

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-14>

УДК 621.763:539.3/539.4

ПОХОДЕНКО ОЛЕКСІЙ

КПІ імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0009-0009-7826-8967>

e-mail: olexa.pokhodenko@gmail.com

КАРВАЦЬКИЙ АНТОН

КПІ імені Ігоря Сікорського

<http://orcid.org/0000-0003-2421-4700>

e-mail: olexa.pokhodenko@gmail.com

БІОМІМЕТИЧНІ ПОЛІМЕРНО-КЕРАМІЧНІ КОМПОЗИТИ З ІЄРАРХІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ АВІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті проведено огляд та аналіз фізико-механічних властивостей біоміметичних полімерно-керамічних композитів з ієрархічною структурою, що за структурою близькі до будови кісткової тканини та перламутру, з метою оцінки їхнього потенціалу як конструкційних матеріалів для силових елементів авіаційної техніки.

Ключові слова: композит, фізико-механічні властивості, полімери, кераміка, моделювання.

POKHODENKO OLEKSIY, KARVATSKII ANTON

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

BIOMIMETIC POLYMER–CERAMIC COMPOSITES WITH HIERARCHICAL STRUCTURE FOR AEROSPACE TECHNOLOGIES

This paper presents a review and comparative analysis of the expected physical and mechanical properties of biomimetic polymer–ceramic composite materials with hierarchical internal architecture, developed in analogy to natural structural materials such as bone and nacre, with the aim of evaluating their applicability as structural alternatives to conventional aerospace alloys and composites used in load-bearing airframe components. The study begins by identifying the limitations of traditionally employed materials – aluminum alloys (Al 2024-T3, 7075-T6) and carbon fiber-reinforced polymers – in terms of damage tolerance, fatigue durability, and post-critical behavior under complex stress states. Against this background, biomimetic design principles are examined as a strategy for achieving superior combinations of stiffness, fracture toughness, and energy dissipation capacity. Particular attention is given to the hierarchical organization of bone tissue – comprising a dense cortical shell and a porous internal architecture – as an engineering model for polymer–ceramic composite design. Based on a synthesis of available literature, the expected material composition of the proposed composite is formulated: an outer CFRP laminate shell functioning as a cortical analog, combined with a PEEK/PEKK polymer matrix reinforced with ceramic microspheres or porous Al_2O_3 filler. The scalability of mechanical properties through adjustment of matrix porosity and ceramic phase morphology is discussed in the context of theoretical models demonstrating flaw insensitivity at the nanoscale. A quantitative comparison of crack resistance coefficients for hierarchical and non-hierarchical composites of identical composition is presented, demonstrating that biomimetic architectural organization provides significantly higher crack resistance coefficient and fracture energy. The paper further presents finite element analysis of the stress–strain state in flat plates made from the proposed composite, aluminum alloy, and monolithic alumina under identical boundary conditions. The results confirm that the polymer–ceramic composite achieves a safety factor approximately five times greater than that of the aluminum alloy at more than 1.5 times lower density, while maintaining favorable specific strength characteristics relevant to airframe applications. The study concludes that biomimetic polymer–ceramic composites with hierarchical structure demonstrate considerable promise for aerospace structural applications, offering enhanced resistance to crack propagation, local buckling, delamination, and fatigue damage accumulation – failure modes critical to stringer, frame, and channel-section components of aircraft structures.

Keywords: biomimetic composite, polymer–ceramic materials, hierarchical structure, physical and mechanical properties, aircraft structures, modeling.

Стаття надійшла до редакції / Received 08.05.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Походенко Олексій, Карвацький Антон

Постановка проблеми

У сучасному авіабудуванні підвищуються вимоги до матеріалів, що застосовуються в силових елементах конструкцій каркасу літака. До цих вимог відносяться: низька щільність, висока питома міцність та здатність працювати в умовах складного напружено-деформованого стану, включно з втомними та посткритичними режимами. Традиційні алюмінієві сплави та класичні вуглепластики, які застосовуються в авіабудуванні, поступово вичерпують потенціал підвищення структурної ефективності, що стимулює пошук нових матеріалів і концепцій їхнього проектування [1]. На цьому тлі біоміметичні підходи привертають особливу увагу, оскільки природні структури, зокрема кісткові, демонструють унікальне поєднання жорсткості, енергоємності та багаторівневої організації, оптимізованої в процесі еволюції [2]. Архітектура кісткової тканини з її щільною зовнішньою оболонкою та внутрішньою пористою структурою може слугувати ефективною моделлю для відтворення у полімерно-керамічних композитних матеріалах, що можуть застосовуватись в авіабудуванні.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: аналіз сучасного стану застосування біоміметричних принципів для розробки полімерно-керамічних композитів та обґрунтування доцільності їхнього застосування в авіабудуванні.

Аналіз доступних джерел

У сфері матеріалознавства полімерно-керамічні композити посідають важливе місце завдяки здатності поєднувати механічні переваги наявності двох компонентів. Керамічні включення як армуючий компонент підвищують модуль пружності, термостійкість і опір локальному руйнуванню, тоді як полімерна матриця забезпечує в'язкість, енергоємність та опір тріщиноутворенню. Дослідження композитів цього типу демонструють, що навіть незначна об'ємна частка кераміки може суттєво впливати на структурну поведінку матеріалу, сприяючи підвищенню жорсткості й одночасно зменшуючи чутливість до дефектів [1, 3]. В авіаційних конструкціях такі властивості є критично важливими, оскільки забезпечують надійність профільних елементів у режимах складного навантаження [4].

У контексті біоміметики особливу цінність становлять підходи, що передбачають формування градієнтних або ієрархічних структур. У природних матеріалах подібні структури забезпечують раціональний розподіл матеріалу, що дає змогу поєднувати жорсткість і низьку ефективну щільність [5]. В авіаційних композитах ці принципи реалізують через орієнтацію армування, варіювання пористості, створення багатшарових систем та керованих внутрішніх морфологічних переходів [6]. Використання таких підходів відкриває перспективи створення конструкційних матеріалів із підвищеною стійкістю до втоми, локального змінання та ударних навантажень.

Профільні елементи (стрингери, швелери, рами) є критичними компонентами авіаційних конструкцій, і їхня робота супроводжується характерними видами руйнування: тріщиноутворення, пластичні деформації, деламінація. Як показують дослідження Krueger R., O'Brien T., одним із найбільш поширених механізмів деградації є деламінація, яка виникає внаслідок різниці жорсткості матриці та армувального елемента [7]. Деламінація здатна довгий час розвиватися непомітно, що створює небезпеку раптової втрати несучої здатності. Іншою критичною проблемою є місцеве змінання полиць і стінок профілю, що часто передують глобальній втраті стійкості тонкостінних елементів і визначає їхню граничну роботу [8]. Втомне руйнування, спричинене накопиченням мікротріщин у матеріалі, що також суттєво впливає на довговічність конструкцій та потребує детального експериментального дослідження, моделювання й прогнозування [9].

Використання біоміметичних полімерно-керамічних композитів для таких елементів як профільні компоненти каркаса літака, відкриває можливість зменшення впливу зазначених механізмів руйнування. Поєднання жорсткої оболонки й енергоємної внутрішньої структури дає змогу знижувати пікові напруження, згладжуючи їхній розподіл у небезпечних зонах та зменшуючи ймовірність інтенсивного розвитку тріщин [10]. Ієрархічні структури можуть забезпечувати підвищену залишкову несучу здатність після локальних пошкоджень, що є особливо важливим у випадку експлуатації профільних елементів у посткритичних режимах. Розроблені на цей час концепції створення полімерно-керамічних композитів також добре сумісні з адитивними технологіями (рис. 1), які дають змогу відтворювати складні внутрішні архітектури з високою точністю [11].

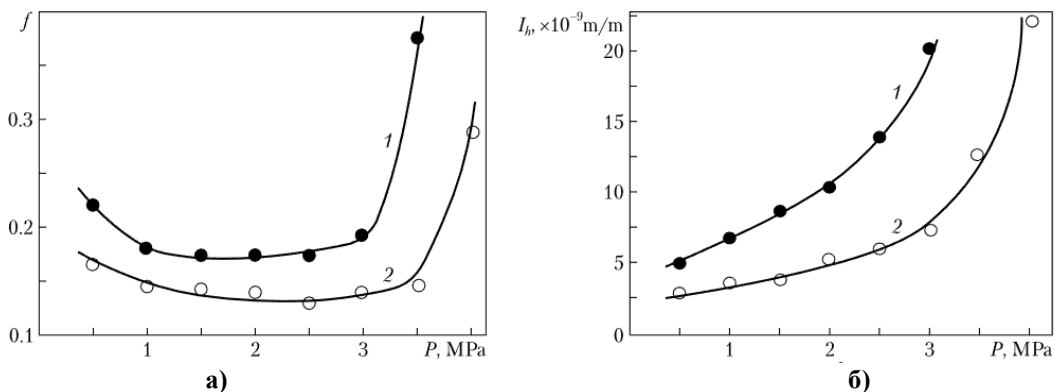


Рис. 1. Коефіцієнт тертя (f) та лінійна інтенсивність зношування (I_b) полімерних композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду (1) і фторполімеру (2), армованих вуглецевим матеріалом залежно від навантаження (P) під час взаємодії тертям зі сталлю [11]: а) – коефіцієнт тертя; б) – лінійна інтенсивність зношування

Перспективним напрямком також є моделювання представницьких об'ємів ієрархічних полімерних композитів, що дає змогу досліджувати взаємодію складових композиту на мікрорівні та визначати ефективні механічні характеристики матеріалу для подальшого застосування у макромоделях авіаційних елементів [12, 13]. Використання підходів багаторівневого моделювання забезпечує можливість точного прогнозування поведінки матеріалу в умовах складного навантаження та дає підстави для оптимізації його структури з урахуванням специфіки авіаційних конструкцій [6, 14].

Цінний теоретичний внесок у верифікацію ієрархічних біоміметичних матеріалів полягає в спробах зменшити чутливість матеріалів до дефектів на наномасштабному рівні. У праці Gao, Ji, Jäger, Arzt, Fratzl показано, що на наномасштабному рівні в пористій структурі матеріалу традиційна залежність міцності від дефектів і тріщин практично зникає, що призводить до нечутливості до дефектів у таких матеріалах [15]. Цей результат пояснюється тим, що локальні напруження не досягають критичних значень, які спричиняють нестабільне зростання тріщин, в той час як руйнування відбувається через контрольовані механізми дисипації енергії на нижчих рівнях ієрархії. У випадку біоміметичних полімерно-керамічних композитів це вказує на те,

що можливо досягти значного зменшення чутливості структурних елементів авіаційних конструкцій до виробничих дефектів, експлуатаційних пошкоджень і втомних мікротріщин, якщо масштаби внутрішньої архітектури та морфології фаз підібрані раціонально. Таким чином, нечутливість біоміметичних полімерно-керамічних матеріалів до дефектів, яка впливає з дослідження природних структур, також є потужним обґрунтуванням можливості використання ієрархічних біоміметичних принципів для розробки авіаційних композитів нового покоління.

Одне з таких розширень теоретичного обґрунтування біоміметичних підходів у матеріалознавстві можна знайти у праці Fratzl, Weinkamer, в якій розглядається природні матеріали як багаторівневі ієрархічні системи, пристосовані для ефективної передачі навантаження, стійкості до пошкоджень та адаптивної поведінки в ширшому масштабі [16]. Автори підкреслюють, що це розрізнення в першу чергу стосується структурних рівнів, і що замість окремих структурних рівнів, структурні рівні відіграють важливу роль в їхній функціональній взаємодії, де макрорівнева механіка стає наслідком механізмів, впроваджених на мікро- та мезорівнях. Кісткова тканина є структурою, в якій поєднання щільної зовнішньої оболонки та ієрархічно організованої внутрішньої структури забезпечує високу жорсткість, одночасно сприяючи розсіюванню енергії та локалізації пошкоджень. Для використання біоміметичних полімерно-керамічних композитів у застосуваннях авіаційних силових елементів такі принципи будови структури є надзвичайно важливими, оскільки вони надають підстави для планування дизайну структури матеріалу за допомогою багаторівневого моделювання напружено-деформованого стану, підтримки довговічності структури завдяки високій стійкості до пошкоджень та сприяння стабільній роботі структури матеріалу в посткритичних режимах [17].

У статті Zimmermann and Ritchie біоміметичні принципи розглядаються в контексті механічної ефективності природних матеріалів, де кісткова тканина виступає як інженерний структурний матеріал, а не лише як біологічний об'єкт. Автори досліджують взаємозв'язок між ієрархічною структурою кістки та її здатністю поєднувати високу жорсткість, стійкість до тріщин та толерантність до пошкоджень, вказуючи на те, що мікроструктурні механізми стримують ріст тріщин та сприяють розсіюванню енергії. Багаторівневі архітектурні елементи кісткової тканини також дають можливість мінімізації множинних механізмів деформації та руйнування, залежно від масштабу навантаження, і можуть запобігти катастрофічному руйнуванню навіть за наявності дефектів. Висновки цих досліджень, у контексті розробки біоміметичних полімерно-керамічних композитів для авіаційних силових елементів, є фундаментально важливими, оскільки вони демонструють, що поєднання жорсткої оболонки з організованою ієрархічною внутрішньою структурою може забезпечити стабільну роботу матеріалу в умовах складного напружено-деформованого стану, циклічних навантажень та локальних пошкоджень, характерних для авіаційних конструкцій [18].

Біоміметичні методи проектування матеріалів набувають більшої актуальності у формі ефективних природних композитів, наприклад, кісткова тканина та перламутр, що побудовані за подібними структурними принципами, пов'язаними з ієрархічною організацією з поєднанням жорстких і пластичних компонентів [19]. Це дає можливість прослідкувати шляхи вдосконалення подібних матеріалів на основі більш широкого спектру природних композитів і таким чином адаптувати їхні параметри під умови експлуатації. Механічна ефективність композиту визначається не тільки матеріальним його складом, але і структурною організацією, що визначає сукупні механічні властивості, пов'язані з підвищеною жорсткістю, стійкістю до тріщин (рис. 2, 3) і здатністю розсіювати енергію [16, 20].

Біоміметичні матеріали на основі природних композитів можуть бути здатні «контролювати» деформацію разом з механізмами руйнування, мінімізуючи можливість катастрофічного руйнування. У контексті створення полімерно-керамічних композитів для авіаційних силових елементів експериментальні дані підтвердили можливість отримати інноваційний матеріал, застосовуючи багаторівневу архітектуру як механізм контролю механічних властивостей композитів. Тобто його композитна форма здатна до найкращого компромісу між балансом навантаження, вагою, жорсткістю та стійкістю до пошкоджень під час складного навантаження.

Деталізований опис напружено-деформованого стану в околі дефектів є необхідною умовою для коректного прогнозування міцності та довговічності композитних елементів. Врахування вищих членів розкладу дають змогу точніше описувати локалізацію напружень і механізми ініціації росту тріщин, особливо в матеріалах з неоднорідною структурою. Для біоміметичних полімерно-керамічних композитів ці підходи є важливими з огляду на складну внутрішню архітектуру, в яких локальні концентрації напружень визначають загальну толерантність до пошкоджень силових елементів авіаційних конструкцій [13].

Загальний стан застосування композиційних матеріалів у авіаційній техніці узагальнено в оглядовій роботі Skoczylas, Samborski, Kłonica, де проаналізовано основні типи композитів, що використовуються в сучасних літальних апаратах [4]. Автори підкреслюють, що попри значний прогрес у впровадженні полімерних композиційних матеріалів, традиційні матеріали мають обмеження щодо толерантності до пошкоджень, втомної довговічності та поведінки в посткритичних режимах. Ці обмеження особливо проявляються в профільних і рамних елементах, що працюють у складному напружено-деформованому стані. Таким чином, наведений огляд створює обґрунтовану передумову для пошуку нових структурних рішень, зокрема біоміметичних композитів з ієрархічною архітектурою.

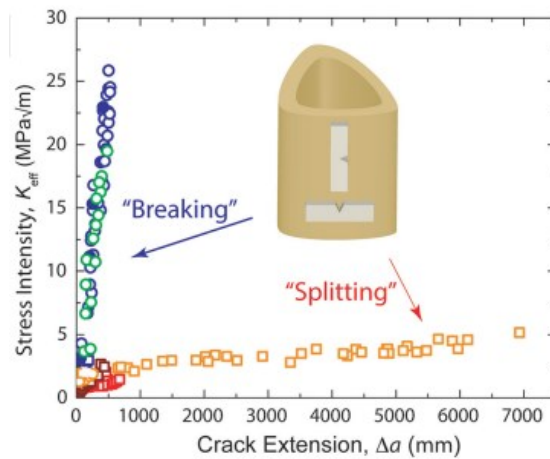


Рис. 2. Дослідження тріщиноутворення у кістковій тканині [1]

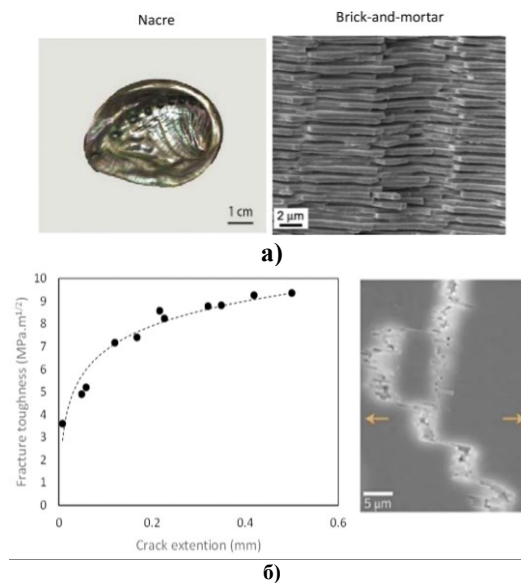


Рис. 3. Дослідження тріщиноутворення у перламутрі на мікро та макрорівні [1]: а) – структура матеріалу; б) – аналіз процесу поширення тріщин

Цілеспрямоване проектування матеріального складу та структури полімерно-керамічних композитів дає можливість досягати поєднання високої жорсткості, теплостійкості та низької щільності, що є критично важливим для силових елементів авіаційних конструкцій. Показано, що подальше підвищення експлуатаційних характеристик можливе не лише за рахунок хімічного складу модифікації матеріалу, а й шляхом оптимізації його внутрішньої архітектури. Ці висновки безпосередньо підтримують концепцію розроблення біоміметичних полімерно-керамічних композитів для рам, швелерів і стрингерів літальних апаратів [11].

Архітектурні аспекти проектування ієрархічних матеріалів детально розглянуто у праці Ліма та інших, присвяченій високоефективним структурованим матеріалам для функціональних застосувань [5]. Автори показують, що багаторівнева організація матеріалу дає змогу керувати розподілом напружень, деформацій та механізмів руйнування за рахунок поєднання жорстких і комплаєнтних компонентів. Хоча дослідження виконано поза авіаційним контекстом, наведені принципи ієрархічного дизайну є універсальними та можуть бути безпосередньо адаптовані до створення біоміметичних полімерно-керамічних композитів для авіаційного застосування. Зокрема, такі підходи відкривають можливості для формування градієнтних структур із заданими механічними властивостями в силових елементах авіаційних конструкцій.

Виклад основного матеріалу

На основі доступної інформації можна сформулювати очікуваний матеріальний склад композиту на основі кераміки та полімеру, та яким типам металевих сплавів у структурі літака він слугуватиме альтернативою, або заміною залежно від очікуваних експлуатаційних умов. Наприклад, для компонентів каркасу літака використовують такі сплави: Al 2024-T3, 7075-T6, або ж Ti-6Al-4V [20]. Полімерно-керамічні композити, які можуть слугувати заміниками вказаних сплавів, включають такі матеріали: CFRP-ламінат (вуглеволокно) та полімерна матриця (PEEK/PEKK або BMI/епоксид) для зовнішньої частини, що виступає у ролі кортикального кожура [19], полімер (PEEK/PEKK) + керамічні мікросфери/пористий керамічний наповнювач. Оскільки, згідно твердження, наведеного у статті Gao, Ji, Jäger, Arzt, Fratzl та інших [15] міцність та пружність подібних матеріалів може бути адаптована шляхом масштабування пористої структури матриці з керамікою. При цьому композит

матиме підвищену тріщиностійкість, зберігаючи властивості, що використовуються у авіабудуванні для компонентів каркасу в широковикористовуваних сплавах.

Продемонструємо підвищену тріщиностійкість біоміметичного або ієрархічного полімерно-керамічного композиту порівняно з композитами традиційної будови (без ієрархії) на прикладі матеріалу з однаковим складом – матриця (епоксид) + керамічні пластини, але різною будовою [21].

Для композиту без ієрархічної структури коефіцієнт K_0 тріщиностійкості становить [21]

$$K_0 \approx 4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}.$$

Базова енергія його руйнування G_0 визначається за формулою

$$G_0 = \frac{K_0^2}{E_{eff}} = \frac{(4 \cdot 10^6)^2}{30 \cdot 10^9} \approx 533 \text{ Дж/м}^2,$$

де $E_{eff} = 30$ ГПа – ефективне значення модуля пружності композиту без ієрархічної структури [22].

Для демонстрації переваги біоміметичного композиту використаємо загальну модель для визначення енергії його руйнування G_{eff} [23]

$$G_{eff} = G_0 + G_{defl} + G_{bridge} + G_{pullout},$$

де G_0 – базова енергія його руйнування, Дж/м²; $G_{defl} = G_0(\sec^2 \theta - 1)$ – енергія дефлекції, Дж/м²; θ – кут відхилення, рад; $G_{bridge} \approx \sigma_b \delta_b$ – енергія місткування тріщин, Дж/м²; σ_b – середнє місткове напруження, Па; δ_b – розмір відкриття тріщини, м; $G_{pullout} = \tau l V_f$ – енергія витягування волокон, Дж/м²; τ – дотичне напруження тріщиноутворення, Па; l – довжина армувальних волокон, м; V_f – об'ємна частка армування.

З врахуванням фізичних параметрів біоміметичного композиту (епоксид+керамічні пластини) (табл. 1) енергії його руйнування (1) становить

$$G_{eff} \approx 6567 \text{ Дж/м}^2.$$

Тоді коефіцієнт тріщиностійкості K_{eff} біоміметичного композиту буде становити

$$K_{eff} = \sqrt{G_{eff} E_{eff}} = \sqrt{6567 \cdot 30 \cdot 10^9} \approx 14 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}.$$

Таблиця 1

Фізичні параметри біоміметичного композиту

Параметр	θ , рад	σ_b , МПа	δ_b , мкм	τ , МПа	l , мм	V_f
Значення	$\frac{\pi}{4}$	50	20	30	0.5	0.3

Результати порівняння коефіцієнта тріщиностійкості ієрархічного керамічно-полімерного композиту (епоксид+керамічні пластини) з аналогами наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння коефіцієнтів тріщиностійкості K релевантних матеріалів.

Матеріал	K
Монолітна кераміка [24]	3–5
Звичайний композит [21]	4–6
Біоміметичний композит	~14

Проведені розрахунки показали, що полімерно-керамічний композит з ієрархічною будовою порівняно з композитами традиційної будови мають значно вищий (у більше ніж у 2 рази) запас тріщиностійкості, а отже і його потенціал використання в авіабудуванні, де вимоги до тріщиностійкості конструкційних матеріалів мають одне з першочергових значень, є надзвичайно високим.

Також, для демонстрації переваг полімерно-керамічного композиту над традиційними матеріалами проведено числове моделювання напружено-деформованого стану (НДС) пластини в наближенні плоско-деформованого стану (ПДС), що складається з різних матеріалів: полімерно-керамічного композиту, алюмінієвого сплаву 1060 і кераміки.

Пластина з полімерно-керамічного композиту включає п'ять шарів товщиною по 1 мм кожний (рис. 3): двох шарів зовнішньої оболонки з РЕЕК, двох шарів волокон з РЕЕК під кутом 45° та прошарку кераміки, утворюючи пластину товщиною в 5 мм. Алюмінієвий сплав і кераміка суцільним чином формують пластини товщиною 5 мм.

Схема навантаження пластини включає закріплення з бічних сторін по двох координатах і силове навантаження по середині пластини величиною 20000 Н (рис. 4). Механічні властивості вказаних матеріалів наведено в табл. 3.

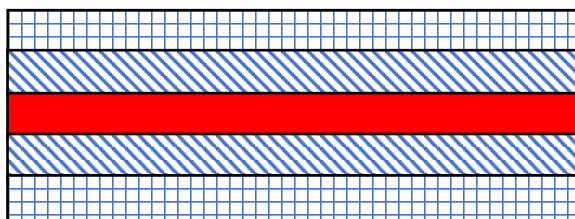
Таблиця 3

Механічні властивості матеріалів

Матеріал	PEEK (полімер)	Al ₂ O ₃ (кераміка)	Сплав 1060	Полімерно-керамічний композит*
Щільність, кг/м ³	1310	3960	2700	1710
Модуль Юнга, МПа	3900	370000	69000	74168
Коефіцієнт Пуассона	0.4	0.22	0.33	0.384
Границя текучості, МПа	100	250	27.6	110

* Примітка. Еквівалентні властивості визначено за Voight [25].

Для розв'язання задачі ПДС пластини використано метод скінченних елементів [26] і програмне забезпечення, розроблене на мові програмування Mathcad [27]. Для побудови геометрії пластини та її дискретизації скінченними трикутними елементами застосовано вільно відкрите програмне забезпечення Gmsh [28], а для візуалізації результатів розрахунків використано вільно відкритий програмний код ParaView [29].



Полімерна (кортикальна) оболонка (PEEK)

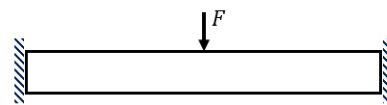
Полімерні волокна під кутом 45° (PEEK)

Кераміка (Al₂O₃)

Полімерні волокна під кутом 45° (PEEK)

Полімерна (кортикальна) оболонка (PEEK)

Рис. 3. Будова полімерно-керамічного композиту з ієрархічною внутрішньою структурою, де у ролі адгезивного матеріалу між шарами використовується Henkel Nysol EA 9394



100 × 5 мм; F = 20000 Н

Рис. 4. Схема навантаження пластини

Результати числового моделювання ПДС пластин наведено на рис. 5.

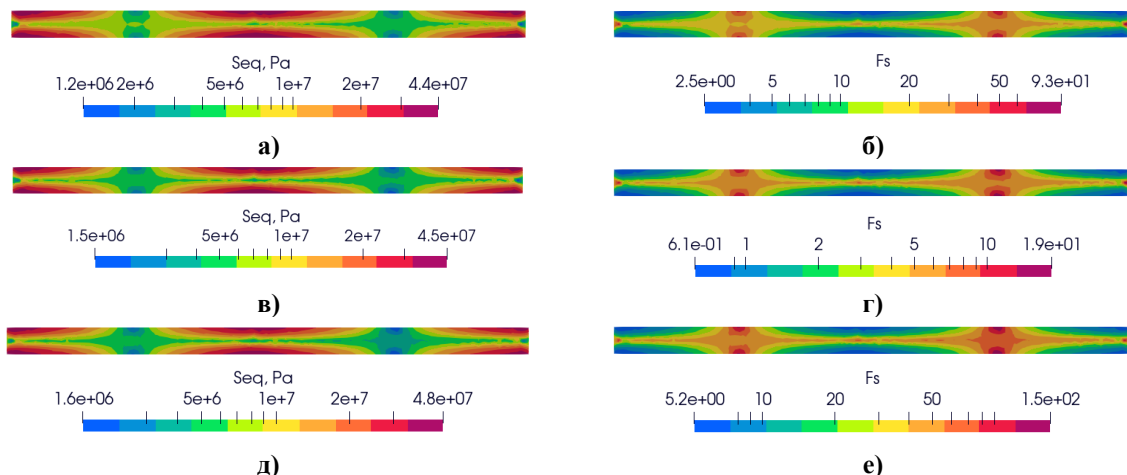


Рис. 5. ПДС пластини з різних матеріалів: а), б) – полімерно-керамічний композит; в), г) – сплав 1060; д), е) – Al₂O₃ (кераміка); а), в), д) – напруження; б), г), е) – запас міцності

Аналіз результатів розрахунків показує, що:

- на відміну від запасу міцності еквівалентні напруження в пластинах практично однакові (рис. 5);
- порівняно з алюмінієвим сплавом 1060 пластина з полімерно-керамічного композиту має запас міцності майже у 4–5 разів більший за більш ніж у 1.5 рази меншої щільності (табл. 3). Тобто полімерно-керамічний композит має високу питому міцність;

- запас міцності пластини з полімерно-керамічного композиту порівняно з керамічною дещо менший (більш ніж у 1.6–2 разів) за більш ніж у 2 рази меншої щільності (табл. 3);
- однак у підсумку за такими важливими для авіабудування показниками як запас тріщиностійкості (табл. 2), щільність (табл. 3) і питома міцність (у разі поперечного силового навантаження до шарів матеріалу) полімерно-керамічний композит демонструє значні переваги порівняно з традиційними матеріалами.

Отже, біоміметичні полімерно-керамічні композити з ієрархічною внутрішньою структурою демонструють значний потенціал для застосування в авіаційній техніці. Поєднання природно натхнених структурних принципів і сучасних технологій моделювання дає можливість створювати перспективні конструкційні матеріали [30], які можуть забезпечити підвищену стійкість, довговічність та ефективність у високонавантажених елементах літальних апаратів.

Висновки з даного дослідження

Біоміметичні полімерно-керамічні композити демонструють значний потенціал як матеріали для авіаційних конструкцій завдяки поєднанню високої жорсткості, низької маси та здатності до поглинання енергії. Їхня структура дає змогу ефективно розподіляти напруження та протидіяти руйнуванню, що робить їх перспективними для застосування у силових елементах авіаційної техніки. Подальші дослідження плануються виконувати в напрямках побудови структури та дослідження механічних властивостей полімерно-керамічних композитів з ієрархічною будовою із застосуванням методів багаторівневого моделювання, розробки рекомендацій щодо застосування запропонованих композитів в авіабудуванні.

Література

1. Tabrizian P. From bone to nacre – development of biomimetic materials for bone implants: a review / P. Tabrizian, S. Davis, B. Su // *Biomaterials Science*. – 2024. – Vol. 12, art. ID 5680. – DOI: <https://doi.org/10.1039/d4bm00903g>
2. Integration of Fatigue R-Curve Effects into VCCT for Durability Predictions, Part 2: Buckled Composite Multi-Stringer Stiffened Panels [Elektronnyi resurs] // NTRS – NASA Technical Reports Server. – Режим доступу : <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220017736>
3. Alkaron W. Hydroxyapatite-Based Natural Biopolymer Composite for Tissue Regeneration / W. Alkaron, A. Almansoori, K. Balázs, C. Balázs // *Materials*. – 2024. – Vol. 17(16), art. ID 4117. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17164117>
4. Skoczylas J. The application of composite materials in the aerospace industry / J. Skoczylas, S. Samborski, M. Kłonica // *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 5, No. 1. – P. 1–30 – DOI: <https://doi.org/10.35784/jteme.73>
5. Lim K. Material and structural considerations for high-performance electrodes for wearable skin devices / K. Lim, H. Seo, W.G. Chung, H. Song, M. Oh, S.Y. Ryu, Y. Kim, J.-U. Park // *Communications Materials*. – 2024. – Vol. 5, Article 49. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00490-8>
6. Zimmermann E.A. Bone as a Structural Material / E.A. Zimmermann, R.O. Ritchie // *Advanced Healthcare Materials*. – 2015. – Vol. 4, Issue 9. – P. 1286. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.201570054>
7. Krueger R. Testing and Analysis of Composite Skin/Stringer Debonding under Multi-Axial Loading [Elektronnyi resurs] / R. Krueger, T. O'Brien // NASA Technical Report TM-1999-209097 ARL-MR-439. – Режим доступу : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990025561/downloads/19990025561.pdf>
8. Shi J. 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. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133169>
9. Li B. 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. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072430>
10. Dimasa L.S. Modeling and additive manufacturing of bio-inspired composites with tunable fracture mechanical properties / L.S. Dimasa, M.J. Buehler // *Soft Matter*. – 2014. – Vol. 10. – P. 4436–4442. – DOI: <https://doi.org/10.1039/C3SM52890A>
11. Kabat O. Polymer composite materials of special purpose for the aerospace and rocket industry / O. Kabat, N. Bannyk, O. Voronyi // *Science and Innovation*. – 2025. – Vol. 21, No. 1. – P. 95–103. – DOI: <https://doi.org/10.15407/scine21.01.095>
12. Kanouté P. Multiscale Methods for Composites: A Review / P. Kanouté, D.P. Boso, J.L. Chaboche [et al.] // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2009. – Vol. 16. – P. 31–75. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-008-9028-8>
13. Malíková L. Williams expansion utilized for assessment of crack behaviour under mixed-mode loading in alkali-activated composite / L. Malíková, P. Miarka // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2021. – Vol. 44, No. 7. – P. 1151–1161. – DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ffe.13418>
14. Krueger R. Analysis of Composite Panel-Stiffener Debonding Using a Shell/3D Modeling Technique [Elektronnyi resurs] / R. Krueger, J. Ratcliffe // NASA/CR-2007-214879 NIA Report No. 2007-07. – Режим доступу :

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070023724/downloads/20070023724.pdf>

15. Gao H. Materials become insensitive to flaws at nanoscale: Lessons from nature / H. Gao, B. Ji, I.L. Jäger, E. Arzt, P. Fratzl // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2003. – Vol. 100(10). – P. 5597–5600. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0631609100>
16. Fratzl P. Nature's hierarchical materials / P. Fratzl, R. Weinkamer // Progress in Materials Science. – 2007. – Vol. 52, Issue 8. – P. 1263–1334. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.06.001>
17. Ishii M. NIMS polymer database PoLyInfo (I): an overarching view of half a million data points / M. Ishii, T. Ito, H. Sado, I. Kuwajima // Science and Technology of Advanced Materials: Methods. – 2024. – Vol. 4, Article 2354649. – DOI: <https://doi.org/10.1080/27660400.2024.2354649>
18. Zimmermann E.A. Bone as a Structural Material / E.A. Zimmermann, R.O. Ritchie // Advanced Healthcare Materials. – 2015. – Vol. 4(9). – P. 1287–1304. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.201500070>
19. Tabrizian P. From bone to nacre – development of biomimetic materials for bone implants: a review / P. Tabrizian, S. Davis, B. Su // Biomaterials Science. – 2024. – Vol. 12. – P. 5680–5703. – DOI: <https://doi.org/10.1039/D4BM00903G>
20. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-17). – Federal Aviation Administration : Battelle Memorial Institute, 2023. – Режим доступу : <https://www.robertlaminage.com/en/tools-and-technical-data/alloys-list>
21. Boccaccini A.R. Fracture behaviour of mullite fibre reinforced-mullite matrix composites under quasi-static and ballistic impact loading / A.R. Boccaccini, S. Atiq, D.N. Boccaccini, I. Dlouhy, C. Kaya // Composites Science and Technology. – 2005. – Vol. 65(2). – P. 325–333. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.08.002>
22. Callister W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. Tenth Edition / W.D. Callister, D. Rethwisch. – [S. l.] : Wiley, 2018. – ISBN 978-1-119-32159-0.
23. Gibson R.F. Principles of Composite Material Mechanics. Fourth Edition / R.F. Gibson. – [S. l.] : CRC Press, 2016. – ISBN 978-1-498-72072-4.
24. Hutchinson J. Mechanisms of Toughening in Ceramics / J. Hutchinson // Theoretical and Applied Mechanics. – 1989. – P. 139–144. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-87302-6.50017-X>
25. Соловей В.В. Визначення механічних властивостей 3d-друкованих полімерних виробів методами структурної механіки / В.В. Соловей, А.Я. Карвацький, Т.В. Лазарев, І.О. Мікульонок, І.В. Омелчук // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2021. – № 2. – С. 16–32. – DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2021.235853>
26. Карвацький А.Я. Метод скінчених елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Електронний ресурс] : навч. посіб. / А.Я. Карвацький. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 391 с. – Режим доступу : https://cpsm.kpi.ua/nauka/knigi/Tutorial_MSS.pdf.
27. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/> – (Дата звернення: 04.01.2026). – Назва з екрана.
28. Gmsh. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and postprocessing facilities [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://geuz.org/gmsh/> – (Дата звернення : 07.03.2026). – Назва з екрана.
29. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.paraview.org/> – (Дата звернення : 03.01.2026). – Назва з екрана.
30. Ielo I. 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. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23179721>

References

1. Tabrizian P. From bone to nacre – development of biomimetic materials for bone implants: a review / P. Tabrizian, S. Davis, B. Su // Biomaterials Science. – 2024. – Vol. 12, art. ID 5680. – DOI: <https://doi.org/10.1039/d4bm00903g>
2. Integration of Fatigue R-Curve Effects into VCCT for Durability Predictions, Part 2: Buckled Composite Multi-Stringer Stiffened Panels [Elektronnyi resurs] // NTRS – NASA Technical Reports Server. – Access mode : <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220017736>
3. Alkaron W. Hydroxyapatite-Based Natural Biopolymer Composite for Tissue Regeneration / W. Alkaron, A. Almansoori, K. Balázs, C. Balázs // Materials. – 2024. – Vol. 17(16), art. ID 4117. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17164117>
4. Skoczylas J. The application of composite materials in the aerospace industry / J. Skoczylas, S. Samborski, M. Kłonica // Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 5, No. 1. – P. 1–30 – DOI: <https://doi.org/10.35784/jteme.73>
5. Lim K. Material and structural considerations for high-performance electrodes for wearable skin devices / K. Lim, H. Seo, W.G. Chung, H. Song, M. Oh, S.Y. Ryu, Y. Kim, J.-U. Park // Communications Materials. – 2024. – Vol. 5, Article 49. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00490-8>
6. Zimmermann E.A. Bone as a Structural Material / E.A. Zimmermann, R.O. Ritchie // Advanced Healthcare Materials. – 2015. – Vol. 4, Issue 9. – P. 1286. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.201570054>
7. Krueger R. Testing and Analysis of Composite Skin/Stringer Debonding under Multi-Axial Loading [Elektronnyi resurs] / R. Krueger, T. O'Brien // NASA Technical Report TM-1999-209097 ARL-MR-439. – Access mode : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990025561/downloads/19990025561.pdf>
8. Shi J. 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. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133169>
9. Li B. 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. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072430>
10. Dimasa L.S. Modeling and additive manufacturing of bio-inspired composites with tunable fracture mechanical properties / L.S. Dimasa,

- M.J. Buehler // *Soft Matter*. – 2014. – Vol. 10. – P. 4436–4442. – DOI: <https://doi.org/10.1039/C3SM52890A>
11. Kabat O. Polymer composite materials of special purpose for the aerospace and rocket industry / O. Kabat, N. Bannyk, O. Voronyi // *Science and Innovation*. – 2025. – Vol. 21, No. 1. – P. 95–103. – DOI: <https://doi.org/10.15407/scine21.01.095>
 12. Kanouté P. Multiscale Methods for Composites: A Review / P. Kanouté, D.P. Boso, J.L. Chaboche [et al.] // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2009. – Vol. 16. – P. 31–75. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-008-9028-8>
 13. Malíková L. Williams expansion utilized for assessment of crack behaviour under mixed-mode loading in alkali-activated composite / L. Malíková, P. Miarka // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2021. – Vol. 44, No. 7. – P. 1151–1161. – DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ffe.13418>
 14. Krueger R. Analysis of Composite Panel-Stiffener Debonding Using a Shell/3D Modeling Technique [Elektronnyi resurs] / R. Krueger, J. Ratcliffe // NASA/CR-2007-214879 NIA Report No. 2007-07. – Access mode : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070023724/downloads/20070023724.pdf>
 15. Gao H. Materials become insensitive to flaws at nanoscale: Lessons from nature / H. Gao, B. Ji, I.L. Jäger, E. Arzt, P. Fratzl // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2003. – Vol. 100(10). – P. 5597–5600. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0631609100>
 16. Fratzl P. Nature's hierarchical materials / P. Fratzl, R. Weinkamer // *Progress in Materials Science*. – 2007. – Vol. 52, Issue 8. – P. 1263–1334. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.06.001>
 17. Ishii M. NIMS polymer database PoLyInfo (I): an overarching view of half a million data points / M. Ishii, T. Ito, H. Sado, I. Kuwajima // *Science and Technology of Advanced Materials: Methods*. – 2024. – Vol. 4, Article 2354649. – DOI: <https://doi.org/10.1080/27660400.2024.2354649>
 18. Zimmermann E.A. Bone as a Structural Material / E.A. Zimmermann, R.O. Ritchie // *Advanced Healthcare Materials*. – 2015. – Vol. 4(9). – P. 1287–1304. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.201500070>
 19. Tabrizian P. From bone to nacre – development of biomimetic materials for bone implants: a review / P. Tabrizian, S. Davis, B. Su // *Biomaterials Science*. – 2024. – Vol. 12. – P. 5680–5703. – DOI: <https://doi.org/10.1039/D4BM00903G>
 20. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-17). – Federal Aviation Administration : Battelle Memorial Institute, 2023. – Access mode : <https://www.robertlaminage.com/en/tools-and-technical-data/alloys-list>
 21. Boccaccini A.R. Fracture behaviour of mullite fibre reinforced-mullite matrix composites under quasi-static and ballistic impact loading / A.R. Boccaccini, S. Atiq, D.N. Boccaccini, I. Dlouhy, C. Kaya // *Composites Science and Technology*. – 2005. – Vol. 65(2). – P. 325–333. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.08.002>
 22. Callister W.D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Tenth Edition / W.D. Callister, D. Rethwisch. – [S. l.] : Wiley, 2018. – ISBN 978-1-119-32159-0.
 23. Gibson R.F. *Principles of Composite Material Mechanics*. Fourth Edition / R.F. Gibson. – [S. l.] : CRC Press, 2016. – ISBN 978-1-498-72072-4.
 24. Hutchinson J. Mechanisms of Toughening in Ceramics / J. Hutchinson // *Theoretical and Applied Mechanics*. – 1989. – P. 139–144. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-87302-6.50017-X>
 25. Solovei V.V. Vznachennia mekhanichnikh vlastivostei 3d-drukovanikh polimernikh virobiv metodami strukturnoi mekhaniki / V.V. Solovei, A.Ia. Karvatskii, T.V. Lazarev, I.O. Mikulyonok, I.V. Omel'chuk // *Visnik NTUU "KPI imeni Igora Sikors'kogo". Seriya: Khimichna inzheneriia, ekologiia ta resursozbezhehennia*. – 2021. – № 2. – P. 16–32. – DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2021.235853>
 26. Karvatskii A.Ia. Metod skinchennikh elementiv u zadachakh mekhaniki sutsil-nikh seredovishch. Programna realizatsiia ta vizualizatsiia rezul'tativ [Digital source] : navch. posib. / A.Ia. Karvatskii. – K. : NTUU "KPI", 2015. – 391 p. – Access mode : https://cpsm.kpi.ua/nauka/knigi/Tutorial_MSS.pdf
 27. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations [Digital source]. – Access mode : <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/> – (Date of access : 04.01.2026). – Title from screen.
 28. Gmsh. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and postprocessing facilities [Digital source]. – Access mode : <http://geuz.org/gmsh/> – (Date of access : 07.03.2026). – Title from screen.
 29. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application [Digital source]. – Access mode : <http://www.paraview.org/> – (Date of access : 03.01.2026). – Title from screen.
 30. Ielo I. 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. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23179721>