

В.Г. МАРТИНЕНКО

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ, ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ОЦІНКИ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЛОПАТОК РОТОРНИХ МАШИН

Робота розглядає методи кріплення та аналізу композиційних лопаток роторних машин, а саме варіанти з'єднання металевих та композиційних частин, підходи до створення розрахункової моделі та моделювання статичної і динамічної механічної поведінки композиційних лопаток та способи визначення їхньої міцності за різними критеріями з урахуванням особливостей з'єднань. З цією метою проведений детальний огляд наявних в літературі застосувань композиційних лопаток в роторних машинах різного призначення, а також наведені варіанти поєднання композиційних та металевих частин для визначення найбільш оптимального підходу до створення міцної лопатки, що складається з таких частин. Спосіб побудови розрахункової моделі включає в себе особливості кріплення, проілюстровані на прикладі композиційної лопатки ротора, яка містить сталевий хвостовик та композиційний аеродинамічний профіль із шарами різної товщини та ребрами жорсткості, що з'єднують дві бокові поверхні профілю та проходять вздовж радіального напрямку ротора від кореневого до периферійного перерізів профілю лопатки для забезпечення його міцності та конструкційної стійкості. Аналіз міцності композиційної лопатки виконується на основі критеріїв, спеціально розроблених для композиційних матеріалів, зокрема критерію Хашина. Конструкційну стійкість композиційного профілю лопатки запропоновано аналізувати під дією аеродинамічного тиску потоку для визначення його критичного значення, при якому може статись втрата стійкості за визначеними формами. Динамічні характеристики профілю знаходяться у вигляді власних частот та власних форм коливань з урахуванням переднапруженого стану від відцентрових сил та аеродинамічного тиску потоку. Ідентифікацію властивостей композиційного матеріалу аеродинамічного профілю лопатки пропонується проводити за допомогою чисельних експериментів та натурних експериментальних досліджень, а адекватність моделювання його механічної поведінки та міцності може бути перевірена на основі розглянутого у роботі стенду.

Ключові слова: профіль лопатки; композиційний матеріал; міцність; конструкційна стійкість; експериментальне дослідження.

The work considers methods of joining and analysis of composite blades of rotary machines, namely options for connecting metal and composite parts, approaches to creating a calculation model and modeling the static and dynamic mechanical behavior of composite blades, and techniques of determining their strength according to various criteria, taking into account the characteristics of connections. For this purpose, a detailed review of the applications of composite blades in rotary machines for various purposes, available in the literature, was carried out, as well as options for combining composite and metal parts were given to determine the most optimal approach to creating a strong blade consisting of such parts. The method of construction of the calculation model includes features of joints, illustrated on the example of a composite rotor blade, which contains a steel root and a composite airfoil with layers of different thicknesses and stiffening ribs connecting two side surfaces of the airfoil and passing along the radial direction of the rotor from the root to peripheral sections of the blade airfoil to ensure its strength and structural stability. The analysis of the strength of the composite blade is performed on the basis of criteria specially developed for composite materials, in particular, the Hashin criterion. It is proposed to analyze the structural stability of the composite blade profile under the influence of the aerodynamic pressure of the flow to determine its critical value, at which the buckling may occur by certain shapes. The dynamic characteristics of the airfoil are found in the form of natural frequencies and natural forms of vibrations, taking into account the prestressed state from centrifugal forces and the aerodynamic pressure of the flow. It is proposed to identify the properties of the composite material of the blade airfoil using numerical experiments and full-scale experimental studies, and the adequacy of the modelling of its mechanical behavior and strength can be checked on the basis of the rig considered in the work.

Keywords: blade airfoil; composite material; strength; structural stability; experimental investigation.

Вступ. Композиційні матеріали широко застосовуються в багатьох галузях промисловості від пластин і оболонок, які використовуються в системах ремонту, таких як газопроводи [1], до високонавантажених ступенів вентиляторів турбореактивних двигунів, які можуть бути під впливом не тільки від статичних і перехідних навантажень [2], а й від ударів сторонніх предметів [3, 4], а також відповідальних компонентів ракет [5].

Одним із найпопулярніших застосувань композитів у роторних машинах є ті, що базуються на відновлюваній енергії, а саме вітрові [6] та припливні [7] турбіни.

Лопаті вітрогенератора є складними тонкостінними конструкціями [8], які потребують кількох етапів попереднього проектування [9] та оптимізації [10], одним із яких є забезпечення міцності та довговічності конструкції. На відміну від елементів роторів машин, виготовлених із металевих сплавів, таких як сталь, міцність яких зазвичай оцінюється за критерієм фон Мізеса (von Mises) [11], міцність композитних лопатей вітряних турбін визначається за більш складними критеріями, такими як Цай-Бу (Tsai-Wu) [12], Пака (Puck) [13] та Хашина (Hashin) [14]. Існує багато досліджень щодо міцності

та динаміки лопатей вітрових турбін з урахуванням різних ефектів. Наприклад, у роботі [15] досліджено залишкову міцність лопатей вітрової турбіни під впливом температури, ультрафіолетового випромінювання та вологості в поєднанні з втомними навантаженнями. У роботі [12] наведено методику врахування аеродинамічних навантажень на лопаті вітрогенератора під час виконання його міцнісного та модального аналізу. Інший модальний аналіз, але для умов заледеніння, проведено в дослідженні [16]. Незважаючи на те, що прогнозування терміну служби на основі розрахунків втоми матеріалу для вітрових турбін досліджувалося десятиліттями [17], це все ще є важливою темою в сучасних публікаціях [18]. Іншою важливою темою дослідження міцності лопатей вітрових турбін є механічні випробування зразків, виготовлених із матеріалів лопатей, для визначення та використання їх властивостей у розрахункових моделях, а також випробування лопатей турбін в цілому в повному масштабі [19] або в масштабованій [20] формі.

Другим напрямком використання композиційних матеріалів (не тільки скловолоконних, але й армованих вуглеволокном) для обертових машин є лопаті несучого гвинта вертольотів.

Дослідження щодо можливості використання композитних лопатей для несучих гвинтів гелікоптерів почалися десятиліття тому і тривали в державних дослідницьких центрах, таких як NASA [21, 22], у кваліфікаційних роботах для ступенів магістра [23, 24] та доктора філософії [25, 26], а також в окремих наукових виданнях [27]. Сучасний стан розробки розв'язку задачі міцності композитних лопатей гелікоптерів дозволяє з високою точністю прогнозувати їхні напруження [28, 29], створювати внутрішні структури лопатей шляхом морфінгу скручування для підвищення їхньої довговічності [30], виконувати моделювання та експериментальні дослідження стільникових та армованих волокнами лопатевих частин головних [31] та хвостових [32] лопаток гвинтів, проводити оптимізацію конструкції лопатей з огляду на міцність композиційного матеріалу [33], створювати моделі механічної поведінки композиційних лопатей під дією аеродинамічних навантажень [34] та ударів сторонніх предметів [35]. Останні дослідження, пов'язані з цією темою, також проводяться для гіропланів [36].

Іншим напрямком використання композиційних матеріалів для обертових лопаток турбомашин є газові турбіни і зокрема газотурбінні двигуни (ГТД). Хоча ранні дослідження розглядають металеві композити як матеріали для лопаток ГТД [37], а також композитні шари, що покривають центральне суцільне ядро, яке утворює цілісну монолітну єдину частину лопатки [38], найбільш перспективним застосуванням композитних матеріалів для ГТД, яке було запропоновано приблизно два десятиліття тому [39] і розвивається протягом останніх років, є композитні лопатки вентиляторів газотурбінних двигунів. Оскільки ці турбомашини є високонавантаженими, питання структурного аналізу та оптимального проектування композиційних лопаток вентиляторів ГТД стало одним із ключових факторів для їх успішного впровадження в реальні зразки [40, 41]. Не менш важливими є теми та дослідження, пов'язані з динамічними ефектами, що виникають у композиційних лопатках вентиляторів ГТД, як, наприклад, прогнозування довговічності [42], вибрації лопаток, спричинені тертям [43], та аналіз зіткнення з птахами з подальшим покращенням зон удару [44]. Крім того, є деякі дослідження щодо застосування та структурного аналізу композиційних матеріалів для зустрічних обертових ступенів вентилятора авіаційних двигунів [45], а також турбодетандерів [46].

Крім розглянутих раніше напрямків, в останні роки актуальною темою стало використання композиційних лопаток в вентиляторах цивільного застосування. Наприклад, у роботі [47] досліджуються коливання вентилятора аеродинамічної труби за допомогою експериментальних вимірювань. У статтях [48, 49] виконано механічне моделювання та експериментальне дослідження армованих скловолокном композиційних лопаток вентиляторів метро. У роботі [50] розглядається конструкція композиційних лопаток стельового вентилятора.

Приклади використання армованих вуглецем і скловолокном композитів у лопатках промислових осевих вентиляторів можна знайти в Інтернеті [51-53] і кожен з них відповідає різним застосуванням. Однак ця тема недостатньо задокументована як наукова проблема з точки зору міцності, і виробники, ймовірно, зберігають методології у формі внутрішнього дослідження як конфіденційну інформацію.

Отже, застосування композиційних матеріалів для виготовлення лопаток роторних машин є актуальною задачею, саме тому дана робота присвячена розробці методів теоретичного та експериментального дослідження міцності та динаміки композиційних аеродинамічних профілів лопаток роторів, що можуть бути використані як для створення нових зразків роторних машин, так і для заміни компонентів у вже існуючих.

1. Методи з'єднання, побудови розрахункової моделі та моделювання механічної поведінки композиційних лопаток. Необхідність з'єднання металевих і композиційних частин у турбомашині виникає через потребу інженерів використовувати такі переваги композитів, як легка вага та відносно висока міцність, але зберегти металеве виконання для деталей, де композити не застосовуються.

Як вже зазначалось, така необхідність може виникнути в елементах машин різного застосування, наприклад, у сегментах лопатей вертольотів [54] або з'єднаннях лопатей вітрових турбін [55-57].

Поєднання композиційних і металевих деталей може здійснюватися за допомогою клейових [58] та болтових [59, 60] з'єднань, а також заклепок, неклеювих з'єднань за формою, петлевого з'єднання [61, 62]. Штифтовим з'єднанням металевих деталей і композитів присвячено багато досліджень [63-67]. Крім того, існують різні способи металокомпозитних проникних з'єднань, наприклад одиночне з'єднання внахлест, ялинкове з'єднання Comeld, з'єднання HYPER, фронтальне з'єднання з подвійними пластинами, фронтальне з'єднання з шарами металевого сплаву, T-подібне з'єднання тощо [68, 69]. На додачу до перелічених способів, з'єднання між металевими та композиційними частинами може включати застосування процесів зварювання [70, 71] та інтерференційних мікроштифтів [72].

При побудові розрахункової моделі для моделювання механічної поведінки композиційної лопатки роторної машини також постає питання її з'єднання з іншими елементами, зробленими із металевих сплавів, зокрема сталі. Якщо композиційна лопатка є суцільною та з'єднується з металевими елементами за допомогою тертя [73] або болтових з'єднань [74], фіксацію композиційної частини ротора пропонується робити у місцях контакту з металевими частинами, відкидаючи їх як ті, що мають набагато більшу жорсткість у порівнянні з композиційним матеріалом. Проте існують й інші методи з'єднання композиційних та металевих частин.

Одним з найновіших методів нерозривного з'єднання металевих та композиційних елементів конструкції є метод, який передбачає переплетіння металевих волокон із скляними або вуглецевими зі сторони композиційної частини та зварювання цих металевих волокон із металевою частиною [75]. Згідно з дослідженнями, потрібно всього декілька шарів металевих волокон для того, щоб нерозривно з'єднати металеву та композиційну частини. У разі ж металевих волокон або матриці композиту, зварювання може відбуватись безпосередньо із ними.

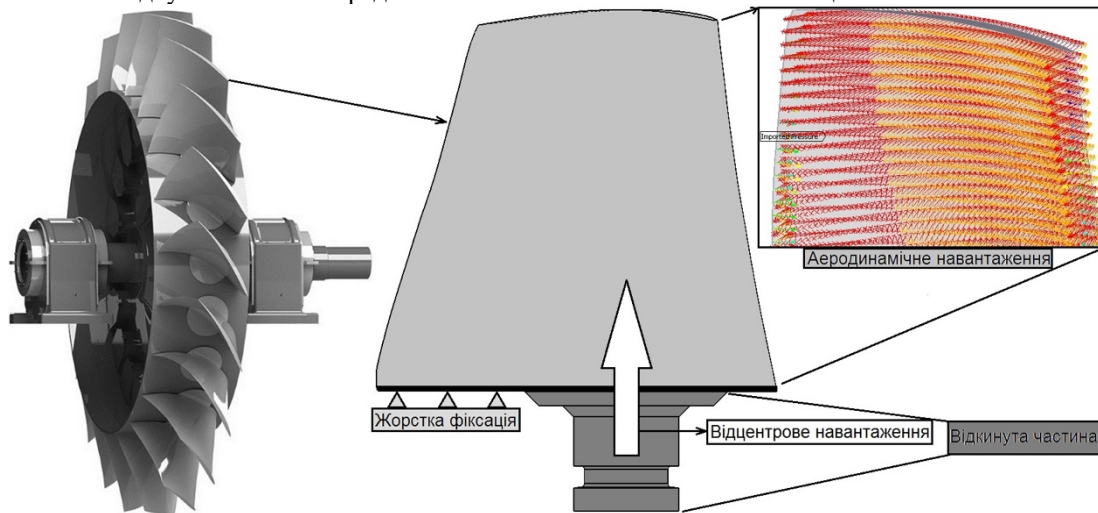


Рис. 1 – Розрахункова модель композиційної лопатки ротора під дією відцентрових та аеродинамічних навантажень

Одна лопатка зі сталевим коренем і композиційним аеродинамічним профілем піддається відцентровим і аеродинамічним навантаженням. Сталевим коренем пропонується нехтувати, щоб спростити розрахункову модель. Фіксація лопатки вважається абсолютно жорсткою для розрахунків на міцність, тому що з'єднання її профілю зі сталевим кореневим перерізом забезпечується по всьому нижньому торцю профілю завдяки значно більшій жорсткості сталі в порівнянні з композитом.

Для забезпечення жорсткості оболонкової частини композиційного аеродинамічного профілю, в його конструкцію можуть додаватись ребра жорсткості, що з'єднують дві бокові поверхні профілю та проходять вздовж радіального напрямку ротора від кореневого до периферійного перерізів профілю лопатки [77].

На рисунку 2 представлено схематичне зображення аеродинамічного профілю лопатки робочого колеса роторної машини.

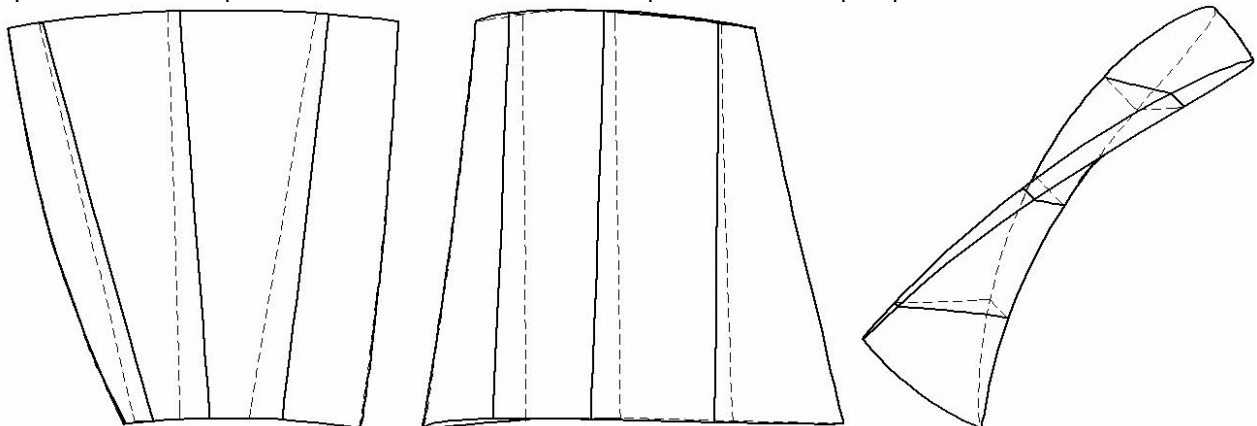


Рис. 2 – Схематичне зображення композиційного аеродинамічного профілю лопатки ротора з трьома ребрами жорсткості

На додачу до цього, для забезпечення оптимального співвідношення міцності та ваги композиційного профілю лопатки його частини можуть мати різну кількість та спрямованість

композиційних шарів, тобто товщину, що показує рисунок 3.

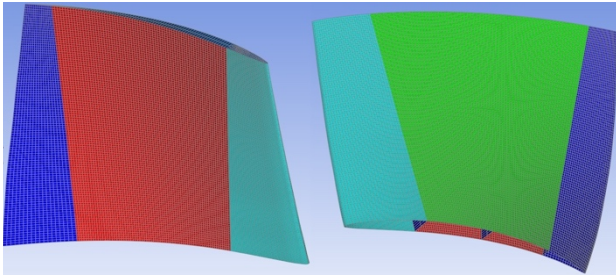


Рис. 3 – Частини композиційного профілю різної товщини

Таким чином, усі перелічені особливості композиційного аеродинамічного профілю лопатки повинні бути адекватно враховані під час побудови розрахункової моделі для моделювання механічної поведінки лопаток роторів, що повністю зроблені з композиційних матеріалів або містять в собі композиційні частини. Подальша побудова розрахункової моделі потребує використання методів дискретизації та моделювання, які є адаптованими для використання при розрахунках механічної поведінки та визначенні міцності композиційних конструкцій, що потребує розробки підходів до моделювання важливих ефектів та використання спеціальних критеріїв, що буде описано в наступному розділі.

2. Теоретичні підходи до визначення міцності, конструкційної стійкості та моделювання динаміки композиційних лопаток.

2.1. Рівняння турбулентної течії рідини.

Визначення навантажень (тиску) на контактні тверді поверхні від рухомої рідини в рідкому або газоподібному стані потребує аналізу механіки суцільних середовищ. Найбільш часто використовуваний підхід Ейлера розглядає компоненти векторів швидкості u_i в декартовій системі координат з осями x_i ($i = 1, 2, 3$). Система рівнянь Рейнольдса представляє рівняння збереження імпульсу для моделювання турбулентного потоку стисливої рідини та має вигляд (в нотації Ейнштейна):

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'}), \end{cases} \quad (1)$$

де t – змінна часу;

ρ – щільність рідини;

p – тиск рідини;

μ – динамічна в'язкість;

$\overline{\rho u_i' u_j'} = \tau_{ij}^T$ – компоненти турбулентного тензору

напружень Рейнольдса, які повинні бути визначені за допомогою додавання спеціальної моделі турбулентності до повної системи рівнянь Рейнольдса, серед яких [78]:

- модель Спаларта-Аллмараса [79];
- модель k - ε [80];
- модель k - ω [81];
- модель SST (shear stress transport), що є поєднанням двох попередніх [82].

2.2. Критерії статичної міцності композиційних елементів роторів.

Розв'язування задачі міцності твердих тіл, що деформуються, використовує підхід Лагранжа для механіки суцільних середовищ, який розглядає компоненти вектора переміщень твердих тіл як основну невідому.

На відміну від міцності ізотропних та анізотропних пластичних металевих конструкцій, які можна оцінити відповідно за критеріями Мізеса [83] та Хілла [84] шляхом порівняння розрахованих за цими критеріями еквівалентних напружень з експериментально визначеними границями міцності матеріалу, оцінка міцності композитних конструкцій вимагає спеціально розроблених для них критеріїв.

Рівняння Хілла дозволило Хоффману [85] розробити критерій крихкої міцності ортотропних матеріалів на прикладі односпрямованих композитних шарів. Цай та Ву в [86] розглянули загальний вигляд поверхні руйнування другого порядку за координатними напруженнями та ввели їх критерії міцності для окремих випадків симетрії анізотропних властивостей матеріалів. Хашин в [87, 88] запропонував критерій міцності односпрямованих шарів армованих композитів. У роботах [89, 90] виконано критичний аналіз критерію міцності Хашина, встановлено рамки його застосування та запропоновано власний критерій для цього типу композитів, позначений як LaRC03. Проте, як впливає із зазначених робіт і досліджень міцності скловолкна [91, 92], для розглянутого випадку достатньо використовувати двовимірний критерій Хашина.

Критерій Хашина пропонує розглядати функцію інваріантів напруженого стану, які утворюються координатними напруженнями σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$ у нотації Фойгта):

$$f_H = A_1 I_1 + B_1 I_1^2 + A_2 I_2 + B_2 I_2^2 + C_{12} I_1 I_2 + A_3 I_3 + A_4 I_4, \quad (2)$$

де $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, C_{12}$ – експериментально визначені коефіцієнти апроксимації поверхні $f_H = 1$, що містить стани матеріалу, які відповідають відсутності руйнування, всередині неї, тобто при $f_H < 1$;

I_1, I_2, I_3, I_4 – інваріанти напруженого стану, визначені формулами:

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_{11}; \\ I_2 = \sigma_{22} + \sigma_{33}; \\ I_3 = \sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}; \\ I_4 = \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2. \end{cases} \quad (3)$$

Тут передбачається, що напрямок 1 збігається з напрямком армування композиційного шару.

Зі сказаного вище впливає, що критерій міцності Хашина можна записати у вигляді:

$$f_H < 1, \quad (4)$$

а значення функції критерію Хашина f_H є показником статичної міцності композиційного матеріалу.

Слід зазначити, що міцність одного шару односпрямованого композиту можна визначити за критерієм Хашина. Оскільки композитна конструкція, як правило, є сендвічем шарів, розташованих у певних напрямках, міцність кожного з цих шарів слід визначати окремо, і аналіз інформації щодо найбільш небезпечного шару дає відповідь про міцність композиту, як показано на рисунку 4.

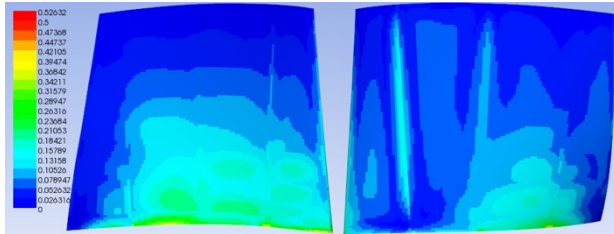


Рис. 4 – Графік розподілу функції критерію міцності Хашина в небезпечному шарі композиційного пера лопатки

2.3. Конструкційна стійкість оболонкових елементів композиційних лопаток. Розмір одного скінченного елемента дозволяє розглядати порожнисту багатшарову оболонку для будь-якої геометричної моделі. Тому для розрахунку критичного тиску такої оболонки можна використати таке співвідношення [93-95] (наведено для оболонки обертання для стислого викладу):

$$q(\lambda, n) = \frac{D_1}{R^2} \Phi_1(\lambda, n) + \frac{\bar{B}_2 R^2}{R_2^2} \frac{\Phi_R(\lambda, n)}{\Phi_2(\lambda, n)}, \quad (5)$$

де $\Phi_1(\lambda, n) = \lambda^4 + \alpha_1 \lambda^2 n^2 + \beta_1 n^4$;

$$\Phi_2(\lambda, n) = \lambda^4 + \alpha_2 \lambda^2 n^2 + \beta_2 n^4;$$

$$\Phi_R(\lambda, n) = (\lambda^2 + \frac{R_2}{R_1} n^2)^2;$$

$$\alpha_1 = 2(2 \frac{D_{12}}{D_1} + \nu_2), \quad \beta_1 = \frac{D_2}{D_1};$$

$$\alpha_2 = \frac{\bar{B}_2}{B_{12}} - 2\nu_2, \quad \beta_2 = \frac{B_2}{B_1}, \quad \bar{B}_2 = B_2(1 - \nu_1 \nu_2);$$

B_1, B_2, B_{12} – жорсткості багатшарового сендвіча на розтяг-стиск і зсув у площині обертання;

D_1, D_2, D_{12} – мінімальні жорсткості багатшарового сендвіча на згин і кручення;

R_1, R_2 – радіуси оболонки, які залежать від координати, що збігається з віссю x ;

R, l – характерні розміри оболонки;

$m, n, \lambda = \frac{m\pi R}{l}$ – параметри форми хвилі,

включені у вираз вигину оболонки:

$$w(x, y) = w_0 \sin \frac{\lambda x + ny}{R}, \quad (6)$$

де y – окружна координата.

На рисунку 5 показані форми такого вигину оболонки композиційного пера лопатки для прикладу, що розглядається.

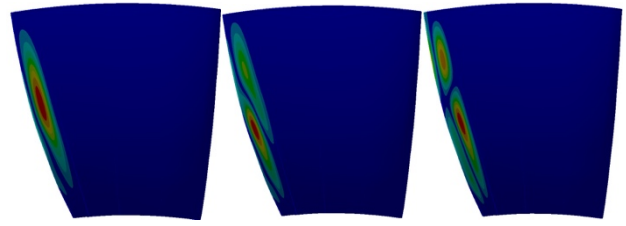


Рис. 5 – Форми втрати стійкості оболонки композиційного пера лопатки під дією критичних значень тиску

2.4. Динаміка аеродинамічного профілю композиційної лопатки. Для розрахунків динамічної поведінки композиційного профілю лопатки може бути використаний метод скінчених елементів рівняння динаміки пружного тіла, що деформується, в лінійній постановці та матричній формі [96]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t), \quad (7)$$

де $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ – матриці маси, демпфування та жорсткості відповідно;

$\mathbf{u}(t), \mathbf{f}(t)$ – вектори вузлових переміщень та сил.

Рівняння власних коливань отримують, якщо $\mathbf{C} = 0$ and $\mathbf{f}(t) = 0$:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = 0. \quad (8)$$

Гармонічна функція відгуку механічної системи розкладається на форми власних коливань (сума по i):

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_i \cos(\omega_i t). \quad (9)$$

Це дозволяє переписати рівняння (8):

$$(\mathbf{K} - \omega_i \mathbf{M})\mathbf{u}_i = 0. \quad (10)$$

Попередньо напружений стан, що залежить від вектору початкових вузлових напружень $\boldsymbol{\sigma}_0$, визначає матрицю зміцнення \mathbf{S} як доповнення до матриці жорсткості, в результаті чого отримують остаточне рівняння власних коливань системи:

$$(\mathbf{K} + \mathbf{S} - \omega_i \mathbf{M})\mathbf{u}_i = 0, \quad (11)$$

де ω_i – частоти власних коливань (власні частоти);

\mathbf{u}_i – форми власних коливань (власні форми), показані для прикладу на рисунку 6.

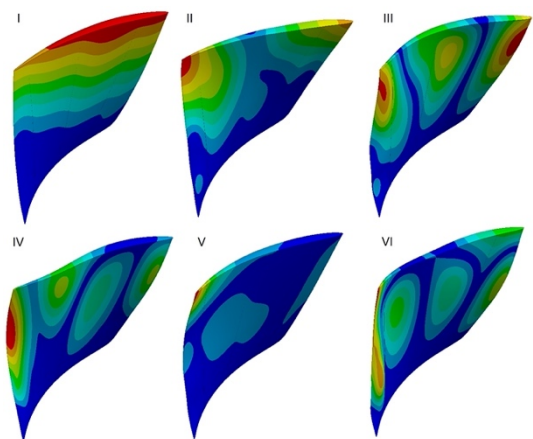


Рис. 6 – Форми власних коливань композиційного пера

3. Експериментальне визначення міцності композиційних лопаток.

3.1. Чисельна та експериментальна ідентифікація властивостей та критерію міцності матеріалу композиційної лопатки. З метою визначення параметрів за критеріями міцності для композиційних матеріалів можуть використовуватись як чисельні [97], так і експериментальні [92] методи.

Перевагою перших є відсутність потреби у натурних експериментах, а других – більша точність завдяки випробуванням реальних зразків, що враховують усі особливості виготовлення композиційного матеріалу.

При використанні чисельних експериментів для визначення параметрів критерію міцності композиційного матеріалу, зокрема критерію Хашина у виразах (2) та (3), може використовуватись представницький об'єм композиту, показаний на рисунку 7 для ортогонального армування.

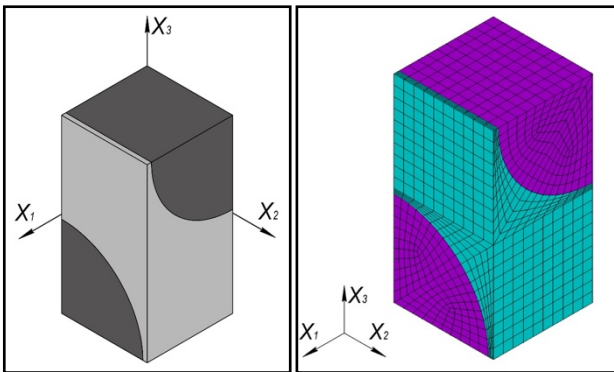


Рис. 7 – Геометрична (зліва) та розрахункова (справа) моделі представницького об'єму ортогонально армованого композиційного матеріалу

Модель представницького об'єму у розрахунках треба навантажити до руйнування вздовж координатних осей на розтягування та зсув таким чином, щоб утворити шість чисельних експериментів і, відповідно, рівнянь відносно шести коефіцієнтів у виразі (2), праві частини в яких дорівнюють 1, що відповідає руйнуванню композиційного матеріалу. Фактом руйнування композиційного матеріалу в розрахунковій моделі, що використовує неявні методи розв'язання системи рівнянь, можуть слугувати порушення критерію міцності матеріалів армуючих елементів, матриці чи клейового шару, або ж процес руйнування може моделюватись за допомогою розрахункової моделі, що використовує явні методи розв'язання системи рівнянь.

Таким же чином навантажуються композиційні зразки, зображені на рисунку 8, при проведенні реального експерименту. Оскільки навантаження композиційної пластини перпендикулярно до її площини ускладнено, альтернативно може використовуватись навантаження у площині під кутом до напрямку армування або під кутом до площини. Так виконуються шість типів експериментів з метою руйнування композиційних зразків та подальшого визначення коефіцієнтів критерію міцності.



Рис. 8 – Вирізані під різними кутами композиційні зразки

На рисунку 9 показані зруйновані композиційні зразки, що були вирізані під різними кутами. На ньому видно, що характер руйнування зразків при навантаженні їх вздовж волокон (зліва) відрізняється від характеру руйнування зразків при навантаженні їх під кутом 45° до напрямку волокон (справа).

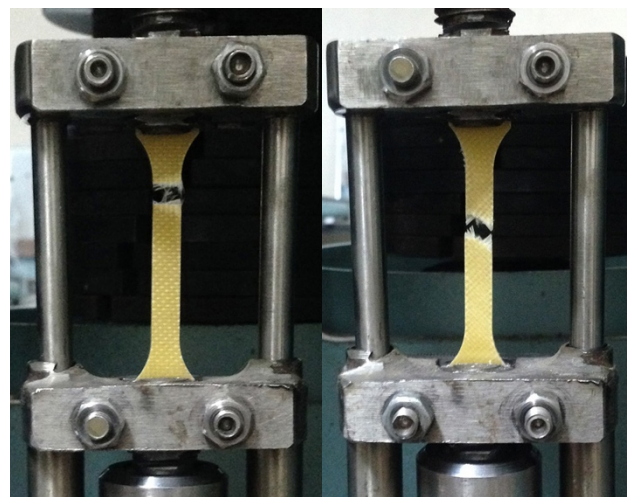


Рис. 9 – Розірвані композиційні зразки

Визначені за допомогою одновісних експериментів властивості та критерії міцності композиційного матеріалу використовуються для моделювання механічної поведінки та визначення міцності композиційного профілю лопатки за допомогою розрахунків (рис. 4). В подальшому такі розрахунки можуть бути підтверджені за допомогою експериментального дослідження на стенді, спеціально розробленому для навантаження складних та композиційних профілів лопаток роторів, що описаний в наступному пункті.

3.2. Експериментальний стенд для визначення міцності композиційної лопатки. Як було зазначено в розділі 1 та показано на рисунку 1, з'єднання композиційного пера лопатки зі сталевим кореневим перерізом може бути виконано за допомогою перехідного шару металевих волокон, приварених до сталевій частини та вплетених у композиційну частину разом із скляними волокнами. Оскільки таке з'єднання включає в себе вже три шари різних матеріалів, розрахункові визначення його міцності можуть бути підтверджені експериментальними дослідженнями, з метою проведення яких може бути використаний стенд, що застосовувався для визначення міцності з'єднання біметалічної лопатки [73] та зображений на рисунку 10.



а



б

Рис. 10 – Експериментальний стенд для визначення міцності з'єднання аеродинамічних профілів та хвостовиків композиційних лопаток: а – стенд без лопатки; б – стенд з лопаткою

Під час використання цього стенду сталевий хвостовик навантажується двома металевими брусами за допомогою гідравлічного преса, тоді як композиційний профіль лопатки утримується у

середніх перерізах. Таким чином забезпечується навантаження з'єднання між сталевим та композиційними частинами на розрив, що відповідає відцентровому навантаженню, що розтягує лопатку у радіальному напрямку при роботі машини.

Отже, підходи до визначення міцності та забезпечення надійної роботи композиційних лопаток роторів включають в себе теоретичні та чисельні дослідження, розрахункові та натурні експерименти для визначення властивостей композиційних матеріалів, а також моделювання і експериментальні дослідження механічної поведінки та міцності лопатки в цілому, зокрема з'єднання композиційних і металевих частин, що було продемонстровано в даній роботі на прикладі лопатки із композиційним аеродинамічним профілем та сталевим хвостовиком.

Висновки. В роботі були розглянуті засоби з'єднання металевих та композиційних частин, в результаті чого обраний найбільш оптимальний варіант для виконання лопатки, що складається зі сталевим хвостовиком та композиційного аеродинамічного профілю, що кріпляться між собою у кореневому перерізі за допомогою сталевих волокон, вплетених в армуючі елементи композиційного матеріалу та зварені із сталевим частиною. Для цього варіанту запропонована розрахункова модель для моделювання його механічної поведінки, а також визначення міцності, конструкційної стійкості та динамічних характеристик, для чого був проведений детальний літературний огляд та обрані підходи, що найбільш адекватно відповідають потребам дослідження композиційної лопатки. Для отримання властивостей композиційного матеріалу та перевірки розрахункових результатів розглянуті підходи до чисельного та експериментального визначення констант пружності та критерію міцності, а також експериментальний стенд, що дозволяє проводити дослідження міцності з'єднання композиційних та сталевих частин лопатки, моделюючи розтягуюче навантаження від дії відцентрових сил при встановленні лопатки у ротор машини, що обертається.

Таким чином, робота наводить замкнутий цикл до моделювання та експериментального дослідження статичної та динамічної механічної поведінки, а також міцності та конструкційної стійкості композиційної лопатки, поєднаної зі сталевими частинами. Проведений в роботі аналіз поточного стану вирішення проблеми, наведені методи, що найбільше підходять саме для композиційних лопаток, запропонована розрахункова модель та підходи до чисельного і експериментального визначення властивостей та міцності композиційної лопатки можуть бути корисними для інженерів та науковців, що є залученими до проектування нових роторних машин, які включають в себе композиційні елементи, що поєднані із металевими частинами та знаходяться під дією різних типів навантажень, зокрема у громадянському та аерокосмічному застосуваннях.

Фінансування. Це наукове дослідження виконане за підтримки МОН України в рамках реалізації науково-дослідної роботи «Розробка математичних моделей та методів розв'язання задач динаміки і міцності конструкцій з монокристалічних сплавів та метал-матричних композитів» (ДР № 0124U000975).

Список літератури

1. *Martynenko V.G.* An original technique for modeling of anisotropic viscoelasticity of orthotropic materials in finite element codes applied to the mechanics of plates and shells / *V.G. Martynenko* // *Mechanics and Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 21, No. 2. – P. 389-413.
2. *Merculov V.* Force Simulation of Bird Strike Issues of Aircraft Turbojet Engine Fan Blades / *V. Mercurlov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, V. Martynenko* // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 305. – P. 129-141. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_13
3. *Merculov V.* Peculiarities of the Modelling of the Bird Dynamic Impact on Fan Blades of an Aircraft Turbojet Engine at Operating Modes / *V. Mercurlov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, V. Martynenko* // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 367. – P. 462-473. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_39
4. *Merculov V.* Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models / *V. Mercurlov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, V. Martynenko* // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 59. – P. 1797-1803. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.381>
5. *Martynenko G.* Numerical simulation of missile warhead operation / *G. Martynenko, M. Chernobryvko, K. Avramov, V. Martynenko, A. Tonkonozhenko, V. Kozharin, D. Klymenko* // *Advances in Engineering Software*. – 2018. – Vol. 123. – P. 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.07.001>
6. *Brøndsted P.* Advances in wind turbine blade design and materials / *P. Brøndsted, R.P.L. Nijssen, S. Goutianos*. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2023. – 510 p.
7. *Jiang Y.* Structural analysis of a fibre-reinforced composite blade for a 1 MW tidal turbine rotor under degradation of seawater / *Y. Jiang, W. Finnegan, F. Wallace, M. Flanagan, T. Flanagan, J. Goggins* // *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. – 2023. – Vol. 9, No. 3. – P. 477-494. <https://doi.org/10.1007/s40722-023-00279-w>
8. *Silva Junior L.M.* Stress analysis of a thin-walled composite blade of a large wind turbine / *L.M. Silva Junior*. – Florianópolis: Federal University of Santa Catarina, 2016. – 116 p.
9. *Bir G.* Preliminary structural design of composite blades for two- and three-blade rotors / *G. Bir, P. Migliore*. – Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2004. – 30 p. <https://doi.org/10.2172/15009673>
10. *DiPalma M.* Optimization of extension-twist coupled composite blades for high-speed rotorcraft / *M. DiPalma, E. Ferede, F. Gandhi* // 74th American Helicopter Society Annual Forum. – Phoenix: Phoenix Convention Center, 2018. – P. 1-14.
11. *Martynenko V.* Analysis of Strength and Bearing Capacity of the Auxiliary Mine Ventilation Fan Connected to the Rotor of Its Electrical Drive / *V. Martynenko* // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2020. – P. 19-23. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250078>
12. *Fernandez G.* An efficient procedure for the calculation of the stress distribution in a wind turbine blade under aerodynamic loads / *G. Fernandez, H. Usabiaga, D. Vandepitte* // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2018. – Vol. 172. – P. 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.11.003>
13. *Ozyildiz M.* Strength analysis of a composite turbine blade using Puck failure criteria / *M. Ozyildiz, C. Muyan, D. Coker* // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1037. – P. 1-11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/4/042027>
14. *Dimitrov N.* Reliability analysis of a composite wind turbine blade section using the model correction factor method: Numerical study and validation / *N. Dimitrov, P. Fris-Hansen, C. Berggreen* // *Applied Composite Materials*. – 2013. – Vol. 20, No. 1. – P. 17-39. <https://doi.org/10.1007/s10443-011-9246-3>
15. *Gao J.X.* Residual strength assessment of wind turbine rotor blade composites under combined effects of natural aging and fatigue loads / *J.X. Gao, Z.W. An, Q. Ma, X.Z. Bai* // *Eksplotacja i Niezawodność*. – 2020. – Vol. 22, No. 4. P. 601-609. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.3>
16. *Lagdani O.* Modal analysis of an iced offshore composite wind turbine blade / *O. Lagdani, M. Tarfaoui, M. Nachtane, M. Trihi, H. Laaouidi* // *Wind Engineering*. – 2022. – Vol. 46, No. 1. – P. 134-149. <https://doi.org/10.1177/0309524X211011685>
17. *Nijssen R.P.L.* Fatigue life prediction and strength degradation of wind turbine rotor blade composites / *R.P.L. Nijssen*. – Wieringerwerf: Knowledge Centre: Wind Turbine Materials and Constructions, 2006. – 242 p.
18. *Muyan C.* Strength analysis of a 5-m composite wind turbine blade under static and fatigue loading conditions / *C. Muyan, D. Coker* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 942. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012045>
19. *Zhou H.F.* A review of full-scale structural testing of wind turbine blades / *H.F. Zhou, H.Y. Dou, L.Z. Qin, Y. Chen, Y.Q. Ni, J.M. Ko* // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 33. – P. 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.087>
20. *Morăraş C.I.* Structural testing by torsion of scalable wind turbine blades / *C.I. Morăraş, V. Goanţă, B. Istrate, C. Munteanu, G.S. Dobrescu* // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No. 19. – P. 3937. <https://doi.org/10.3390/polym14193937>
21. *Nixon M.W.* Preliminary structural design of composite main rotor blades for minimum weight / *M.W. Nixon*. – Hampton: NASA Scientific and Technical Information Office, 1987. – 25 p.
22. *Piatak D.J.* Stiffness characteristics of composite rotor blades with elastic couplings / *D.J. Piatak, M.W. Nixon, J.B. Kosmatka*. – Hampton: NASA Scientific and Technical Information Office, 1997. – 44 p.
23. *Moura G.A.* Approach for analysis and design of composite rotor blades / *G.A. Moura, R. Kolar* // *Journal of Aircraft*. – 1992. – Vol. 29, No. 4. – P. 516-523. <https://doi.org/10.2514/3.46221>
24. *Işık A.A.* Structural optimization of composite helicopter rotor blades / *A.A. Işık*. – Ankara: Middle East Technical University, 2018. – 142 p.
25. *Li L.* Structural design of composite rotor blades with consideration of manufacturability, durability, and manufacturing uncertainties / *L. Li*. – Georgia: Georgia Institute of Technology, 2008. – 107 p.
26. *Kumar D.* Design and analysis of composite rotor blades for active/passive vibration reduction / *D. Kumar*. – Michigan: University of Michigan, 2013. – 375 p.
27. *Chandra R.* Structural behavior of two-cell composite rotor blades with elastic couplings / *R. Chandra, I. Chopra* // *AIAA Journal*. – 1992. – Vol. 30, No. 12. – P. 2914-2921. <https://doi.org/10.2514/3.11637>
28. *Han S.* High-fidelity, 3D stress prediction for composite rotor blades / *S. Han, O.A. Bauchau* // 73rd American Helicopter Society Annual Forum. – Fort Worth, 2017. – P. 1-8.
29. *Kliza R.* Strength analysis of a prototype composite helicopter rotor blade spar / *R. Kliza, K. Ścisłowski, K. Siadkowska, J. Padyjasek, M. Wendeker* // *Applied Computer Science*. – 2022. – Vol. 18, No. 1. – P. 5-19. <https://doi.org/10.35784/acs-2022-1>
30. *Gu H.* Twist morphing of a composite rotor blade using a novel metamaterial / *H. Gu, A.D. Shaw, M. Amoozgar, J. Zhang, C. Wang, M.I. Friswell* // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 254. – P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112855>
31. *Maksimović S.* Strength analysis of helicopter main rotor blade made from composite material / *S. Maksimović, K. Maksimović, I. Vasović, M. Maksimović, D. Stamenković* // *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering*. – 2020. – Vol. 13. – P. 23-26.
32. *Hadăr A.* A novel composite helicopter tail rotor blade with enhanced mechanical properties / *A. Hadăr, A.D. Voicu, F. Baciuc, D. Vlăsceanu, D.I. Tudose, Ş.D. Pastramă* // *Aerospace*. – 2023. – Vol. 10, No. 7. <https://doi.org/10.3390/aerospace10070647>
33. *Tian S.* Structural design optimization of composite rotor blades with strength considerations / *S. Tian, F. Tao, H. Du, W. Yu, J.W. Lim, R.B. Haehnel, Y. Wenren, L.D. Allen* // *AIAA SCITECH*

- 2022 Forum. – San Diego: Manchester Grand Hyatt San Diego, 2022. <https://doi.org/10.2514/6.2022-2454>
34. Roy A.M. Finite element framework for efficient design of three dimensional multicomponent composite helicopter rotor blade system / A.M. Roy // Eng. – 2021. – Vol. 2, No. 1. – P. 69-79. <https://doi.org/10.3390/eng2010006>
 35. Yu G. Performance and damage study of composite rotor blades under impact / G. Yu, X. Li, W. Huang // Polymers. – 2024. – Vol. 16, No. 5. – P. 1-20. <https://doi.org/10.3390/polym16050623>
 36. Czyż Z. Autogyro main rotor blade strength tests / Z. Czyż, P. Podolak, K. Skiba, P. Jakubczak, P. Karpiński, P. Różyło // 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – Milan: Politecnico di Milano, 2023. – P. 199-204. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10190031>
 37. Signorelli R.A. Review of status and potential tungsten-wire - superalloy composites for advanced gas turbine engine blades / R.A. Signorelli. – Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1972. – 22 p.
 38. Benoit J.M.D. Gas turbine blade comprising layers of composite material / J.M.D. Benoit, B.J.G. Dambrine, L.J.P. David, P. Fouche, D.G. Girault, C.G.R. Grosbois, C.L.F. Guet // Google Patents – US5308228, 1994. – Available at: <https://patents.google.com/patent/US5308228A>. – Accessed: 5th of November 2024.
 39. Abumeri G.H. Composite fan blade design for advanced engine concepts / G.H. Abumeri, L.H. Kuguoglu, C.C. Chamis. – Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2004. – 12 p.
 40. Coroneos R.M. Structural analysis and optimization of a composite fan blade for future aircraft engine / R.M. Coroneos, R.S.R. Gorla // International Journal of Turbo and Jet-Engines. – 2012. – Vol. 29, No. 3. – P. 131-164. <https://doi.org/10.1515/tjj-2012-0024>
 41. Sung Y.J. A study on stacking sequence design of composite fan blades using multi-level optimization / Y.J. Sung, Y.U. Jun, J.S. Park // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1509. – P. 1-10. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1509/1/012019>
 42. Vimal R.K. Improving fatigue life of gas turbine fan blade using advanced composite materials / R.K. Vimal, G. Dhanjayan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 455. – P. 1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012035>
 43. Xiao J.G.Y. Numerical investigation of rub-induced composite fan blade vibrations and abradable coating removals / J.G.Y. Xiao, Y. Chen, J. Tian, H. Ou-Yang, A. Wang // Composite Structures. – 2019. – Vol. 226. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111274>
 44. Yella G. Bird-strike analysis on hybrid composite fan blade: blade-level validation / G. Yella, P. Jadhav, C. Lande // Aerospace. – 2023. – Vol. 10, No. 5. – P. 1-13. <https://doi.org/10.3390/aerospace10050435>
 45. Schmid T. Optimization of a carbon-fiber composite blade of a counter-rotating fan for aircraft engines / T. Schmid, T. Lengyel-Kampmann, T. Schmidt, E. Nicke // 13th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. – Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, 2019. – P. 1-12. <https://doi.org/10.29008/ETC2019-432>
 46. Nakonechnyi Y. Calculation of the stress-strain state of blades made of polymer composite materials of starting turboexpanders in resonance zones / Y. Nakonechnyi, I. Yarema, V. Batiuk // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – 2021. – Vol. 102, No. 2. – P. 45-53. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.02.045
 47. Porco P. Analysis of fan blade vibration with a non-contact method / P. Porco, R. Przysowa, D. Botto // Journal of Konbin. – 2020. – Vol. 50, No. 1. – P. 341-357. <https://doi.org/10.2478/jok-2020-0020>
 48. Zhu L. Mechanical simulation analysis of lightweight blades using glass fiber phenolic resin composites / L. Zhu, J. Xu, W. Zhang // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 769. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/3/032071>
 49. Qi B. Research on design of lightweight-blade metro fan based on glass fiber and phenolic resin composite / B. Qi, S. He, X. Cao // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 769. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/3/032070>
 50. Chandragowda M. Designing and enhancing the mechanical properties of composite fan blades by glass fiber reinforced polymer composites / M. Chandragowda, C. Chakrasali, R.S. Yogeshwara, G. Krishna, P. Abhishek // Journal of Scholastic Engineering Science and Management. – 2022. – Vol. 1, No. 1. – P. 16-25. <https://www.hortonww.com/on-highway/fans.html>. – Accessed: 5th of November 2024.
 51. HORTON On-Highway Fans. – Available at: <https://www.hortonww.com/on-highway/fans.html>. – Accessed: 5th of November 2024.
 52. MOSS COMPOSITES Axial Fan Composite Rotorblade. – Available at: <https://www.moss-composites.com/axial-fan-composite-blades>. – Accessed: 5th of November 2024.
 53. ESTA LTD Industrial Fans. – Available at: <https://esta-ltd.com.ua/en/products-3/fan-3>. – Accessed: 5th of November 2024.
 54. Simonović A. Laboratory tests of a hybrid metal-composite transport helicopter blade segment / A. Simonović, I. Kostić, S. Stupar, Z. Petrović // Experimental Techniques. – 2012. – Vol. 36. – P. 22-32. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00708.x>
 55. Wang Y. A finite element and experimental analysis of composite T-joints used in wind turbine blades / Y. Wang, C. Soutis // Applied Composite Materials. – 2018. – Vol. 25. – P. 953-964. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9711-3>
 56. Petersen E. Potential of fibre metal laminates in root joints of wind energy turbine rotor blades / E. Petersen, N. Englisch, L.-M. Brand, T. Mahrholz, C. Hühne // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2265. – P. 1-11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032039>
 57. Sørensen B.F. Joining structural parts of composite materials for large rotorblades (invited paper) / B.F. Sørensen, T.K. Jacobsen // Polymer composite materials for wind power turbines. Proceedings. – 2006. – P. 69-82.
 58. Nasreen A. Effect of surface treatment on stiffness and damping behavior of metal-metal and composite-metal adhesive joints / A. Nasreen, M.K. Bangash, K. Shaker, Y. Nawab // Polymers. – 2023. – Vol. 15. – P. 1-15. <https://doi.org/10.3390/polym15020435>
 59. Galińska A. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part I: Bolted joining / A. Galińska // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 10. – P. 1-48. <https://doi.org/10.3390/polym12102252>
 60. An Q. Aeronautical composite/metal bolted joint and its mechanical properties: a review / Q. An, C. Wang, T. Ma, F. Zou, Z. Fan, E. Zhou, E. Ge, M. Chen // Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment. – 2024. – Vol. 5. – P. 70-91. <https://doi.org/10.1108/JIMSE-12-2023-0012>
 61. Galińska A. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part II: Riveting, clinching, non-adhesive form-locked joints, pin and loop joining / A. Galińska, C. Galiński // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 8. – P. 1-40. <https://doi.org/10.3390/polym12081681>
 62. Lambiase F. A state-of-the-art review on advanced joining processes for metal-composite and metal-polymer hybrid structures / F. Lambiase, S.I. Scipioni, C.-J. Lee, D.-C. Ko, F. Liu // Materials. – 2021. – Vol. 14, No. 8. – P. 1-24. <https://doi.org/10.3390/ma14081890>
 63. Di Scalea F.L. On the effect of interference fits in composite pin-joints / F.L. Di Scalea, F. Cappello, G.L. Cloud // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 1999. – Vol. 12, No. 1. – P. 23-32. <https://doi.org/10.1177/089270579901200103>
 64. Parkes P.N. Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement / P.N. Parkes, R. Butler, J. Meyer, A. de Oliveira // Composite Structures. – 2014. – Vol. 118. – P. 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.019>
 65. Tang H. A novel metal-composite joint and its structural performance / H. Tang, L. Liu // Composite Structures. – 2018. – Vol. 206. – P. 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.111>
 66. Sarantinos N. Review of through-the-thickness reinforced composites in joints / N. Sarantinos, S. Tsantalis, S. Ucsnik, V. Kostopoulos // Composite Structures. – 2019. – Vol. 229. – P. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111404>
 67. Liu L. A study of the damage tolerance of composite-metal hybrid joints reinforced by multiple and penetrative thin pins / L. Liu // Composites and Advanced Materials. – 2022. – Vol. 31. – P. 1-13. <https://doi.org/10.1177/26349833221105523>
 68. Jahn J. Assessment strategies for composite-metal joining technologies – a review / J. Jahn, M. Weeber, J. Boehmer, R. Steinhilper // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 50. – P. 689-694. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.034>

69. Wang X. Characterisation of composite-titanium alloy hybrid joints using digital image correlation / X. Wang, J. Ahn, C. Kaboglu, L. Yu, B.R.K. Blackman // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 140. – P. 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.023>
70. Baffari D. Experimental and numerical investigation on a new FSW based metal to composite joining technique / D. Baffari, G. Buffa, D. Campanella, E.L. Valvo, L. Fratini // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 34, Part B. – P. 758-764. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.048>
71. Dong J. Summary of composite material-metal connection technology / J. Dong, X. Cui, P. Zhao, D. Wang // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 632. – P. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/5/052035>
72. Das R. Composite-to-metal joining using interference fit micropins / R. Das, A.P. Mouritz // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2022. – Vol. 156. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106895>
73. Мартиненко В.Г. Проектування, аналіз та експериментальне дослідження статичної міцності композиційної біметалічної лопатки вентилятора головного провітрювання шахти / В.Г. Мартиненко, М.І. Грищенко, С.В. Маєродій // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. – 2018. – № 38 (1314). – С. 20-31. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>
74. Мартиненко В.Г. Чисельне та експериментальне дослідження кінцевого з'єднання лопатки роторної машини / В.Г. Мартиненко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. – 2023. – № 1. – С. 14-20. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.1.284029>
75. Luterbacher R. Connection element for composite and steel structures / R. Luterbacher, L. Molter // *Lightweight Design Worldwide*. – 2018. – Vol. 11. – P. 14-19. <https://doi.org/10.1007/s41777-018-0007-y>
76. Мартиненко В.Г. Комплексна оцінка міцності композиційної лопатки вентилятора головного провітрювання шахти / В.Г. Мартиненко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. – 2021. – № 1. – С. 10-14. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2021.1.232865>
77. Martynenko V. Technique for evaluating the strength of composite blades / V. Martynenko, M. Hrytsenko, G. Martynenko // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. – 2020. – Vol. 101. – P. 451-461. <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00572-9>
78. Moukalled F. The finite volume method in computational fluid dynamics – an advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish. – Springer Cham, 2016. – 791 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
79. Spalart P. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows / P. Spalart, S. Allmaras // *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. – Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992. – P. 5-21. <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>
80. Jones W.P. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence / W.P. Jones, B.E. Launder // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1972. – Vol. 15, Is. 2. – P. 301-314. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90076-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90076-2)
81. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD / D.C. Wilcox. – La Cañada: DCW Industries, 1998. – 522 p.
82. Menter F.R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective / F.R. Menter // *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. – 2009. – Vol. 23, No. 4. – P. 305-316. <https://doi.org/10.1080/10618560902773387>
83. Mises R.V. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand / R.V. Mises // *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen (Mathematisch-physikalische Klasse)*. – 1913. – Vol. 1. – P. 582-592.
84. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals / R. Hill // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. – 1948. – Vol. 193. – P. 281-297. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
85. Hoffman O. The brittle strength of orthotropic materials / O. Hoffman // *Journal of Composite Materials*. – 1967. – Vol. 1, No. 2. – P. 200-206. <https://doi.org/10.1177/00219983670010021062>
86. Tsai S.W. A general theory of strength for anisotropic materials / S.W. Tsai, E.M. Wu // *Journal of Composite Materials*. – 1971. – Vol. 5, No. 1. – P. 58-80. <https://doi.org/10.1177/002199837100500106>
87. Hashin Z. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials / Z. Hashin, A. Rotem // *Journal of Composite Materials*. – 1973. – Vol. 7, No. 4. – P. 448-464. <https://doi.org/10.1177/002199837300700404>
88. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites / Z. Hashin // *ASME Journal of Applied Mechanics*. – 1980. – Vol. 47, No. 2. – P. 329-334. <https://doi.org/10.1115/1.3153664>
89. Davila C. Failure criteria for FRP laminates in plane-stress / C. Davila, J. Navin. – Hampton: NASA Langley Research Center, 2003. – 23 p.
90. Davila C. Failure criteria for FRP laminates / C. Davila, P. Camanho, C. Rose // *Journal of Composite Materials*. – 2005. Vol. 39, Is. 4. – P. 323-345. <https://doi.org/10.1177/0021998305046452>
91. Мартиненко В.Г. Чисельно-експериментальна процедура визначення ефективних характеристик та міцності армованого композита / В.Г. Мартиненко, Г.І. Львов // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія Технічні науки*. – 2018. – № 68 (6). – С. 7-14.
92. Martynenko V.G. Experimental investigation of anisotropic viscoelastic properties of glass fiber-reinforced polymeric composite material / V.G. Martynenko, G.I. Lvov, Y.N. Ulianov // *Polymers and Polymer Composites*. – 2019. Vol. 27, Is. 6. – P. 323-336. <https://doi.org/10.1177/0967391119846362>
93. Vinson J.R. Buckling of composite material shells / J.R. Vinson // *Solid Mechanics and Its Applications*. – 1993. – Vol. 18. – P. 417-426. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8141-7_20
94. Ferreira A.J.M. Buckling behaviour of composite shells / A.J.M. Ferreira, J.T. Barbosa // *Composite Structures*. – 2000. – Vol. 50, Is. 1. – P. 93-98. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00090-8)
95. Zhang X. Buckling of composite shells with a novel initial imperfection model subjected to hydrostatic pressure / X. Zhang, Z. Li, Z. Yang, L. Jiang, G. Pan // *Composite Structures*. – 2022. – Vol. 297. – P. 115949. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115949>
96. Chen X. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench / X. Chen, Y. Liu. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 457 p. <https://doi.org/10.1201/9781351045872>
97. Martynenko V.G. Numerical prediction of temperature-dependent anisotropic viscoelastic properties of fiber reinforced composite / V.G. Martynenko, G.I. Lvov // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2017. – Vol. 36, Is. 24. – P. 1790-1801. <https://doi.org/10.1177/0731684417727064>

References (transliterated)

- Martynenko V.G. An original technique for modeling of anisotropic viscoelasticity of orthotropic materials in finite element codes applied to the mechanics of plates and shells. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2017, vol. 21, no. 2, pp. 389-413.
- Merculov V., Kostin M., Martynenko G., Smetankina N., Martynenko V. Force Simulation of Bird Strike Issues of Aircraft Turbojet Engine Fan Blades. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, vol. 305, pp. 129-141. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_13
- Merculov V., Kostin M., Martynenko G., Smetankina N., Martynenko V. Peculiarities of the Modelling of the Bird Dynamic Impact on Fan Blades of an Aircraft Turbojet Engine at Operating Modes. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, vol. 367, pp. 462-473. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_39
- Merculov V., Kostin M., Martynenko G., Smetankina N., Martynenko V. Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models. *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 59, pp. 1797-1803. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.381>
- Martynenko G., Chernobryvko M., Avramov K., Martynenko V., Tonkonozhenko A., Kozharin V., Klymenko D. Numerical simulation of missile warhead operation. *Advances in Engineering*

- Software*. 2018, vol. 123, pp. 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.advensoft.2018.07.001>
6. Brøndsted P., Nijssen R.P.L., Goutianos S. *Advances in wind turbine blade design and materials*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2023. 510 p.
 7. Jiang Y., Finnegan W., Wallace F., Flanagan M., Flanagan T., Goggins J. Structural analysis of a fibre-reinforced composite blade for a 1 MW tidal turbine rotor under degradation of seawater. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2023, vol. 9, no. 3, pp. 477-494. <https://doi.org/10.1007/s40722-023-00279-w>
 8. Silva Junior L.M. *Stress analysis of a thin-walled composite blade of a large wind turbine*. Florianópolis, Federal University of Santa Catarina, 2016. 116 p.
 9. Bir G., Migliore P. *Preliminary structural design of composite blades for two- and three-blade rotors*. Golden, National Renewable Energy Laboratory, 2004. 30 p. <https://doi.org/10.2172/15009673>
 10. DiPalma M., Ferede E., Gandhi F. Optimization of extension-twist coupled composite blades for high-speed rotorcraft. *74th American Helicopter Society Annual Forum*. Phoenix, Phoenix Convention Center, 2018, pp. 1-14.
 11. Martynenko V. Analysis of strength and bearing capacity of the auxiliary mine ventilation fan connected to the rotor of its electrical drive. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2020, pp. 19-23. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250078>
 12. Fernandez G., Usabiaga H., Vandepitte D. An efficient procedure for the calculation of the stress distribution in a wind turbine blade under aerodynamic loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018, vol. 172, pp. 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.11.003>
 13. Ozyildiz M., Muyan C., Coker D. Strength analysis of a composite turbine blade using Puck failure criteria. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1037, P. 1-11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/4/042027>
 14. Dimitrov N., Friis-Hansen P., Berggreen C. Reliability analysis of a composite wind turbine blade section using the model correction factor method: Numerical study and validation. *Applied Composite Materials*. 2013, vol. 20, no. 1, pp. 17-39. <https://doi.org/10.1007/s10443-011-9246-3>
 15. Gao J.X., An Z.W., Ma Q., Bai X.Z. Residual strength assessment of wind turbine rotor blade composites under combined effects of natural aging and fatigue loads. *Eksplotacja i Niezawodność*. 2020, vol. 22, no. 4, pp. 601-609. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.3>
 16. Lagdani O., Tarfaoui M., Nachtane M., Trihi M., Laaouidi H. Modal analysis of an iced offshore composite wind turbine blade. *Wind Engineering*. 2022, vol. 46, no. 1, pp. 134-149. <https://doi.org/10.1177/0309524X211011685>
 17. Nijssen R.P.L. *Fatigue life prediction and strength degradation of wind turbine rotor blade composites*. Wieringerwerf, Knowledge Centre: Wind Turbine Materials and Constructions, 2006. 242 p.
 18. Muyan C., Coker D. Strength analysis of a 5-m composite wind turbine blade under static and fatigue loading conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 942, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012045>
 19. Zhou H.F., Dou H.Y., Qin L.Z., Chen Y., Ni Y.Q., Ko J.M. A review of full-scale structural testing of wind turbine blades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, vol. 33, pp. 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.087>
 20. Morăraș C.I., Goanță V., Istrate B., Munteanu C., Dobrescu G.S. Structural testing by torsion of scalable wind turbine blades. *Polymers*. 2022, vol. 14, no. 19, pp. 3937. <https://doi.org/10.3390/polym14193937>
 21. Nixon M.W. *Preliminary structural design of composite main rotor blades for minimum weight*. Hampton, NASA Scientific and Technical Information Office, 1987. 25 p.
 22. Piatak D.J., Nixon M.W., Kosmatka J.B. *Stiffness characteristics of composite rotor blades with elastic couplings*. Hampton, NASA Scientific and Technical Information Office, 1997. 44 p.
 23. Moura G.A., Kolar R. Approach for analysis and design of composite rotor blades. *Journal of Aircraft*. 1992, vol. 29, no. 4, pp. 516-523. <https://doi.org/10.2514/3.46221>
 24. Işik A.A. *Structural optimization of composite helicopter rotor blades*. Ankara, Middle East Technical University, 2018. 142 p.
 25. Li L. *Structural design of composite rotor blades with consideration of manufacturability, durability, and manufacturing uncertainties*. Georgia, Georgia Institute of Technology, 2008. 107 p.
 26. Kumar D. *Design and analysis of composite rotor blades for active/passive vibration reduction*. Michigan, University of Michigan, 2013. 375 p.
 27. Chandra R., Chopra I. Structural behavior of two-cell composite rotor blades with elastic couplings. *AIAA Journal*. 1992, vol. 30, no. 12, pp. 2914-2921. <https://doi.org/10.2514/3.11637>
 28. Han S., Bauchau O.A. High-fidelity, 3D stress prediction for composite rotor blades. *73rd American Helicopter Society Annual Forum*. Fort Worth, 2017, pp. 1-8.
 29. Kliza R., Ścisłowski K., Siadkowska K., Padyjasek J., Wendeker M. Strength analysis of a prototype composite helicopter rotor blade spar. *Applied Computer Science*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 5-19. <https://doi.org/10.35784/acs-2022-1>
 30. Gu H., Shaw A.D., Amoozgar M., Zhang J., Wang C., Friswell M.I. Twist morphing of a composite rotor blade using a novel metamaterial. *Composite Structures*. 2020, vol. 254, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112855>
 31. Maksimović S., Maksimović K., Vasović I., Maksimović M., Stamenković D. Strength analysis of helicopter main rotor blade made from composite material. *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering*. 2020, vol. 13, pp. 23-26.
 32. Hadăr A., Voicu A.D., Baciú F., Vlăsceanu D., Tudose D.I., Pastramă Ș.D. A novel composite helicopter tail rotor blade with enhanced mechanical properties. *Aerospace*. 2023, vol. 10, no. 7. <https://doi.org/10.3390/aerospace10070647>
 33. Tian S., Tao F., Du H., Yu W., Lim J.W., Haehnel R.B., Wenren Y., Allen L.D. Structural design optimization of composite rotor blades with strength considerations. *AIAA SCITECH 2022 Forum*. San Diego, Manchester Grand Hyatt San Diego, 2022. <https://doi.org/10.2514/6.2022-2454>
 34. Roy A.M. Finite element framework for efficient design of three dimensional multicomponent composite helicopter rotor blade system. *Eng*. 2021, vol. 2, no. 1, pp. 69-79. <https://doi.org/10.3390/eng2010006>
 35. Yu G., Li X., Huang W. Performance and damage study of composite rotor blades under impact. *Polymers*. 2024, vol. 16, no. 5 pp. 1-20. <https://doi.org/10.3390/polym16050623>
 36. Czyż Z., Podolak P., Skiba K., Jakubczak P., Karpiński P., Różyło P. Autogyro main rotor blade strength tests. *2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Milan, Politecnico di Milano, 2023, pp. 199-204. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10190031>
 37. Signorelli R.A. *Review of status and potential tungsten-wire - superalloy composites for advanced gas turbine engine blades*. Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration, 1972. 22 p.
 38. Benoit J.M.D., Dambrine B.J.G., David L.J.P., Fouche P., Girault D.G., Grosbois C.G.R., Guet C.L.F. *Gas turbine blade comprising layers of composite material*. Google Patents US5308228, 1994. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5308228A>. (accessed 5.11.2024)
 39. Abumeri G.H., Kuguoglu L.H., Chamis C.C. *Composite fan blade design for advanced engine concepts*. Cleveland, NASA Glenn Research Center, 2004. 12 p.
 40. Coroneos R.M., Gorla R.S.R. Structural analysis and optimization of a composite fan blade for future aircraft engine. *International Journal of Turbo and Jet-Engines*. 2012, vol. 29, no. 3, pp. 131-164. <https://doi.org/10.1515/tjj-2012-0024>
 41. Sung Y.J., Jun Y.U., Park J.S. A study on stacking sequence design of composite fan blades using multi-level optimization. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1509, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1509/1/012019>
 42. Vimal R.K. Improving fatigue life of gas turbine fan blade using advanced composite materials / R.K. Vimal, G. Dhanjayan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 455. – P. 1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012035>
 43. Xiao J.G.Y., Chen Y., Tian J., Ou-Yang H., Wang A. Numerical investigation of rub-induced composite fan blade vibrations and abradable coating removals. *Composite Structures*. 2019, vol. 226, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111274>

44. Yella G., Jadhav P., Lande C. Bird-strike analysis on hybrid composite fan blade: blade-level validation. *Aerospace*. 2023, vol. 10, no. 5, pp. 1-13. <https://doi.org/10.3390/aerospace10050435>
45. Schmid T., Lengyel-Kampmann T., Schmidt T., Nicke E. Optimization of a carbon-fiber composite blade of a counter-rotating fan for aircraft engines. *13th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*. Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, 2019, pp. 1-12. <https://doi.org/10.29008/ETC2019-432>
46. Nakonetchnyi Y., Yarema I., Batiuk V. Calculation of the stress-strain state of blades made of polymer composite materials of starting turboexpanders in resonance zones. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2021, vol. 102, no. 2, pp. 45-53. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.02.045
47. Porco P., Przynsowa R., Botto D. Analysis of fan blade vibration with a non-contact method. *Journal of Konbin*. 2020, vol. 50, no. 1, pp. 341-357. <https://doi.org/10.2478/jok-2020-0020>
48. Zhu L., Xu J., Zhang W. Mechanical simulation analysis of lightweight blades using glass fiber phenolic resin composites. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 769, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/3/032071>
49. Qi B., He S., Cao X. Research on design of lightweight-blade metro fan based on glass fiber and phenolic resin composite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 769, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/3/032070>
50. Chandragowda M., Chakrasali C., Yogeshwara R.S., Krishna G., Abhishek P. Designing and enhancing the mechanical properties of composite fan blades by glass fiber reinforced polymer composites. *Journal of Scholastic Engineering Science and Management*. 2022, vol. 1, no. 1, pp. 16-25.
51. *HORTON On-Highway Fans*. Available at: <https://www.hortonww.com/on-highway/fans.html>. (accessed 5.11.2024)
52. *MOSS COMPOSITES Axial Fan Composite Rotorblade*. Available at: <https://www.moss-composites.com/axial-fan-composite-blades>. (accessed 5.11.2024)
53. *ESTA LTD Industrial Fans*. Available at: <https://estaltd.com.ua/en/products-3/fan-3>. (accessed 5.11.2024)
54. Simonović A., Kostić I., Stupar S., Petrović Z. Laboratory tests of a hybrid metal-composite transport helicopter blade segment. *Experimental Techniques*. 2012, vol. 36, pp. 22-32. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00708.x>
55. Wang Y., Soutis C. A finite element and experimental analysis of composite T-joints used in wind turbine blades. *Applied Composite Materials*. 2018, vol. 25, pp. 953-964. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9711-3>
56. Petersen E., English N., Brand L.-M., Mahrholz T., Hühne C. Potential of fibre metal laminates in root joints of wind energy turbine rotor blades. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2265, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032039>
57. Sørensen B.F., Jacobsen T.K. Joining structural parts of composite materials for large rotorblades (invited paper). *Polymer composite materials for wind power turbines. Proceedings*. 2006, pp. 69-82.
58. Nasreen A., Bangash M.K., Shaker K., Nawab Y. Effect of surface treatment on stiffness and damping behavior of metal-metal and composite-metal adhesive joints. *Polymers*. 2023, vol. 15, p. 1-15. <https://doi.org/10.3390/polym15020435>
59. Galińska A. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part I: Bolted joining. *Polymers*. 2020, vol. 12, no. 10, pp. 1-48. <https://doi.org/10.3390/polym12102252>
60. An Q., Wang C., Ma T., Zou F., Fan Z., Zhou E., Ge E., Chen M. Aeronautical composite/metal bolted joint and its mechanical properties: a review. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*. 2024, vol. 5, pp. 70-91. <https://doi.org/10.1108/JIMSE-12-2023-0012>
61. Galińska A., Galiński C. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part II: Riveting, clinching, non-adhesive form-locked joints, pin and loop joining. *Polymers*. 2020, vol. 12, no. 8, pp. 1-40. <https://doi.org/10.3390/polym12081681>
62. Lambiase F., Scipioni S.I., Lee C.-J., Ko D.-C., Liu F. A state-of-the-art review on advanced joining processes for metal-composite and metal-polymer hybrid structures. *Materials*. 2021, vol. 14, no. 8, pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/ma14081890>
63. Di Scalea F.L., Cappello F., Cloud G.L. On the effect of interference fits in compo-site pin-joints. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 1999, vol. 12, no. 1, pp. 23-32. <https://doi.org/10.1177/089270579901200103>
64. Parkes P.N., Butler R., Meyer J., de Oliveira A. Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement. *Composite Structures*. 2014, vol. 118, pp. 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.019>
65. Tang H., Liu L. A novel metal-composite joint and its structural performance. *Composite Structures*. 2018, vol. 206, pp. 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.111>
66. Sarantinos N., Tsantalis S., Ucsnik S., Kostopoulos V. Review of through-the-thickness reinforced composites in joints. *Composite Structures*. 2019, vol. 229, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111404>
67. Liu L. A study of the damage tolerance of composite-metal hybrid joints reinforced by multiple and penetrative thin pins. *Composites and Advanced Materials*. 2022, vol. 31, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1177/26349833221105523>
68. Jahn J., Weeber M., Boehner J., Steinhilper R. Assessment strategies for composite-metal joining technologies – a review. *Procedia CIRP*. 2016, vol. 50, pp. 689-694. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.034>
69. Wang X., Ahn J., Kaboglu C., Yu L., Blackman B.R.K. Characterisation of composite-titanium alloy hybrid joints using digital image correlation. *Composite Structures*. 2016, vol. 140, pp. 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.023>
70. Baffari D., Buffa G., Campanella D., Valvo E.L., Fratini L. Experimental and numerical investigation on a new FSW based metal to composite joining technique. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, vol. 34, part B, pp. 758-764. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.048>
71. Dong J., Cui X., Zhao P., Wang D. Summary of composite material-metal connection technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 632, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/5/052035>
72. Das R., Mouritz A.P. Composite-to-metal joining using interference fit micropins. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022, vol. 156, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106895>
73. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I., Mavrody S.V. Proektuvannya, analiz ta eksperymental'ne doslidzhennya statychnoyi mitsnosti kompozysiyanoi bimetalichnoyi lopatky ventilyatora holovnoho provitryvannya shakhty [Design, analysis and experimental study of static strength of composite bimetal blade of mine main ventilation fan]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 38 (1314), pp. 20-31. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>
74. Martynenko V.G. Chysel'ne ta eksperymental'ne doslidzhennya konichnoho z'yednannya lopatky rotornoyi mashyny [Numerical and experimental study of the conical connection of the blade of a rotary machine] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2023, no 1, pp. 14-20. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.1.284029>
75. Luterbacher R., Molter L. Connection element for composite and steel structures. *Lightweight Design Worldwide*. 2018, vol. 11, pp. 14-19. <https://doi.org/10.1007/s41777-018-0007-y>
76. Martynenko V.G. Kompleksna otsinka mitsnosti kompozysiyanoi lopatky ventilyatora holovnoho provitryvannya shakhty [Comprehensive assessment of the mine main ventilation fan composite blade strength]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1, pp. 10-14. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2021.1.232865>
77. Martynenko V., Hrytsenko M., Martynenko G. Technique for evaluating the strength of composite blades. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2020, vol. 101, pp. 451-461. <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00572-9>
78. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The finite volume method in computational fluid dynamics – an advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab*. Springer Cham, 2016. 791 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>

79. Spalart P., Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992, pp. 5-21. <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>
80. Jones W.P., Launder B.E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1972, vol. 15, is. 2, pp. 301-314. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90076-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90076-2)
81. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. La Cañada, DCW Industries, 1998. 522 p.
82. Menter F.R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2009, vol. 23, no. 4, pp. 305-316. <https://doi.org/10.1080/10618560902773387>
83. Mises R.V. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand [Mechanics of solid bodies in plastic deformation state]. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen (Mathematisch-physikalische Klasse)* [News from the Society of Sciences in Göttingen (Mathematical-Physical Class)]. 1913, vol. 1, pp. 582-592.
84. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948, vol. 193, pp. 281-297. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
85. Hoffman O. The brittle strength of orthotropic materials. *Journal of Composite Materials*. 1967, vol. 1, no. 2, pp. 200-206. <https://doi.org/10.1177/00219983670010021062>
86. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. 1971, vol. 5, no. 1, pp. 58-80. <https://doi.org/10.1177/002199837100500106>
87. Hashin Z., Rotem A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials. *Journal of Composite Materials*. 1973, vol. 7, no. 4, pp. 448-464. <https://doi.org/10.1177/002199837300700404>
88. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *ASME Journal of Applied Mechanics*. 1980, vol. 47, no. 2, pp. 329-334. <https://doi.org/10.1115/1.3153664>
89. Davila C., Navin J. *Failure criteria for FRP laminates in plane-stress*. Hampton, NASA Langley Research Center, 2003. 23 p.
90. Davila C., Camanho P., Rose C. Failure criteria for FRP laminates. *Journal of Composite Materials*. 2005, vol. 39, ss. 4, pp. 323-345. <https://doi.org/10.1177/0021998305046452>
91. Martynenko V.G., Lvov G.I. Chysel'no-eksperymental'na protsedura vyznachennya efektyvnykh kharakterystyk ta mitsnosti armovanoho kompozyta [Numerical-experimental procedure for determining effective characteristics and strength of reinforced composite]. *Vcheni zapysky Tavriys'koho natsional'noho universytetu imeni V.I. Vernads'koho. Seriya Tekhnichni nauky* [Academic notes of the Tavri National University named after V.I. Vernadsky. Series Technical sciences]. 2018, no 68 (6), pp. 7-14.
92. Martynenko V.G., Lvov G.I., Ulianov Y.N. Experimental investigation of anisotropic viscoelastic properties of glass fiber-reinforced polymeric composite material. *Polymers and Polymer Composites*. 2019, vol. 27, is. 6, pp. 323-336. <https://doi.org/10.1177/0967391119846362>
93. Vinson J.R. Buckling of composite material shells. *Solid Mechanics and Its Applications*. 1993, vol 18, pp. 417-426. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8141-7_20
94. Ferreira A.J.M., Barbosa J.T. Buckling behaviour of composite shells. *Composite Structures*. 2000, vol. 50, is. 1, pp. 93-98. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00090-8)
95. Zhang X., Li Z., Yang Z., Jiang L., Pan G. Buckling of composite shells with a novel initial imperfection model subjected to hydrostatic pressure. *Composite Structures*. 2022, vol. 297, pp. 115949. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115949>
96. Chen X., Liu Y. *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*. Boca Raton, CRC Press, 2018. 457 p. <https://doi.org/10.1201/9781351045872>
97. Martynenko V.G., Lvov G.I. Numerical prediction of temperature-dependent anisotropic viscoelastic properties of fiber reinforced composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017, vol. 36, is. 24, pp. 1790-1801. <https://doi.org/10.1177/0731684417727064>

Надійшло (received) 12.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Мартиненко Володимир Геннадійович – кандидат технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-0905>.

Martynenko Volodymyr Gennadiyovych – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», doctoral student of the Department of Mathematical Modeling and Intelligent Computing in Engineering; Kharkiv; tel.: (057) 707-68-79; e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-0905>.