

## Обґрунтування перспективності застосування полімерно-керамічних композитів з ієрархічною структурою для авіаційних технологій

Походенко О.Т., асп., Карвацький А.Я., д.т.н., проф.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

*На підставі аналізу сучасних наукових досліджень розглянуто причини істотних обмежень традиційних матеріалів та обґрунтовано перспективні напрями розробки та застосування полімерно-керамічних композитів на основі структурних принципів природної кісткової тканини для підвищення витривалості до втоми та залишкової несучої здатності профільних елементів авіаційної техніки.*

**Ключові слова:** біоміметика, полімерно-керамічні композити, ієрархічна структура, авіаційні профільні елементи, витривалість до втоми.

**Вступ.** Зростання вимог до масової ефективності, втомної довговічності та стійкості до локальних пошкоджень у конструкційних елементах авіаційної техніки робить традиційні матеріали, алюмінієві сплави та класичні вуглепластики, недостатньо ефективними для вирішення сучасних інженерних задач. Аналіз сучасних досліджень показує, що виникнення деламінації (**розшарування**) (рис. 1), локального зминання, втрати стійкості та втомних пошкоджень суттєво обмежує ресурс та експлуатаційну надійність профільних елементів, зокрема стрингерів, швелерів і рамних підсилювачів [1]. Це актуалізує потребу у матеріалах нового типу, здатних забезпечувати контрольований розподіл жорсткості та підвищену витривалість до втоми (рис. 2).

Одним із перспективних напрямів є використання біоміметичної структури, в основі якої побудована природна кісткова тканина. Кістка поєднує кортикальну оболонку, що забезпечує високу жорсткість та пористу внутрішню структуру, яка поглинає енергію і перешкоджає розвитку локальних дефектів. Її багаторівнева організація, продемонстрована в сучасних міждисциплінарних дослідженнях, яка розглядається як один із найефективніших природних прототипів для конструкційних матеріалів з оптимізованими характеристиками міцності та стійкості до руйнування [3, 4]. Особливості структури чітко впливають на властивості матеріалу, наприклад, на витривалість до тріщиноутворення, що підтверджується відповідними дослідженнями [5] (рис. 3).

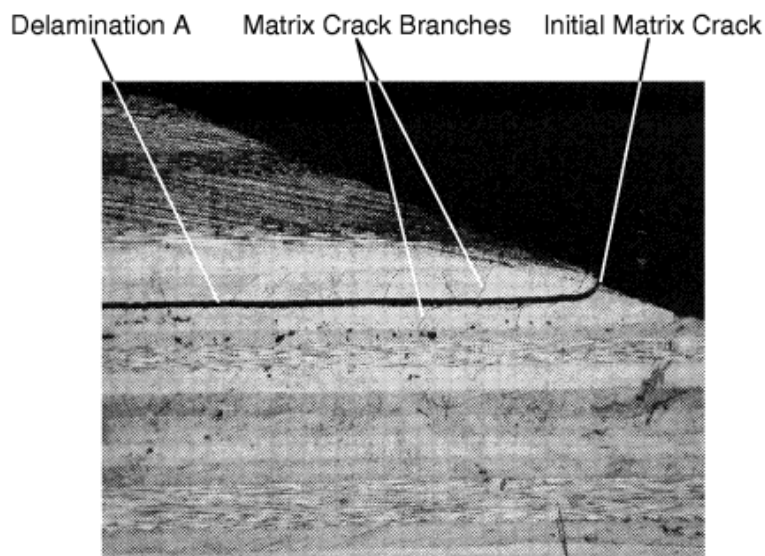


Рисунок 1 – Вигляд зразка з боку, що піддався деламінації під час триточкового згину [1]

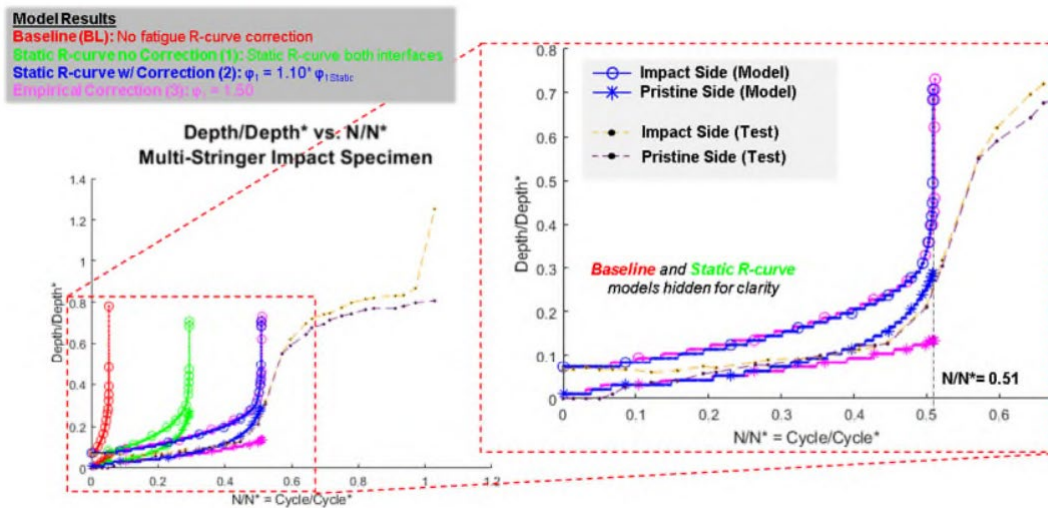


Рисунок 2 – Тріщиноутворення залежно від кількості циклів навантаження для зразків та моделей багатореберних панелей [2]

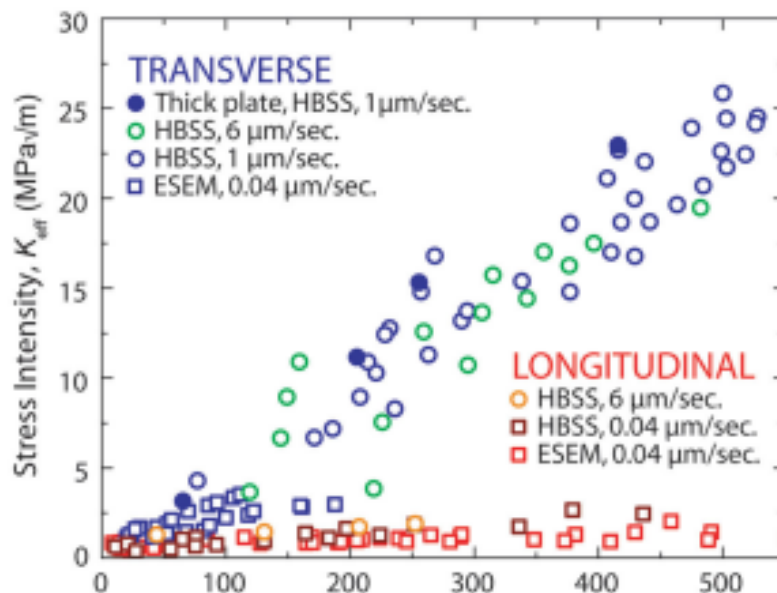


Рисунок 3 – Залежність градієнту тиску від швидкості тріщиноутворення в кістці [5]

Перспективність перенесення цих принципів на авіаційні профільні елементи підтверджується аналізом механізмів руйнування тонкостінних композитних панелей. Дослідження NASA та сучасні публікації з механіки композиційних матеріалів свідчать, що делямінація та локальне змінання часто ініціюються в зонах нерівномірного розподілу жорсткості: отворів, переходів перерізів та кріпильних ділянок [1, 6, 7]. Формування градієнтної полімерно-керамічної структури сприяє зменшенню ймовірності тріщиноутворення, забезпечуючи часткову ізоляцію локальних дефектів та підвищену залишкову несучу здатність.

Керамічна фаза композиту забезпечує підвищений модуль пружності й опір локальним деформаціям, тоді як полімерна матриця виконує роль енергоємного компонента, що поглинає напруження та перешкоджає розвитку тріщин. Згідно з сучасними підходами до адитивного виготовлення композитів [8], можливим є формування градієнтної структури, яка відтворює принцип «жорстка оболонка–пористе ядро». Це відкриває нові шляхи для оптимізації профільних авіаційних елементів за критеріями витривалості до втоми та роботи в умовах високого навантаження.

Особливу увагу привертають методи багаторівневого моделювання, які дають змогу прогнозувати поведінку таких матеріалів ще до проведення експериментів. Представницькі об'єми дають можливість описати структуру й механічну взаємодію фаз на мікрорівні, а побудова зв'язаних моделей мікро- та макромасштабу – оцінити поведінку складних профілів у реальних умовах навантаження авіаційних елементів [2, 9, 10]. Це створює можливість для розробки високоточних моделей, що дають змогу прогнозувати ефекти локалізації напружень, втрату стійкості та розвиток втомних пошкоджень.

**Висновки.** Проведений аналіз свідчить про те, що поєднання полімерно-керамічної композиції з біоміметичною ієрархічною структурою є перспективним напрямом подальших досліджень. Передбачається, що такі матеріали можуть забезпечити суттєве підвищення витривалості до втоми, зниження маси силових елементів та покращення їхньої поведінки в умовах високих навантажень, що відповідає стратегічним напрямам розвитку сучасного авіабудування.

#### Перелік посилань

1. Krueger R., O'Brien T. Testing and Analysis of Composite Skin/Stringer Debonding under Multi-Axial Loading. NASA Technical Report. TM-1999-209097 ARL-MR-439. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990025561/downloads/19990025561.pdf>
2. Integration of Fatigue R-Curve Effects into VCCT for Durability Predictions, Part 2: Buckled Composite Multi-Stringer Stiffened Panels. NTRS – NASA Technical Reports Server. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220017736>
3. Hydroxyapatite-Based Natural Biopolymer Composite for Tissue Regeneration / W. Alkaron, A. Almansoori, K. Balázs, C. Balázs // Materials. 2024. Vol. 17(16). art. ID 4117; <https://doi.org/10.3390/ma17164117>
4. Tabrizian P., Davis S., Su B. From bone to nacre – development of biomimetic materials for bone implants: a review // Biomaterials Science. 2024. Vol. 12, art. ID 5680. <https://doi.org/10.1039/d4bm00903g>
5. Zimmermann E.A., Ritchie R.O. Bone: Bone as a Structural Material // Advanced Healthcare Materials, 2015. Vol. 4, Issue 9. P. 1286. <https://doi.org/10.1002/adhm.201570054>
6. Multiscale Progressive Failure Analysis for Composite Stringers Subjected to Compressive Load / J. Shi, J. Zeng, J. Zheng, F. Shi, G. Yang, M. Tong // Materials. 2024. Vol. 13. art. ID 3169. <https://doi.org/10.3390/ma17133169>
7. Failure Analysis of Hat-Stringer-Stiffened Aircraft Composite Panels under Four-Point Bending Loading / B. Li, Y. Gong, Y. Gao, M. Hou, L. Li // Materials. 2022. Vol. 15(7). art. ID 2430. <https://doi.org/10.3390/ma15072430>
8. Dimasa L.S., Buehler M.J. Modeling and additive manufacturing of bio-inspired composites with tunable fracture mechanical properties // Soft Matter. 2014. Vol. 10. P. 4436-4442. <https://doi.org/10.1039/C3SM52890A>
9. Krueger R., Ratcliffe J. Analysis of Composite Panel-Stiffener Debonding Using a Shell/3D Modeling Technique. NASA/CR-2007-214879 NIA Report No. 2007-07. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070023724/downloads/20070023724.pdf>
10. Recent Advances in Hydroxyapatite-Based Biocomposites for Bone Tissue Regeneration in Orthopedics / I Ielo, G. Calabrese, G. De Luca, S. Conoci // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23(17), art. ID 9721; <https://doi.org/10.3390/ijms23179721>