0}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^0}{\partial x_i}. \quad (1)$$

Для переходу у виразах (1) до матриці або наповнювача необхідно для всіх величини в (1) вказати відповідний індекс "m" або "a". Оскільки для матриці у відповідності до розрахункової схеми на рис. 1 дослідження проводиться для нескінченної області, напруження і переміщення в матриці зручно навести у вигляді суми

$$\sigma_{ij}^{0m} = \sigma_{ij}^{\infty} + \sigma_{ij}^{10m}; \quad u_j^{0m} = u_j^{\infty} + u_j^{10m}, \quad (2)$$

де σ_{ij}^{∞} та u_j^{∞} відповідають зовнішньому навантаженню \mathbf{P} (рис. 1), заданого для матриці "на нескінченності"; σ_{ij}^{10m} і u_j^{10m} відповідають збуренням напружено-деформованого стану, зумовленим наявністю волокна скінчених розмірів. Слід відзначити, що величини з індексами ∞ та 1 також визначаються співвідношеннями (1). Величини σ_{ij}^{∞} і u_j^{∞} у відповідності із розрахунковою схемою на рис. 1 визначаються такими виразами:

$$\sigma_{11}^{\infty} = -P; \quad \sigma_{22}^{\infty} = 0; \quad \sigma_{12}^{\infty} = 0; \quad u_1^{\infty} = A_1 x_1; \quad u_2^{\infty} = A_2 x_2, \quad (3)$$

де величини A_1 і A_2 визначаються з другого виразу (1) з урахуванням перших трьох виразів (3). Таким чином, для матриці одержуємо вираз (1) (величини σ_{ij}^{10m} , ε_{ij}^{10m} та u_j^{10m} , постійні λ_m та μ_m) і для волокна отримаємо вираз (1) (величини σ_{ij}^{0a} , ε_{ij}^{0a} та u_j^{0a} , постійні λ_a та μ_a). Отже, дослідження докритичного стану проводиться із застосуванням вищенаведених величин та основних співвідношень (1). Повна постановка задачі також включає умови

неперервності векторів напружень та переміщень на межі середовищ, які для розрахункової схеми на рис. 1 зобразимо в такій формі:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^{\infty} + \sigma_{11}^{10m} &= \sigma_{11}^{0a}, & \sigma_{12}^{10m} &= \sigma_{12}^{0a}, & u_1^{\infty} + u_1^{10m} &= u_1^{0a}, & u_2^{\infty} + u_2^{10m} &= u_2^{0a} \\ \text{при } x_1 &= \pm \frac{m_1}{2}, & |x_2| &\leq \pm \frac{m_2}{2}; \\ \sigma_{22}^{10m} &= \sigma_{22}^{0a}, & \sigma_{12}^{10m} &= \sigma_{12}^{0a}, & u_1^{\infty} + u_1^{10m} &= u_1^{0a}, & u_2^{\infty} + u_2^{10m} &= u_2^{0a} \\ \text{при } |x_1| &\leq \pm \frac{m_1}{2}, & x_2 &= \pm \frac{m_2}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

та умови затухання “на нескінченності” для матриці, які з урахуванням виразів (2) і (3), можна подати так:

$$\sigma_{ij}^{10m} \rightarrow 0 \quad \text{та} \quad u_j^{10m} \rightarrow 0, \quad \text{при} \quad \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Вищенаведена постановка задачі визначення напружено-деформованого стану відповідає загальноприйнятому підходу при дослідженні задач концентрації напружень біля отворів та включень. Безумовно, одержати розв’язок сформульованої вище задачі аналітичними методами неможливо; в зв’язку з цим для розв’язання цієї задачі застосовуються чисельні методи. При застосуванні цих методів задача розглядається для прямокутника із зовнішніми розмірами $l_1 \times l_2$ на рис. 1; в подальшому при обчислювальному експерименті зовнішні розміри $l_1 \times l_2$ прямокутника збільшуються і проводиться згущення сітки до такого рівня, щоб подальше збільшення не впливало суттєво на результати.

Розглянемо результати розрахунків докритичного напружено-деформованого стану. Розрахунки були виконані для таких значень параметрів компонентів композита: відношення модулів Юнга $E^* = E_1/E_2 = 343$; коефіцієнти Пуассона $\nu_1 = \nu_2 = 0,4$; коефіцієнт форми наповнювача $LD^{-1} = m_1/m_2 = 1000$. Безрозмірна відстань між волокном та поверхнею $r^* = r/m_1$ послідовно змінювалася в інтервалі $0 \leq r^* \leq 15$.

В результаті дослідження встановлено, що у випадку, коли відстань від поверхні до волокна досить велика, має місце симетричний напружено-деформований стан наповнювача відносно його горизонтальної осі, в той час як вісь волокна не деформується. В іншому випадку, коли волокно знаходиться на поверхні, відбувається викривлення наповнювача разом з вільною граничною поверхнею, причому горизонтальна вісь волокна викривляється в бік області, що не заповнена матеріалом матриці. Очевидно, несиметричність напружено-деформованого стану зумовлена впливом наявності вільної граничної поверхні в процесі деформування наповнювача. Крім того, встановлено, що із збільшенням відстані наповнювача від поверхні відбувається зміна напрямку викривлення волокна. На рис. 2 показана залежність від відстані r^* величини зміщення $u_2^* = u_2|_{x_1=0} - u_2|_{x_1=m_1/2}$ для центра симетрії волокна $x_2 = r + m_2/2$ відносно кінців (крива 1), а також його проекції $x_2 = 0$ на граничній поверхні (крива 2).

Для значення $r^* = 0$, коли волокно знаходиться на поверхні композитного матеріалу, середня лінія наповнювача зміщується в область, не заповнену матеріалом матриці, в той час як краї волокна утримуються матрицею. При віддаленні від поверхні матеріал матриці, що знаходиться між волокном та граничною поверхнею, наче “вдавлює” волокно в матрицю, та лише на досить великій відстані $r^* > 15$ взаємний вплив наповнювача та поверхні повністю нейтралізується.

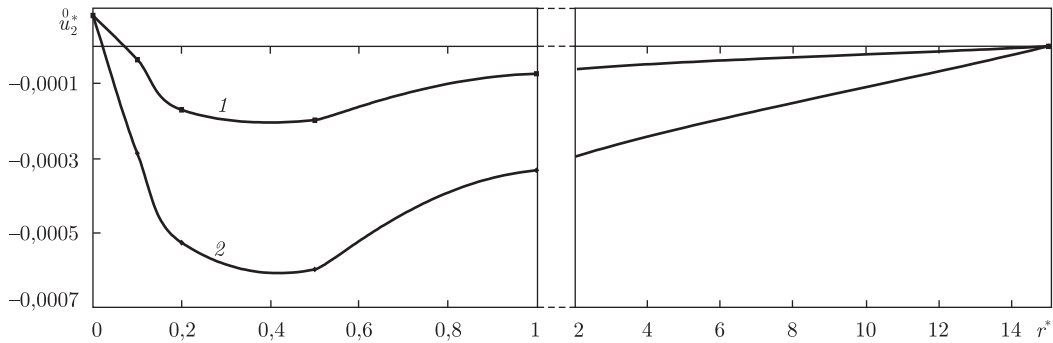


Рис. 2

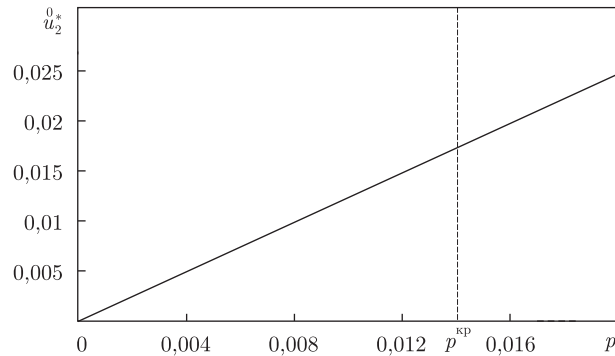


Рис. 3

Таким чином, встановлено, що під дією стискуючого навантаження в композитному матеріалі, слабкоармированому короткими волокнами поблизу вільної плоскої граничної поверхні, виникає несиметричний напружено-деформований стан, який приводить до початкового викривлення волокна, що може стати причиною руйнування композита.

Отже, при дослідженні нестійкості композитного матеріалу, слабкоармированого короткими волокнами поблизу вільної плоскої граничної поверхні, під дією стискуючого навантаження, направлено вздовж волокон, необхідно виконувати аналіз сумісної дії кількох явищ (механізмів), що мають місце в даному процесі та можуть привести до руйнування композита. Рис. 3 ілюструє початкове викривлення волокна $u_2^* = u_2|_{x_1=0} - u_2|_{x_1=m_1/2}$ від величини прикладеного навантаження, де штриховою лінією показано значення критичного напруження, що відповідає втраті стійкості композита [1].

Для визначення домінуючого механізму руйнування композитного матеріалу необхідно виконати порівняння величини критичної деформації матеріалу та величини початкового викривлення волокна з межею міцності матеріалу.

1. Декрет В. А. Про стійкість композитного матеріалу, слабкоармированого короткими волокнами поблизу вільної поверхні // Доп. НАН України. – 2006. – № 10. – С. 49–51.
2. Guz A. N., Lapusta Yu. N. Stability of fiber near free surface // Int. Appl. Mech. – 1986. – **22**, No 8. – P. 711–718.
3. Guz A. N., Chekhov V. N. Investigation of surface instability of stratified bodies in three-dimensional formulation // Ibid. – 1990. – **26**, No 2. – P. 107–125.
4. Декрет В. А. Приповерхностная неустойчивость композитных материалов, слабкоармированных короткими волокнами // Прикл. мех. – 2008. – № 6. – С. 28–35.

5. Guz A. N., Dekret V. A., Kokhanenko Yu. V. Planar stability problem of composite weakly reinforced by short fibers // Mech. of Adv. Mater. and Struct. – 2005. – No 12. – P. 313–317.

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

Надійшло до редакції 30.01.2009

V. A. Dekret

On two failure mechanisms of a composite material weakly reinforced by short fibers near the free surface

A stress-strain state of a composite material weakly reinforced by short fibers near the surface at a longitudinal compression is investigated. It is established that the arising asymmetric stress-strain state results in the initial curvature of fibers and can cause the destruction of a composite. A conclusion is done that it is necessary to analyze the joint action of a few phenomena (mechanisms) which can result in the destruction of the composite.