

УДК 539.431:624.21

<https://doi.org/10.31713/vt1202616>

Кундрат М.М. ^[1]: 0000-0001-6085-564X ¹,
д.т.н., професор
(m.m.kundrat@nuwm.edu.ua)

¹ Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне

ВІДШАРУВАННЯ ТОНКОГО ПІДСИЛЕННЯ В ОРТОТРОПНОМУ ТІЛІ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

За умов плоскої задачі досліджено відшарування тонкого включення в ортотропному тілі при навантаженні циклічними напруженнями паралельно лінії його продовження. Відшаруванню передуює розвиток локалізованих зон передруйнування (ослабленого контакту), яким можуть відповідати області пластичного деформування, накопичення пошкоджень, часткового розриву зв'язків та ін. Отримано аналітичні залежності для зміни робочої довжини включення у залежності від параметрів ортотропії, амплітуди навантаження, кількості циклів, міцнісних та пружних характеристик матриці. Виконано розрахунки робочої довжини включення для окремих значень характеристик композиту та навантаження.

Ключові слова: включення, відшарування, зона передруйнування, робоча довжина, кількість циклів.

Конструювання композитних матеріалів з високою питомою міцністю та в'язкістю руйнування досягається армуванням матриці високоміцними включеннями у вигляді волокон чи стрічок. Для теоретичного з'ясування руйнування таких композитів під статичним чи змінним навантаженням необхідний аналіз полів напружень та деформацій біля включень. Їх асимптотичні подання досліджувалися в широкому колі праць, найбільш повний огляд подано в монографії [1]. Експериментальні дані свідчать, що пластична течія починається біля кутів на торцях включення і поширюється уздовж поверхні поділу до його центральної частини (напр., [2]). Аналітичні розв'язки плоских та просторових задач для включень з зонами передруйнування, які моделюють локалізованими прошарками

пластично деформованого матеріалу (поверхнями зсуву), отримано в [3–7] та ін.

За результатами [3, 7] (рис. 1) подано значення нормованих $\tilde{\sigma}_{xy} = \sigma_{xy} / \tau_s^*$ дотичних напружень (лінія 1) на межі включення-матриця та розривних $\tilde{\sigma}_{xx}^c = \sigma_{xx}^c / (2\tau_s^*)$ в перерізі включення (лінія 2) за одновісного розтягу сталими напруженнями $\tilde{q} \equiv q / (2\tau_s^*) = 0,25$. Тут і далі σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} – компоненти тензора напружень; $2a$ – довжина включення. Параметр τ_s^* трактується як зсувна міцність межі поділу з урахуванням її структурних недосконалостей чи за пластичного деформування – як зсувний поріг пластичності. Максимального значення дотичні напруження досягають в околах кінців включення ($\sigma_{xy} = \tau_s^*$) і саме тут йому передається більша частина навантаження від матриці. За межами деякого околу біля країв включення дотичні напруження швидко зменшуються і в середній частині дорівнюють нулю. Прийнята схема і результати за нею узгоджуються як з експериментальними даними [8], так і чисельним експериментом [1, 9] на основі методу скінченних елементів.

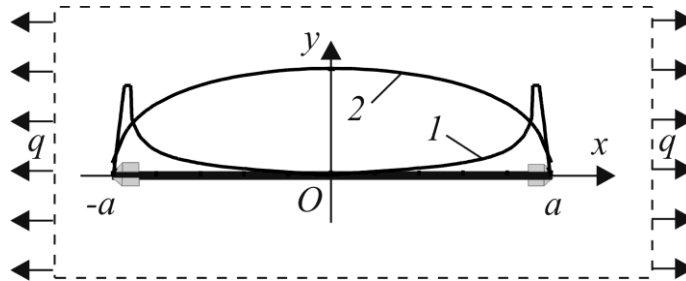


Рис. 1. Розподіл нормованих дотичних та розривних напружень

Отримані результати описують два найбільш очікуваних механізми локального руйнування: розрив включення або його відшарування від матриці. При заданих міцнісних та пружних характеристиках композиту існує довжина включення зміни характеру руйнування $2a = 2a_{cr}^*$: при довжині включення меншій від $2a_{cr}^*$ руйнування проходить методом його відшарування, при більшій від $2a_{cr}^*$ – шляхом його розриву. Аналізу особливостей втомного відшарування високомодульного включення стосуються

праці [10–12]. Нижче з використанням енергетичного підходу [13] отримано аналітичний розв'язок задачі про відшарування жорсткого лінійного включення в ортотропній матриці за силового циклічного навантаження.

Постановка задачі. Розглянемо в умовах плоскої деформації композитний матеріал з ортотропною пружно-пластичною матрицею та лінійним включенням завдовжки $2a$ ($2a < 2a_{cr}^*$) вздовж осі симетрії, віднесений до системи координат xOy (рис. 2). Матеріали матриці та контактної межі матриця-включення вважаємо рівномісними. Обмеження на довжину включення виключає можливість його руйнування розривом. Композитний матеріал навантажений циклічними напруженнями q ($0 \leq q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$) паралельно лінії включення. Вважатимемо, що частота зміни навантаження невелика й інерційні та теплотвірні ефекти неістотні.

За сталого навантаження найбільша концентрація напружень виникає в околах кінців включення, там же вздовж межі його контакту з тілом мають місце максимальні дотичні напруження τ_{\max} [7]. Вважатимемо, що саме тут при певній комбінації значень амплітуди та кількості циклів навантаження буде ковшне відшарування (втрата зв'язку), яке просуватиметься вздовж межі поділу від кожного краю до центральної частини.

Довжину включення без відшарованих на кінцях фрагментів позначимо через $2a_{wr}$ і назвемо його робочою довжиною (рис. 2).

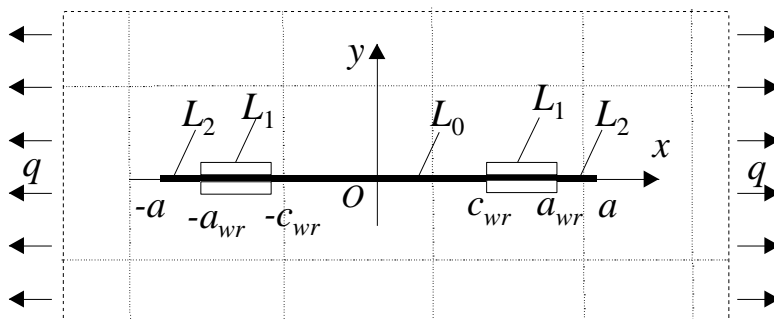


Рис. 2. Схема відшарування підсилюючого елемента

Коефіцієнт тертя на відшарованій частині $L_2 \approx a_{wr} < |x| \leq a$ приймаємо рівним нулю. Локалізовані зони передруйнування

моделюємо додатковими розрізами $L_1 \approx c_{wr} \leq |x| \leq a_{wr}$ з дотичними напруженнями τ_{sf}^* на кромках:

$$\sigma_{xy} = \tau_{sf}^* \text{sign}(x) \quad (x \in L_1).$$

З просуванням ділянки розшарування рухається також і зона передруйнування. Величину τ_{sf}^* вважаємо усередненим значенням напружень у зоні передруйнування з урахуванням циклічного зміцнення чи розміцнення матеріалу. На ділянці $|x| \leq c_{wr}$ зберігається ідеальний контакт, тому поздовжні деформації на ній дорівнюють нулю. Необхідно знайти аналітичні залежності зміни робочої довжини включення $a_{wr} = a_{wr}(n, q_{\max}, q_{\min}, \tau_{sf}^*, \alpha_0, \beta_0)$ від кількості циклів, мінімального q_{\min} та максимального q_{\max} навантажень за цикл, міцнісних та пружних характеристик. Отримані розрахункові формули будуть справедливими за допущення суперпозиції зовнішніх силових, температурних та інших чинників.

Параметри ортотропії $\alpha_0 = (E_1/E_2)^{1/2}$, $\beta_0 = E_1/(2G) - \nu_{12}$ визначаються співвідношеннями $s_1 \cdot s_2 = -\alpha_0$, $s_1 + s_2 = i[2(\alpha_0 + \beta_0)]^{1/2}$, де s_1, s_2 – корені характеристичного рівняння

$$s^4 + (E_1/G - 2\nu_{12})s^2 + E_1/E_2 = 0;$$

E_1, E_2 – розтяговий та стисковий модулі пружності у головних напрямках Ox та Oy ; G – модуль зсуву, що характеризує зміну кута між головними напрямками Ox та Oy ; ν_{12} – Пуассонів коефіцієнт, що описує скорочення в напрямі осі Oy за розтягу в напрямі Ox ; $s_1 = \beta_1 i$, $s_2 = \beta_2 i$, де β_1, β_2 – дійсні числа, $i^2 = -1$. Таку ортотропію, зокрема, мають боро-, вугле- та склопластики, деревина з правильними річними прошарками, фанера, тощо.

Розв'язування задачі. Для побудови рівняння відшарування використаємо енергетичний критерій, який передбачає існування критичного значення енергії W_f , необхідної для того, щоб робоча довжина включення зменшилася на одиницю довжини. Тоді для зменшення робочої довжини a_{wr} на малу величину Δa_{wr} дисипація енергії W повинна досягнути значення W_f : $W = W_f$, де $W_f = \eta_1 \gamma_{sf}^* \Delta a_{wr}$; $\gamma_{sf}^* = \tau_{sf}^* \delta_{2cf}$ – густина енергії розшарування; δ_{2cf} –



критичний зсув у зоні передруйнування; η_1 – поправковий коефіцієнт.

Прийемо, що робоча довжина a_{wr} і розмір зони передруйнування $d_f = a_{wr} - c_{wr}$ – функції від навантаження q . Тоді при збільшенні навантаження на малу величину Δq і просування області відшарування на Δa_{wr} буде справедливим співвідношення

$$W = 2 \int_{a_{wr} - \Delta a_{wr}}^{a_{wr} - d_f - \Delta a_{wr}} \sigma_{xy}(x) [u(x, a_{wr}(q + \Delta q), c_{wr}(q + \Delta q)) - u(x, a_{wr}(q), c_{wr}(q))] dx.$$

Нехтуючи доданками порядку $(\Delta a_{wr})^2$, знаходимо, що

$$\gamma_{\frac{q}{d}}^* \eta_1 = -2\tau_{sf}^* \frac{d}{da_{wr}} \int_{a_{wr} - d_f}^{a_{wr}} x \frac{\partial u(x, a_{wr}, q)}{\partial x} dx - 2\tau_{sf}^* \frac{du(a_{wr}, a_{wr}, q)}{da_{wr}}. \quad (1)$$

Звідси залежність між робочою довжиною включення, навантаженням, пружними і міцнісними характеристиками описується рівнянням

$$\frac{da_{wr}}{dq} = f_1(a_{wr}, q, \tau_{sf}^*, \delta_{2cf}, \alpha_0, \beta_0). \quad (2)$$

Необхідні переміщення в зонах передруйнування матимуть вигляд:

$$u(x) = \frac{\tau_s^*}{\pi E_1} g_4(\alpha_0, \beta_0) [x\Gamma_1(x, a, c) - a\Gamma_2(x, a, c)], \quad (x \in L_1), \quad (3)$$

$$\Gamma_1(x, a_{wr}, c_{wr}) = [\zeta^-(x)/\zeta^+(x)], \quad \zeta^\pm(x) = a_{wr} \sqrt{x^2 - c_{wr}^2} \pm x \sqrt{a_{wr}^2 - c_{wr}^2},$$

$$\Gamma_2(x, a_{wr}, c_{wr}) = \ln[\eta^-(x)/\eta^+(x)], \quad \eta^\pm(x) = \sqrt{a_{wr}^2 - c_{wr}^2} \pm \sqrt{x^2 - c_{wr}^2};$$

$$g_4(\alpha_0, \beta_0) = E_1(p_1 q_2 - p_2 q_1) / i(s_1 q_2 - s_2 q_1),$$

$$p_1 = a_{11} s_1^2 + a_{12}, \quad p_2 = a_{11} s_2^2 + a_{12}, \quad q_1 = (a_{12} s_1^2 + a_{22}) / s_1,$$

$$q_2 = (a_{12} s_2^2 + a_{22}) / s_2, \quad a_{11} = 1/E_1, \quad a_{22} = 1/E_2, \quad a_{12} = -\nu_{12}/E_1 = -\nu_{21}/E_2.$$

При цьому зв'язок між пружними, силовими та геометричними параметрами в композиті приймає вигляд

$$a - c = c \left(\operatorname{ch} \frac{\pi q g_3(\alpha_0, \beta_0)}{2\tau_s^* g_2(\alpha_0, \beta_0)} - 1 \right), \quad (4)$$

$$g_2(\alpha_0, \beta_0) = \operatorname{Im}[q_2 / (s_1 q_2 - s_2 q_1)], \quad g_3(\alpha_0, \beta_0) = q_2 (p_1 - p_2) / (p_1 q_2 - p_2 q_1).$$

Звідси, зокрема, впливає автономність зон передруйнування для робочої довжини включення значно більшої проти параметра δ_{2cf} та

їх довжини:

$$a_{wr} \gg \delta_{2cf}, \quad a_{wr} - c_{wr} \ll a_{wr}. \quad (5)$$

З урахуванням результатів (3), (4) формула (1) набуває вигляду

$$\gamma_{sf}^* \eta_1 = -\frac{2a_{wr} (\tau_{sf}^*)^2}{\pi E_1} \left\{ 2[-H \operatorname{th}(H_1) + g_4 \ln(\operatorname{ch}(H_1))] + a_{wr} \left[\operatorname{th}(H_1) - \frac{H_1}{\operatorname{ch}^2(H_1)} \right] \frac{dH}{da_{wr}} \right\}$$

де $H = q/(2\tau_s^*)$, $H_1 = \pi H/g_4$. Вона описує зв'язок між робочою довжиною включення та навантаженням. Для подальшого аналізу вводимо безрозмірну робочу довжину включення

$$\lambda_{wr} = (\tau_{sf}^*)^2 a_{wr} \eta_1 / (0,4\pi E_1 \gamma_{sf}^*). \quad (6)$$

Залежність між безрозмірними навантаженням H та довжиною λ_{wr} , враховуючи результати (4)–(6), подамо у вигляді диференціального рівняння першого порядку

$$\frac{d\lambda_{wr}}{dH} = f(H, \lambda_{wr}), \quad (7)$$

$$\text{де } f(H, \lambda_{wr}) = \frac{0,8\pi\lambda_{wr}^2 (H_1/\operatorname{ch}^2(H_1) - \operatorname{th}(H_1))}{\pi/g_4 - 1,6\lambda_{wr} (H_1 \operatorname{th}(H_1) - \ln \operatorname{ch}(H_1))}$$

Рівняння (7) описує відшарування включення за один цикл навантаження. Проінтегрувавши його від мінімального навантаження H_{\min} до максимального навантаження H_{\max} , отримаємо зменшення робочої довжини на

$$\delta\lambda_{wr} = \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} \frac{dH}{f(H, \lambda_{wr})},$$

де $H_{\min} = q_{\min}/(2\tau_{sf}^*)$, $H_{\max} = q_{\max}/(2\tau_{sf}^*)$. Звідси, приймаючи λ_{wr} сталим на протязі одного циклу, отримуємо швидкість відшарування у вигляді

$$\frac{d\lambda_{wr}}{dn} = \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} \frac{dH}{f(H, \lambda_{wr})} \equiv F(H_{\max}, H_{\min}, \lambda_{wr}).$$

Після інтегрування знаходимо зв'язок між числом циклів навантаження та робочою довжиною включення

$$n = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \frac{d\lambda_{wr}}{F(H_{\max}, H_{\min}, \lambda_{wr})}, \quad (8)$$

де λ_0, λ_1 – початкове (при $n = 0$) та кінцеве (при заданому числі циклів) значення довжини параметра λ_{wr} .

На рис. 3 зображено залежності параметра робочої довжини включення λ_{wr} від числа циклів навантаження n , отриману подвійним інтегруванням за формулою (8) для початкової довжини $\lambda_0 = 1$; $\eta_1 = 1$. Мінімальне та максимальне навантаження за цикл: $H_{\min} = 0,1$, $H_{\max} = 0,2$.

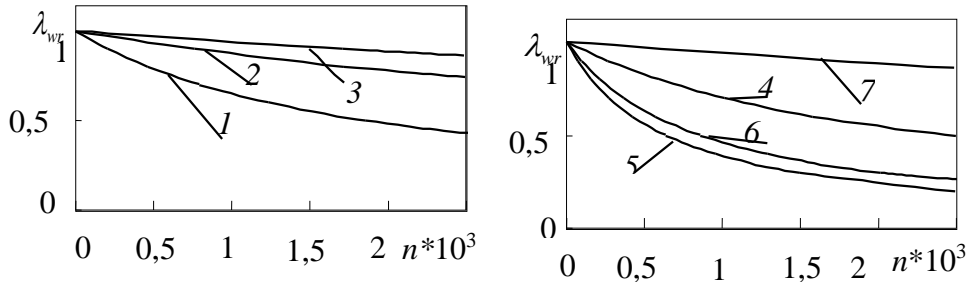


Рис. 3. Робоча довжина підсилення залежно від числа циклів

Характеристики для матеріалів (табл.) взяті з праць [14, 15] і розташовані (лінії 1–3) за зростанням відношення модулів пружності розтягу та стиску. Для всіх матеріалів $\nu_{12} = 0,25$, а анізотропія виражена через параметри α_0, β_0 . При $E_1/E_2 > 1$ включення орієнтоване вздовж напрямку більшої жорсткості.

Таблиця

Номери ліній на рис. 3	E_1 ГПа	E_2 ГПа	$\frac{E_1}{E_2}$	G_{12} ГПа	$\frac{E_1}{G_{12}}$	$\frac{s_1}{i}$	$\frac{s_2}{i}$	α_0	β_0	Матеріал армування
1	54,9	18,3	3	8,8	6,24	2,27	0,76	1,7	2,87	скло
2	281	28,1	10	10,5	26,8	5,08	0,62	3,2	13,14	бор
3	281	11,2	25,1	5,6	50,2	6,99	0,71	5,01	24,86	графіт
4	–	–	4	–	6	–	–	2	2,75	–
5	–	–	0,01	–	10	–	–	0,1	4,75	–
6	–	–	1	–	2,5	1	1	1	1	ізотропія
7	–	–	25	–	50	–	–	5	24	–

Відшарування включення проходить повільніше при його орієнтації вздовж напрямку більшої жорсткості матриці. Зі зменшенням початкової робочої довжини включення швидкість його відшарування також знижується. Для заданого фіксованого навантаження за цикл та наперед відомій кількості циклів завжди

можна підібрати довжину включення таким чином, щоб не відбувалось його відшарування. При цьому повного відшарування не відбувається, за умов задачі в середній частині включення залишається зв'язаним з матрицею.

Висновок. Запропонована математична модель відшарування нерозтяжливого включення від основного матеріалу ортотропної матриці. За результатами (8) завжди можна підібрати довжину включення таким чином, щоб його відшарування не перевищувало заданого наперед значення (чи не відбувалося зовсім). Швидкість відшарування істотно залежить від початкової робочої довжини включення (для довшої вона більша). Параметри ортотропії складових композиту істотно впливають на процес розшарування. Орієнтування включення уздовж напрямку більшої жорсткості матриці є кращим як для збереження його цілісності, так і можливості забезпечення його відшарування.

1. Сулим Г.Т. Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими включеннями. Львів: Дослідно-видавничий центр НТШ. 2007. 716 с.
2. Fukuda Hiroshi, Chou Tsu-Wei. Stiffness and strength of short fibre composites as affected by crack and plasticity. *Fibre Sci. and Technol.* 1981. Vol. 15. N 4. P. 243–256.
3. Кундрат Н.М. Локальное разрушение ортотропной матрицы с линейным включением. *Прикладная механика.* 1996. Том 32. № 8. С. 63–71.
4. Brussat T.R., Westmann R.A. Interfacial slip around rigid fiber inclusions. *J. Comp. Mater.* 1974. Vol. 8. N 4. P. 364–377.
5. Kundrat M.M. Working length of a high-modulus linear inclusion under the action of concentrated cyclic forces within the framework of plane problem. *Materials Science.* 2016. Vol. 52. N 1. P. 72–82.
6. Silovanyuk V.P. The plastic flow in a rigid disk-shaped inclusion in a transversely isotropic material. *Materials Science.* 1987. Vol. 23. N 5. P. 531–534.
7. Sulym H.T., Kundrat M.M. Limiting equilibrium and fracture in an orthotropic body containing a thin rigid inclusion. *Materials Science.* 2006. Vol. 42. N 2. P. 220–232.
8. Шапи К. Механизм передачи нагрузки через поверхность раздела. В кн.: Композиционные материалы: в 8-и томах. Т.6. Поверхности раздела в полимерных композитах. Москва: Мир. 1978. С. 42–87.
9. Gdoutos E.E., Giannakopoulou A. Stress and failure analysis of brittle matrix composites. Part1: Stress analysis. *Int. J. Fract.* 1999. Vol. 98. P. 263–277.
10. Kim J.K., Mai Y.W. Engineered interfaces in fiber reinforced composites. Amsterdam: Elsevier Science Ltd. 1998. 418 p.
11. Kundrat M.M. Delamination of an element of reinforcement of the half plane under cyclic loading. *Materials Science.* 2022. Vol. 57, N 5. P. 745–749.
12. Sulym H.T., Pasternak I.M., Tretiak T.V. Modeling of deformable thermoelastic thread-like inclusions in isotropic



media. *J. of Mathem. Science*. 2023. Vol. 274. N 5. P. 660–677. **13.** Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. Москва: Наука. 1974. 640 с. **14.** Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. Москва: Наука. 1977. 416 с. **15.** Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. Москва: Мир. 1982. 232 с.

REFERENCES:

1. Sulym G.T. Fundamentals of the mathematical theory of thermoelastic equilibrium of deformable solids with thin inclusions. Lviv: Research and Publishing Center of the National Technical School. 2007. 716 p. **2.** Fukuda Hiroshi, Chou Tsu-Wei. Stiffness and strength of short fibre composites as affected by crack and plasticity. *Fibre Sci. and Technol.* 1981. Vol. 15. N 4. P. 243–256. **3.** Kundrat N.M. Local destruction of an orthotropic matrix with linear inclusion. *Applied mechanics*. 1996. Vol. 32. No. 8. P. 63–71. **4.** Brussat T.R., Westmann R.A. Interfacial slip around rigid fiber inclusions. *J. Comp. Mater.* 1974. Vol. 8. N 4. P. 364–377. **5.** Kundrat M.M. Working length of a high-modulus linear inclusion under the action of concentrated cyclic forces within the framework of plane problem. *Materials Science*. 2016. Vol. 52. N 1. P. 72–82. **6.** Silovanyuk V.P. The plastic flow in a rigid disk-shaped inclusion in a transversely isotropic material. *Materials Science*. 1987. Vol. 23. N 5. P. 531–534. **7.** Sulym H.T., Kundrat M.M. Limiting equilibrium and fracture in an orthotropic body containing a thin rigid inclusion. *Materials Science*. 2006. Vol. 42. N 2. P. 220–232. **8.** Shamy K. The mechanism of load transfer through the interface. In the book: *Composition materials: in 8 volumes*. T.6. Interfaces in polymer composites. Moscow: Mir. 1978. P. 42–87. **9.** Gdoutos E.E., Giannakopoulou A. Stress and failure analysis of brittle matrix composites. Part1: Stress analysis. *Int. J. Fract.* 1999. Vol. 98. P. 263–277. **10.** Kim J.K., Mai Y.W. Engineered interfaces in fiber reinforced composites. Amsterdam: Elsevier Science Ltd. 1998. 418 p. **11.** Kundrat M.M. Delamination of an element of reinforcement of the half plane under cyclic loading. *Materials Science*. 2022. Vol. 57, N 5. P. 745–749. **12.** Sulym H.T., Pasternak I.M., Tretiak T.V. Modeling of deformable thermoelastic thread-like inclusions in isotropic media. *J. of Mathem. Science*. 2023. Vol. 274. N 5. P. 660–677. **13.** Cherepanov G.P. Mechanics of brittle fracture. Moscow: Nauka. 1974. 640 p. **14.** Lekhnitsky S.G. Theory of elasticity of an anisotropic body. Moscow: Nauka. 1977. 416 p. **15.** Fujii T., Dzako M. Mechanics of destruction of composite materials. Moscow: Mir. 1982. 232 p.

Kundrat M.M. ^[1: 0000-0001-6085-564X],
Doctor of Eng. Sci., Prof.

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

EXFOLIATION THE THIN REINFORCEMENT IN AN ORTHOTROPIC BODY UNDER CYCLIC LOADING

Exfoliation of the flexible ribbon-like inclusion in orthotropic composition in conditions of plane problem under cyclic stress loading at infinity are researched. The development of localized zones of prefracture (weakened contact), which may correspond to the area of accumulation of damage, partial rupture of ties, etc. are precedes the exfoliation. We assume that in the vicinity of the ends of the inclusion, with a certain combination of amplitude values and the number of load cycles, there will be sliding delamination, which will advance along the material separation boundary from each edge to the central part. The length of the reinforcement without fragments peeled off at the ends is called the working length of the reinforcement. The coefficient of friction on the exfoliated part is assumed to be zero.

Analytical dependences for changing the working length of the inclusion depending on the amplitude of the load and the number of cycles and the parameters of the orthotropic matrix are obtained. An energy criterion was used to construct the delamination equation, which assumes the existence of a critical value of energy necessary for the working length of the inclusion to decrease by a unit of length, which is considered a known characteristic of the composition. For a continuous load, the solution of the problem is reduced to the Cauchy problem for a first-order differential equation, and for a cyclic – to the integration of a given function from the load parameters and the elastic and strength characteristics of the system.

For a given load per cycle and a predetermined number of cycles, using the obtained formulas, it is always possible to choose the length of the reinforcing element in such a way that its peeling does not exceed the predetermined value (or does not occur at all). The speed of exfoliation depends significantly on the initial working length of the inclusion (it is longer for a longer one) and the maximum load per cycle. The reinforcing element in the middle part under the conditions of the problem remains connected to the base. The orthotropy parameters of the composite components significantly affect the delamination process. Orientation of the inclusion along the

direction of greater matrix stiffness is preferable both for preserving its integrity and for the possibility of protecting it from delamination.

Keywords: reinforcement, exfoliation, zone of prefracture, working length, amount of cycles.

Отримано: 21 січня 2026 року
Прорецензовано: 27 лютого 2026 року
Прийнято до друку: 27 березня 2026 року



© 2026 [Kundrat M.M.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).