

В. Г. МАРТИНЕНКО

МІЦНІСТЬ ТА ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СКЛАДЕНОЇ МЕТАЛ-МАТРИЧНОЇ КОМПОЗИЦІЙНОЇ ЛОПАТКИ РОТОРА В КОНТАКТНИХ ПІДШИПНИКОВИХ ОПОРАХ

На основі аналізу міцності та динамічних властивостей конструкції, за допомогою попередньо запропонованих методик проектування роторних машин, моделювання різного типу навантажень та контактної поведінки між елементами роторів, а також врахування впливу на загальну механічну поведінку системи підшипникових опор різного типу, в роботі пропонується нова лопатка ротора, складена зі сталевго хвостовика та аеродинамічного профілю з метал-матричного композиту, яка покликана вдосконалити конструкцію ротора та надати противагу викликам експлуатації турбомашини, в яких застосування звичайних екстенсивних методів посилення конструкції не може вирішити проблеми функціонування. Розглянутий в роботі варіант біматеріальної лопатки розв'язує практичну інженерну проблему легкої заміни швидкозношуваних лопаток ротора вентилятора головного провітрювання рудника при збереженні їхньої міцності. Створена конструкція лопатки з унікальною формою сталевго остову запропонувала дешеву та легку у виробництві альтернативу суцільній алюмінієвій лопатці, а нерозривність з'єднання сталевих та композиційних частин була перевірена експериментально, а також за допомогою розрахункових методів із врахуванням нелінійних формулювань контактів. Така конструкція пройшла багатоетапну перевірку міцності та прийнятності механічної поведінки окремих лопаток та ротора з ними, який також показав гарні динамічні властивості, уточнені за допомогою врахування впливу контактних роликів підшипникових опор. На основі розроблених в роботі методів була змодельована динамічна поведінка масивного ротора турбомашини із диском великого діаметру та композиційними лопатками, що продемонструвала застосовність запропонованого комплексного підходу, що враховує особливості навантажень та кріплення конструктивних елементів роторів, а також вплив на цю поведінку характеристик матеріалів, уточнених за допомогою запропонованих підходів жорсткісних властивостей контактних роликів підшипникових опор та податливості диску та валу.

Ключові слова: аеродинамічний профіль лопатки; метал-матричний композит; міцність; динаміка ротора; роликівий підшипник.

V. MARTYNYENKO

STRENGTH AND DYNAMIC PROPERTIES OF THE COMPOUND METAL-MATRIX COMPOSITE BLADE OF THE ROTOR IN CONTACT BEARING SUPPORTS

Based on analyzing structural strength and dynamic properties, using previously proposed methods for designing rotary machines, modeling various load types and contact behavior between rotor elements, as well as considering the impact of various types of bearing supports on the overall mechanical behavior, the work proposes a new rotor blade, composed of a steel root and an airfoil made of a metal-matrix composite, created to improve the rotor design and provide a counterweight to the challenges of turbomachine operation, in which the use of conventional extensive methods of structural strengthening cannot solve the functioning problems. The bimaterial blade variant considered in the work solves the practical engineering problem of easy replacement of quickly worn rotor blades of the mine main ventilation fan while maintaining their strength. The created blade design with a unique shape of the steel core suggested a cheap and easy-to-manufacture alternative to a solid aluminum blade, and the integrity of the connection of steel and composite parts was verified experimentally, as well as using computational methods with nonlinear contact formulations. This design underwent a multi-stage testing of strength and acceptability of the mechanical behavior of individual blades and the rotor containing them, which also showed good dynamic properties, refined by considering the influence of contact roller bearing supports. Based on the methods developed in the work, the dynamic behavior of a massive turbomachine rotor with a large-diameter disk and composite blades was simulated, which demonstrated the applicability of the proposed comprehensive approach including features of rotor loads and fixation, as well as the influence on this behavior of material characteristics, stiffness of contact roller bearing supports and disk and shaft compliance specified using proposed approaches.

Keywords: blade airfoil; metal-matrix composite; strength; rotor dynamics; roller bearing.

Вступ. В роботах [1; 2] розглянута концепція біметалічної лопатки з алюмінієвим аеродинамічним профілем та сталевим хвостовиком і остовом (рис. 1) для розв'язання проблеми швидкого зношення лопаток ротора вентилятора головного провітрювання рудника та доведена її міцність, задовільні динамічні характеристики та застосовність до використання в реальній конструкції. В роботі [1] надана детальна інформація щодо умов та величини навантаження лопатки в експерименті та на робочому режимі.

Проте оскільки аеродинамічні профілі лопаток все ще виконувались з алюмінієвого сплаву, їхнє зношення в процесі роботи вентилятора відбувалось з такою ж швидкістю, що і для суцільних алюмінієвих лопаток, хоча у випадку біметалічних лопаток їхня заміна була значно дешевшою, оскільки сталеві хвостовики використовувались для повторного нанесення на них алюмінієвих аеродинамічних профілів, після чого вони знову встановлювались у ротор вентилятора (загалом потрібно було два комплекти сталевих хвостовиків лопаток, оскільки

один з них використовувався, а інший в цей момент перебував на виробництві для заміни алюмінієвих аеродинамічних профілів).

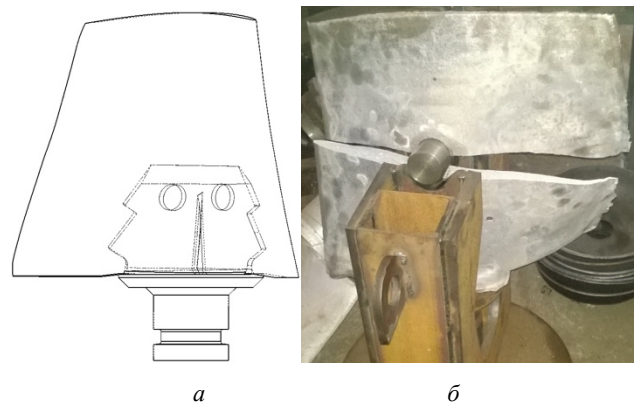


Рис. 1 – Концепція біметалічної лопатки: а – конструктивна модель; б – зруйнований під час експерименту зразок

У якості альтернативи варіанту алюмінієвого сплаву для виготовлення аеродинамічних профілів біметалічних лопаток в роботі запропоновано використовувати метал-матричний композит (ММК) [3] на основі алюмінієвої матриці із армуючими елементами з карбіду бору В₄С [4], оскільки цей матеріал є третім за твердістю після алмазу та нітриду бору [5]. Таким чином використання композиційного матеріалу, що його включає, для виготовлення аеродинамічних профілів лопаток повинно вирішити проблему їхнього швидкого зношування у порівнянні з алюмінієвими профілям [6; 7]. При цьому використанні концепції біметалічної (у даному випадку біматеріальної) лопатки (БЛ) робить конструкцію значно дешевшою, оскільки суттєва її частина буде виготовлена не з дорогого метал-матричного композиту, а з дешевого сталевго сплаву. Очікувана взаємодія між сталевими поверхнями та алюмінієвою матрицею не повинна суттєво відрізнятися від випадку біметалічної лопатки, оскільки частина армуючих волокон на основі карбіду бору є низькою для метал-матричного композиту.

В [5] було представлено дослідження ізотропних пружно-пластичних властивостей для метал-матричного композиту на основі матриці з алюмінієвого сплаву LM6, армованої елементами карбіду бору В₄С з різним співвідношенням їхньої маси до загальної маси композиційного матеріалу. Табл. 1 представляє частково перероблені за результатами експериментів дані, які можуть бути включені до розрахункової моделі ізотропної пружно-пластичної поведінки композиційного матеріалу за аналогією з дослідженням сталєво-алюмінієвої лопатки на основі методики, представленій в роботі [1], а на рис. 2 показані спрощені діаграми розтягнення-стискання даного метал-матричного композиту за пружно-пластичною моделлю білінійного ізотропного зміцнення, тобто тією, що не враховує ефект Баушингера, коректність чого була доведена в роботах [8-10].

Слід відзначити, що згідно з таблицею для відсоткової частки карбіду бору вище за 6% спостерігається погіршення міцнісних та механічних властивостей ММК, тому більші відсоткові частки до розгляду не брались.

Таблиця 1 – Пружно-пластичні властивості ММК LM6-B₄C [5]

B ₄ C, %	E, МПа	E _T , МПа	G, МПа	ε _T , %	ε _B , %	σ _T , МПа	σ _B , МПа
0.0	68900	375.57	25700	0.20421	7.34	113.9	140.7
1.5	72500	408.99	27100	0.20386	7.05	119.8	147.8
3.0	75400	469.86	28300	0.20411	6.44	124.6	153.9
4.5	80600	616.60	30400	0.20782	5.43	135.3	167.5
6.0	90200	743.59	34100	0.2031	4.91	148.2	183.2
7.5	83200	840.27	31600	0.20409	4.06	137.4	169.8

E – модуль пружності, *E_T* – дотичний модуль, *G* – модуль зсуву, *ε_T* – відносне подовження при настанні текучості, *ε_B* – відносне подовження при руйнуванні, *σ_T* – границя текучості, *σ_B* – границя тимчасового опору руйнуванню

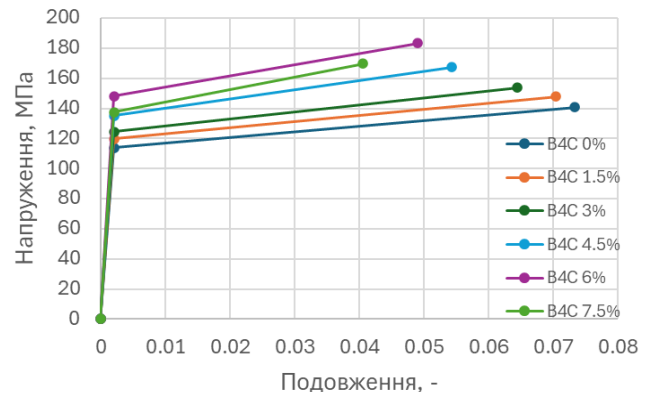


Рис. 2 – Діаграма розтягнення ММК LM6-B₄C

1. Статичний аналіз лопатки з ММК аеродинамічним профілем. Розрахункова модель одиночної біматеріальної лопатки з метал-матричним композитом у даному випадку відповідає експериментально перевіреній скінченно-елементній (СЕ) розрахунковій моделі [1], показаній на рис. 3, за допомогою якої було розглянуто шість розрахункових випадків (РВ), що відповідають рядкам у табл. 1.

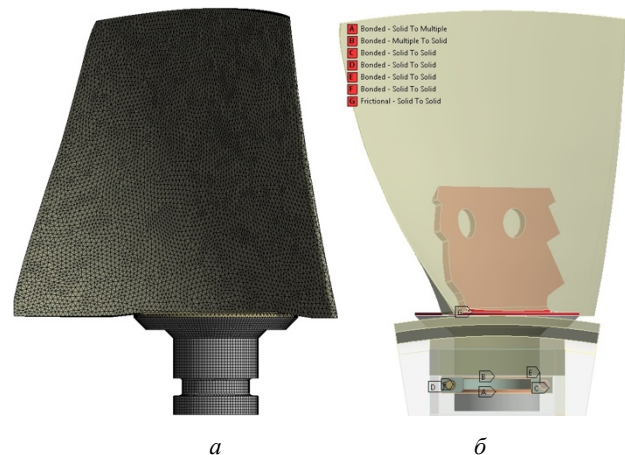


Рис. 3 – Розрахункова модель біматеріальної лопатки з ММК: *a* – скінченно-елементна сітка; *б* – контактна взаємодія між конструктивними елементами

У результаті проведення варіантних розрахунків із моделями ММК, що включають різні відсоткові частки карбіду бору, були отримані тензорно-векторних компонентів (далі – компонентів) напружено-деформованого стану (НДС), які для метал-матричного композиційного алюмінієвого профілю (АП) представлені у табл. 2, в якій також для інформації наведена змінна в залежності від частки карбіду бору щільність ММК.

Таблиця 2 – Компоненти НДС АП з ММК LM6-B₄C

РВ	B ₄ C, %	ρ, кг/м ³	u _{max} , мм	ε _{T max} , %	σ _{max} , МПа
1	0.0	2700	1.890	0.0287	121.14
2	1.5	2697	1.823	0.0243	121.25
3	3.0	2694	1.773	0.0210	121.49
4	4.5	2691	1.693	0.0148	123.77
5	6.0	2688	1.569	0.0088	134.47
6	7.5	2685	1.653	0.0137	124.67

ρ – щільність ММК, U_{max} – максимальні переміщення, ϵT_{max} – максимальні пластичні деформації, σ_{max} – максимальна інтенсивність напружень

Як видно з таблиці, в метал-матричному композиційному профілі відбуваються несуттєві пластичні деформації, які носять локальний характер та показані для першого розрахункового випадку, в якому вони досягають найбільших значень, на Рис. 4, а.

При цьому найбільші значення максимальної інтенсивності напружень, яка є еквівалентним напруженням при застосуванні критерію Мізеса, який використовувався для даного ММК через ізотропію його властивостей та переважаючу вклад алюмінієвої матриці у пружно-пластичну поведінку композиту [5], для дво- або тривісного напруженого стану (далі для скорочення – інтенсивність напружень) у метал-матричному композиційному аеродинамічному профілі досягаються у п'ятому розрахунковому випадку (Рис. 4, б), що може бути пов'язано із найбільшим з усіх випадків модулем пружності метал-матричного композиту для масової частки карбіду бору в ньому 6% згідно табл. 1, що призводить до більшої жорсткості матеріалу, яка, в свою чергу, впливає на жорсткість нелінійного контакту між матеріалами у лопатці та напруження, які виникають на межі такого контакту. Тому поля сумарних переміщень та еквівалентних напружень у всій лопатці на рис. 5 представлені також для РВ5.

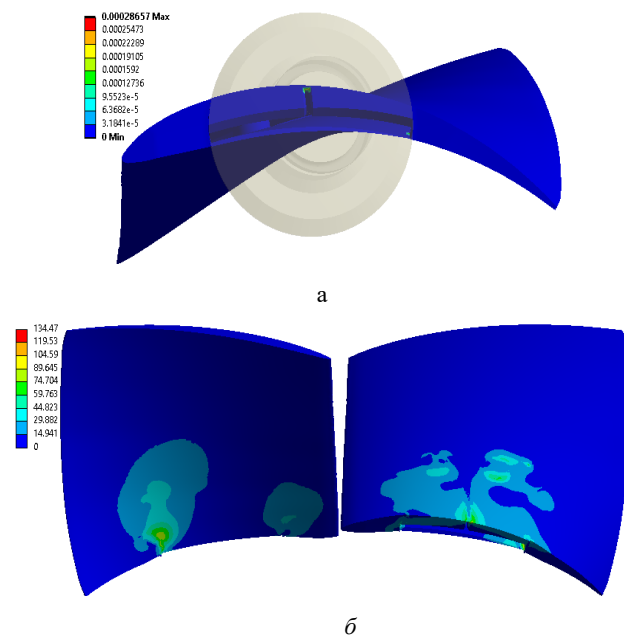


Рис. 4 – Розподіл компонентів НДС у профілі з ММК:
а – пластичні деформації, РВ1, [-];
б – інтенсивність напружень, РВ5, [МПа]

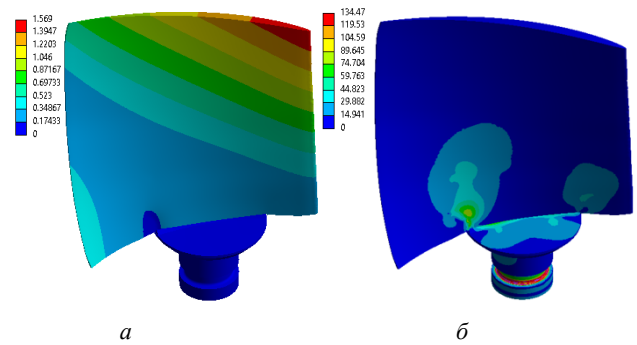


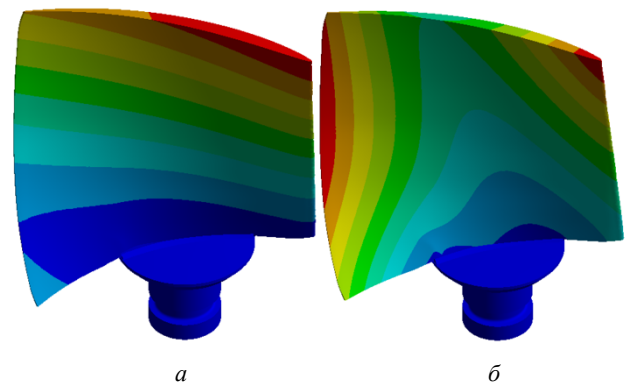
Рис. 5 – Розподіл компонентів НДС у лопатці з ММК, РВ5:
а – повні переміщення, [мм];
б – інтенсивність напружень, [МПа]

Як видно з цих рисунків, загальний розподіл компонентів напружено-деформованого стану для випадку БЛ, що включає в себе метал-матричний композит на основі алюмінієвої матриці з масовою часткою елементів карбіду бору 6%, якісно співпадає з відповідним графіком для біметалічної сталево-алюмінієвої лопатки, що був показаний у [1]. Такі ж висновки зберігаються і для інших часток В₄С в ММК.

2. Модальний аналіз лопатки з ММК аеродинамічним профілем. З метою оцінки впливу відсоткової частки карбіду бору на динамічні властивості біматеріальної лопатки був також проведений варіантний модальний аналіз з урахуванням переднапруженого стану, результати якого у вигляді перших шести власних частот (ВЧ) коливань лопатки для кожної з розглянутих масових часток карбіду бору в ММК та власних форм (ВФ) для п'ятого розрахункового випадку представлені в табл. 3 та на рис. 6 відповідно.

Таблиця 3 – ВЧ біматеріальної лопатки з ММК для РВ1-6

В ₄ С, %	1 ВЧ, Гц	2 ВЧ, Гц	3 ВЧ, Гц	4 ВЧ, Гц	5 ВЧ, Гц	6 ВЧ, Гц
0.0	95.879	214.496	285.524	511.927	554.832	679.910
1.5	96.716	217.350	287.477	522.285	567.640	695.454
3.0	97.458	219.625	289.110	530.555	577.745	707.931
4.5	97.514	223.048	291.826	543.833	595.294	729.178
6.0	99.212	228.736	296.534	566.588	626.770	765.668
7.5	98.174	225.024	293.482	551.198	604.173	740.465



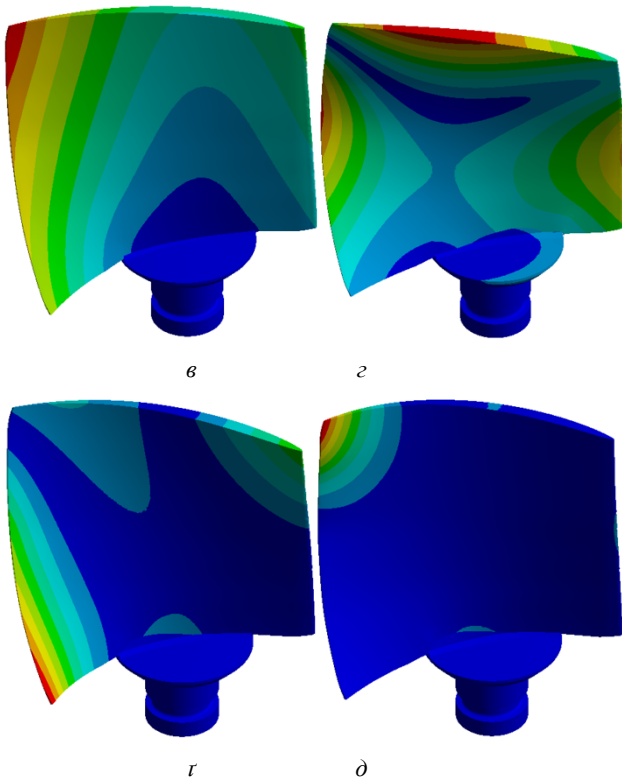


Рис. 6 – ВФ коливань біматеріальної лопатки, РВ5:
а – 1 ВФ; б – 2 ВФ; в – 3 ВФ; з – 4 ВФ; r – 5 ВФ; д – 6 ВФ

Як видно з таблиці, для першого розрахункового випадку, тобто у разі розгляду чистого алюмінієвого сплаву без включення армуючих елементів карбиду бору в матеріал аеродинамічного профілю біматеріальної лопатки, спостерігається найбільше співпадіння між власними частотами у порівнянні з відповідними значеннями для біметалічної лопатки [1]. Відсутність повної відповідності між цими результатами пояснюється різними марками алюмінієвих сплавів, що використовуються для виготовлення аеродинамічного профілю біметалічної лопатки та у якості матриці ММК для профілю біматеріальної лопатки. При цьому зі збільшенням масової частки карбиду бору у ММК збільшуються і усі шість власних частот аж до частки 6%, після якої спостерігається помірне зниження їхніх значень для частки 7.5%, яке пояснюється меншим у цьому розрахунковому випадку модулем пружності ММК згідно з експериментальними даними табл. 1.

Характер розподілу відносних переміщень за власними формами коливань біматеріальної лопатки практично співпадає з відповідними формами біметалічної лопатки [1].

Таким чином можна зробити висновок про аналогічність біметалічній лопатці висновків щодо міцнісних та динамічних властивостей біматеріальної лопатки з різними масовими частками карбиду бору в ММК аеродинамічного профілю та застосовність розглянутого метал-матричного композиту для вирішення задачі швидкого зношування аеродинамічних профілів у середовищі з підвищеною абразивністю.

3. Динамічні властивості ротора з ММК лопатками та в контактних підшипникових опорах. Для детального дослідження механічної поведінки біметалічних та біматеріальних лопаток в роторі вентилятора з контактними підшипниковими опорами далі застосовується розроблений комплексний підхід, що включає взаємопов'язаність динамічних процесів, які відбуваються в композиційній лопатці на основі ММК з масовою часткою карбиду бору 6% та підшипникових опор, об'єднаних між собою пружним ротором.

З цієї метою на основі розробленого в роботі [11] підходу до визначення жорсткості змашеного контакту контактних опор для роликів підшипників (РП), що застосовуються у вентиляторі та параметри яких показані в табл. 4, визначаються залежні від швидкості обертання коефіцієнти жорсткості (у випадку роликів підшипників у порівнянні з попередньо розглянутими шариковими один з приведених радіусів кривизни контакту вважається дорівнюючим нескінченності).

Для розрахунків підшипників SKF NU 2248 MA і SKF NNCF 5048 CV використовувалася середина діапазону виробничих допусків згідно зі стандартом ISO 5753-1:2009 [12].

Таблиця 4 – Геометричні та фізичні параметри РП вентилятора

Параметр	Пер. підш.	Зад. підш.
Позначення SKF	NU 2248 MA	NNCF 5048 CV
Діаметр ролика [мм]	45	36
Довжина ролика [мм]	75	58
Кількість роликів [-]	19	26
Діаметральний зазор [мм]	0.07	0.07
Середній діаметр [мм]	339.92	299.1
Модуль пружності елементів [Па]	2.1e11	2.1e11
Коефіцієнт Пуассона елементів [-]	0.3	0.3
Температура [С]	60	60
Коефіцієнт тиску та в'язкості [Па ⁻¹]	2.359e-8	2.359e-8
В'язкість змашування [Па с]	0.063	0.063
Радіальне навантаження [Н]	23300	21762
Швидкість обертання [об/хв]	750	750

пер. підш. – передній підшипник, зад. підш. – задній підшипник

Передній підшипник у роторі вентилятора є однорядним, тоді як задній є дворядним, тому він розглядається як пара однорядних підшипників у розрахунках, тобто на кожний з цієї пари прикладається половина навантаження на задній підшипник, а отриманий у результаті коефіцієнт жорсткості подвоюється.

При визначенні коефіцієнтів жорсткості РП, показаних на рис. 7, використовуються навантаження на них, отримані як реакції у опорах ротора при прикладенні до нього сили тяжіння та відцентрових сил (рис. 8) за допомогою СЕ сітки (рис. 9) з контактами (рис. 10).

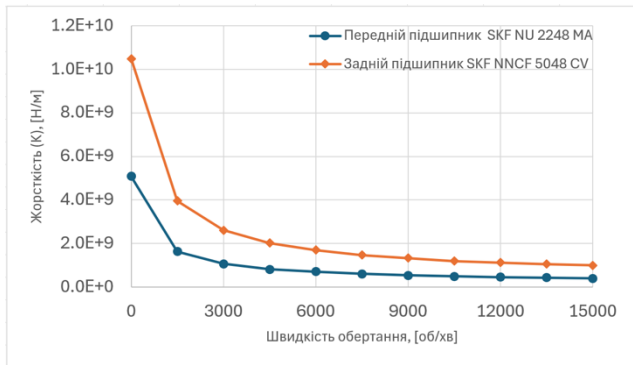


Рис. 7 – Жорсткість РП вентилятора в залежності від ШО

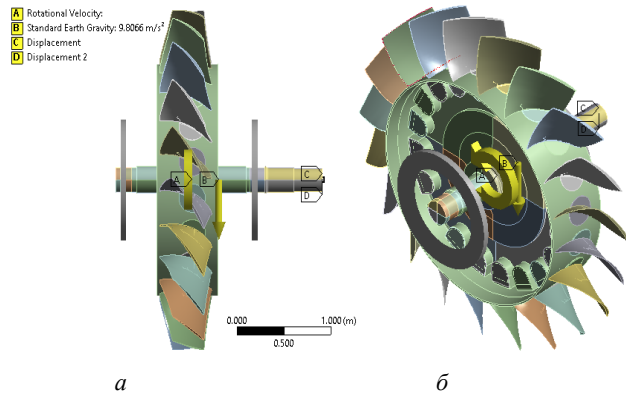


Рис. 8 – Розрахункова модель ротора вентилятора з ММК лопатками: *a* – вид збоку; *б* – ізометричний вид

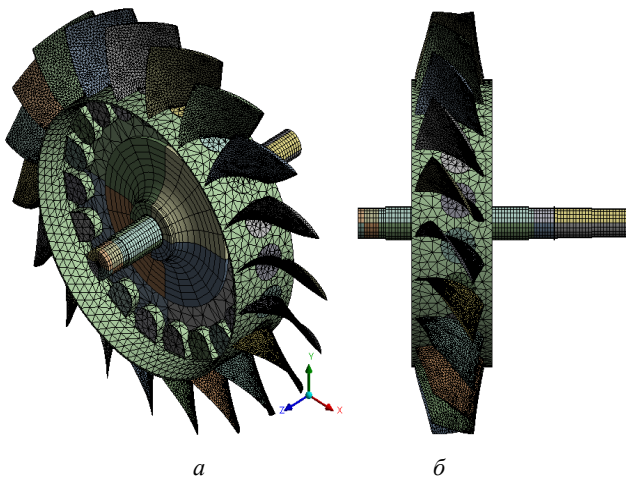


Рис. 9 – Скінченно-елементна сітка ротора вентилятора з ММК лопатками: *a* – ізометричний вид; *б* – вид збоку

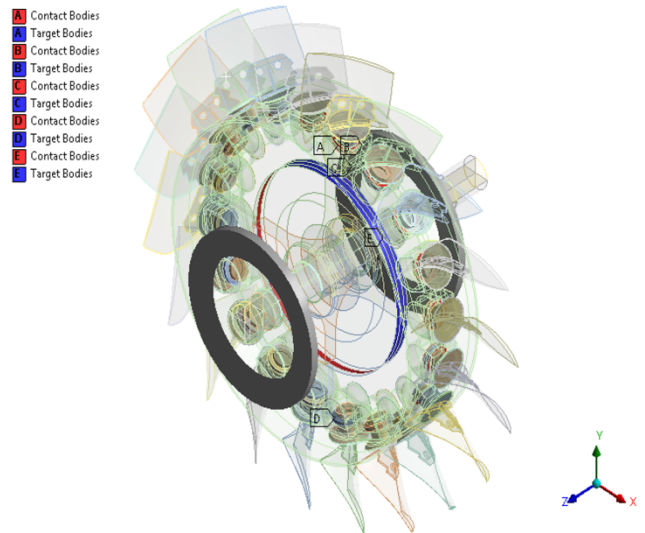


Рис. 10 – Модель контактної взаємодії в роторі вентилятора

Варто звернути увагу, що у даному випадку контактна взаємодія також задана між елементами маточини у формі отриманих прокручуванням гексаєдрів та елементами диску у вільній формі тетраєдрів, що не можуть бути поєднані між собою зливою сіткою, для того, щоб адекватно відтворити деформування валу при визначенні його згинальних власних форм. В той же час, для елементів диску було задано два скінченних елементи по його товщині для того, щоб уникнути появи ефекту локінгу [13-15] тривимірних скінченних елементів при визначенні дискових форм, близьких за своїм характером до оболонкових.

Побудована скінченно-елементна сітка, в якій особлива увага приділена дискретизації валу та біматеріальних лопаток, налічує 487068 вузлів та 261675 квадратичних впорядкованих та неупорядкованих скінченних елементів. Точність SE дискретизації разом із навантаженнями на роликів підшипники визначається в результаті проведення варіантних статичних аналізів на робочій та вдвоє дрібнішій сітках із порівнянням максимальних значень отриманих результатів, показаних на рис. 11.

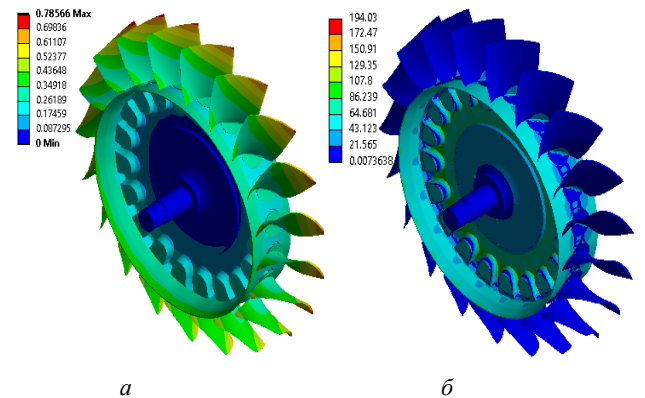


Рис. 11 – Результати статичного аналізу ротора : *a* – сумарні переміщення, [мм]; *б* – інтенсивність напружень, [МПа]

Далі застосовуються методи визначення згинальних критичних частот пружного ротора з урахуванням гіроскопічного ефекту, які були розроблені в [11]. Для цього в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу були враховані ефекти сил Кориоліса, які для об'ємного тіла більш детально можуть бути описані у обертовій системі координат. Було розраховано 12 залежних від швидкості обертання (ШО) власних частот ротора у жорстких (ЖП, із прямими коефіцієнтам жорсткості $1e12$ Н/м) та еластичних (ЕП, із коефіцієнтами жорсткості на рис. 7) підшипниках (рис. 12) для 11 точок ШО.

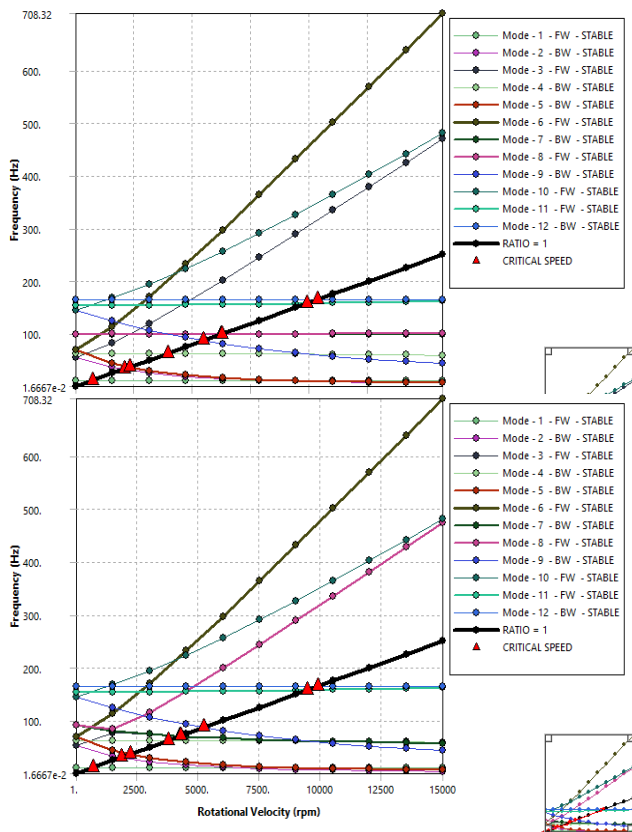


Рис. 12 – Діаграми Кемпбелла (залежність ВЧ, [Гц] від ШО [об/хв]), отримані в програмному комплексі СЕ аналізу для об'ємної моделі ротора вентилятора з біматеріальними ММК лопатками в ЖП (зверху) та ЕП (знизу)

На цих діаграмах Кемпбелла можна бачити ВЧ, що відповідають усім типам ВФ, включаючи крутильні, осьові та лопаткові (рис. 13, а, б-в, г).

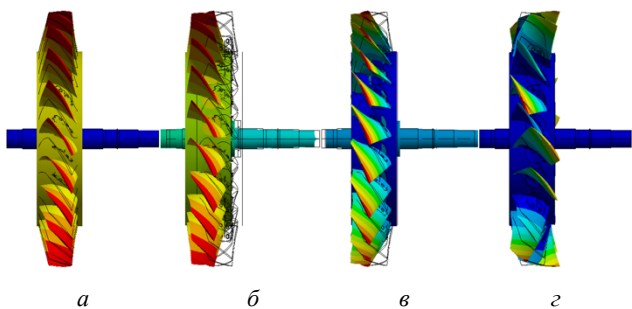


Рис. 13 – Тип ВФ: а – крутильна; б, в – осьові; г – лопаткова

Крутильні, осьові та лопаткові власні частоти не мають роздвоєння на діаграмі Кемпбелла, оскільки на них не впливають (або несуттєво впливають) ефекти сил Кориоліса. Суттєве роздвоєння при цьому мають власні частоти, що відповідають дисковим формам коливань та відокремлені від інших власних частот на рис. 14. Таке роздвоєння пояснюється великим діаметром диску при його малій товщині, що призводить до помітного впливу на дискові власні частоти ефектів сил Кориоліса при прямому (ПО) та зворотному (ЗО) обертанні ротора. Під ПО ротора розуміється таке, що співпадає з напрямком окружного руху хвилі коливання на дисковій формі, а під ЗО – таке, що протилежне цьому напрямку.

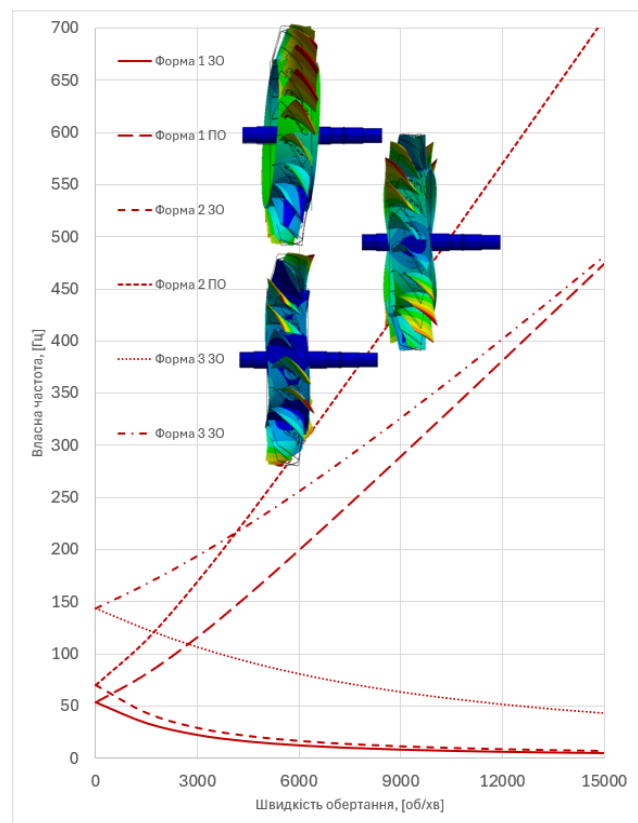


Рис. 14 – Залежність дискових ВЧ, [Гц] від ШО [об/хв] при прямому та зворотному обертанні ротора

Ті дві лінії на діаграмах Кемпбелла, автоматично побудованих в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу, що залишилися не обговореними, відповідають першій згинальній власній формі ротора при прямій (ПП) та зворотній (ЗП) прецесії. Саме вони суттєво відрізняються між собою при прямому порівнянні цих діаграм для жорстких та еластичних підшипників, яке показано на переробленій діаграмі Кемпбелла на рис. 15.

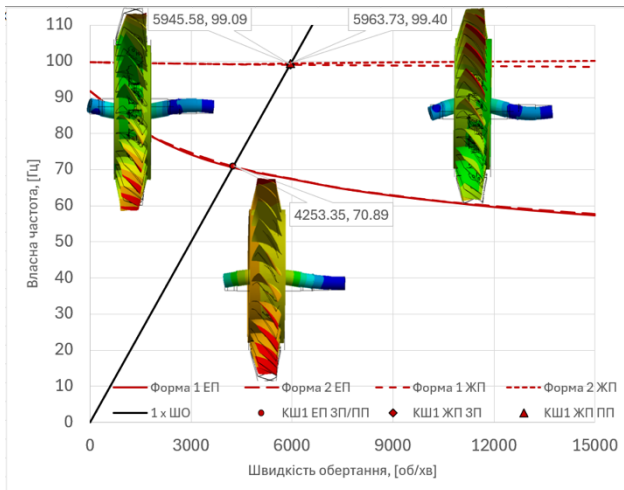


Рис. 15 – Залежність ВЧ валу, [Гц] від ШО [об/хв] при прямій та зворотній прецесії ротора

4. Обговорення результатів. Порівняльний аналіз результатів розрахунків міцнісних характеристик біматеріальних лопаток для різних масових часток карбіду бору в ММК аеродинамічного профілю, який можна зробити на основі табл. 2, свідчить про те, для усіх розглянутих варіантів пластичні деформації, які можуть відбутись у профілі лопатки, носять локальний характер та не перевищують значення 0.03%, що не впливає на формозміну аеродинамічного профілю. Окрім того, максимальні значення інтенсивності напружень при цьому варіюються у межах 10% для різних масових часток карбіду бору, що виходить за рамки інженерної похибки та може в подальшому впливати на висновки про статичну міцність того чи іншого варіанту біматеріальної лопатки.

Співставлення результатів розрахунків динамічних властивостей біматеріальних лопаток із різними масовими частками карбіду бору в ММК аеродинамічного профілю, проведене в табл. 3, свідчить про те, що для перших трьох власних частот лопаток, наближених до кратностей частоти обертання ротора, їхні значення змінюються у межах 3-5%, а отже це не є суттєвим критерієм для обрання варіанту біметалічної лопатки з тією чи іншою масовою часткою карбіду бору у композиті аеродинамічного профілю.

Як витікає з діаграми Кемпбелла (рис. 15), в даному випадку не відбувається суттєве роздвоєння ліній власних частот для прямої та зворотної процесії, що відрізняється від висновків при початковому аналізі механічної поведінки ротора вентилятора [16]. Це пояснюється різницею в розрахункових моделях, а саме: балкова модель відповідає варіанту ротора з алюмінієвими лопатками, тоді як об'ємна модель представляє ротор з біматеріальними лопатками, отже, загальні масово-інерційні характеристики робочого колеса хоча й не дуже, але відрізняються; закріплення підшипникових опор у балковій моделі відбуваються по всій довжині підшипників, що не дозволяє поворот навколо поперечних напрямків у цих місцях та робить

ротор жорсткішим, тоді як у об'ємній моделі поворот валу в місцях підшипників дозволений, що більше відповідає їхній механічній поведінці; закріплення в осьовому напрямку в балковій моделі відбувається у підшипникових опорах, тоді як в об'ємній моделі – у центральній точці правого торця валу, що відповідає кінематичній схемі ротора; з такими відмінностями перша згинальна власна форма коливань балкової моделі містить поворот поперечного перерізу валу із точковим диском, тоді як для об'ємної моделі перша згинальна власна форма коливань ротора не призводить до повороту диску.

Фізично ж в даному випадку об'ємна модель дозволяє адекватно врахувати більше ефектів закріплення та механічної поведінки ротора через його великий діаметр, і її можна вважати уточненою. Лінії власних частот прямої та зворотної прецесії для ротора в пружних опорах обидві мають тенденцію до спадання, що демонструє більший вплив на них змінних жорсткісних властивостей роликів підшипників (рис. 7), ніж гіроскопічного моменту, який при розгляді першої згинальної форми ротора в об'ємній постановці не суттєво проявляється через малий діаметр ротора у порівнянні з діаметром диску, а також відсутність повороту диску за першою згинальною формою коливань (рис. 15).

З поміж іншого слід також зазначити, що діаграми Кемпбелла, автоматично побудовані в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу на рис. 12, містять перескоки між лініями ВЧ, що потребувало детального аналізу для створення діаграм на рис. 14 та 15 із необхідними корекціями номерів власних частот для збереження їх відповідності характерним власним формами коливань. Про таку проблему та необхідність її вирішення зазначено зокрема в [17], що у перекладі звучить наступним чином (цитата):

«Оскільки карта швидкості обертання (прим. – діаграма Кемпбелла) та карта стабільності можуть бути дуже складними, ... , слід бути обережним під час побудови карт. Досить часто порядки режимів перемикаються в міру зміни швидкості та час від часу виникають змішані прецесії. ... Форми режимів завжди повинні бути присутніми під час підготовки та інтерпретації карти обертової швидкості та карти стабільності».

Висновки. Отже, розглянута в роботі задача дозволила узагальнити попередньо розроблені підходи, а саме: застосувати концепцію біматеріальної лопатки; відтворити у математичній моделі нелінійну контактну взаємодію між метал-матричним композитом та хвостовиком лопаток; перевірити міцність складних композиційних лопаток для різних масових часток карбіду бору в ММК аеродинамічного профілю; лінеаризувати модель контактної взаємодії складних композиційних лопаток для проведення аналізу динамічної поведінки ротора із ними; розробити уточнену розрахункову модель ротора зі складеними композиційними лопатками у тому числі

за допомогою визначення жорсткісних властивостей контактних підшипникових опор та довести прийнятність його динамічних характеристик на основі детального аналізу відповідних власних частот, форм та діаграм Кемпбелла.

Таким чином був предметно застосований розроблений авторський метод з аналізу міцності та механічної поведінки складних та композиційних елементів роторів в контактних та безконтактних підшипникових опорах для створення нового ефективного варіанту ротора працюючого промислового вентилятора головного провітрювання рудника, що вирішує практичну виробничу проблему та інженерні виклики, які виникли в процесі його функціонування на номінальному режимі роботи.

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. Мартиненко В. Г. Проектування, аналіз та експериментальне дослідження статичної міцності композиційної біметалічної лопатки вентилятора головного провітрювання шахти / В. Г. Мартиненко, М. І. Гриценко, С. В. Мавродій // 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>
2. Martynenko V. Design and analysis of the bimetallic fan blade. / V. Martynenko // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 367. – P. 437-448. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_37
3. Khalid M. Y. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications / M. Y. Khalid, R. Umer, K. A. Khan // Results in Engineering. – 2023. – Vol.20. – P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101372>
4. Mohanty R. M. Boron carbide-reinforced aluminium 1100 matrix composites: fabrication and properties / R. M. Mohanty, K. Balasubramanian, S. K. Seshadri // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 498, Is. 1-2. – P. 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.154>
5. Dixit A. C. Elastic properties of aluminum boron carbide metal matrix composites / A. C. Dixit, M. V. Achutha, B. K. Sridhara // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 43, Part 2. – P. 1253-1257. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.766>
6. Lee D. Effect of boron carbide addition on wear resistance of aluminum matrix composites fabricated by stir casting and hot rolling processes / D. Lee, J. Kim, S.-K. Lee, Y. Kim, S.-B. Lee, S. Cho // Metals. – 2021. – Vol. 11. – P. 1-10. <https://doi.org/10.3390/met11060989>
7. Ibraheem A. M. Enhancement the properties of aluminum by adding boron carbide by the powder method / A. M. Ibraheem, S. M. Aman Allah, S. Y. Darweesh // Journal of Physics: Conference Series. – 1999. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1999/1/012074>
8. Needleman A. Comparison of crystal plasticity and isotropic hardening predictions for metal-matrix composites / A. Needleman, V. Tvergaard // Journal of Applied Mechanics. – 1993. – Vol. 60 (1). – P. 70-76. <https://doi.org/10.1115/1.2900781>
9. Kawai M. Coupled Inelasticity and damage model for metal matrix composites / M. Kawai // International Journal of Damage Mechanics. – 1997. – Vol. 6 (4). – P. 453-478. <https://doi.org/10.1177/105678959700600405>
10. Li S. A review of dynamic mechanical behavior and the constitutive models of aluminum matrix composites / S. Li, T. Luo, Z. Chao,

- L. Jiang, H. Han, B. Han, S. Du, M. Liu // Materials (Basel). – 2024. – Vol. 17(8). – P. 1-33. <https://doi.org/10.3390/ma17081879>
11. ISO 5753-1:2009. Rolling bearings – Internal clearance. Part 1: Radial internal clearance for radial bearings. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/44742.html>. – Дата звертання: 28 квітня 2025 р.
12. Kochurov R. Ball bearing dynamic stiffness prediction considering an uncertain position of rolling elements / R. Kochurov, V. Martynenko, L. Moroz, Y. Govorushchenko // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2025. – Vol. 147 (4). – P. 1-9. <https://doi.org/10.1115/1.4066613>
13. Babuška I. Locking effects in the finite element approximation of elasticity problems / I. Babuška, M. Suri // Numerische Mathematik. – 1992. – Vol. 62. – P. 439-463. <https://doi.org/10.1007/BF01396238>
14. Ambroziak A. Locking effects in the finite element method / A. Ambroziak // Shell Structures: Theory and Applications. – 2014. – Vol. 3. – P. 1-4. <https://doi.org/10.1201/b15684-92>
15. Lee S. W. Element locking / S. W. Lee, P. W. Chung // Finite Element Method for Solids and Structures: A Concise Approach. – 2021. – P. 266-282.
16. Martynenko V. G. Analysis of static and dynamic strength of the axial fan considering aerodynamic properties of the flow and nonuniformity of temperature field / V. G. Martynenko, M. I. Hrytsenko // Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 18 (4/1). – P. 44-52. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/jme/article/view/57509>. – Дата звертання: 28 квітня 2025 р.
17. Chen W. J. Practical Rotordynamics and Fluid Film Bearing Design / W. J. Chen. – Trafford Publishing, 2015. – 599 p.

References (transliterated)

1. Martynenko V. G., Hrytsenko N. I., Mavrody S. V. Proektuvannya, analiz ta eksperymental'ne doslidzhennya statychnoyi mitsnosti kompozitsiyanoi bimetalichnoyi lopatky ventylyatora holovnoho provityruvannya 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>
2. Martynenko V. Design and analysis of the bimetallic fan blade. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, vol. 367, pp. 437-448. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_37
3. Khalid M. Y., Umer R., Khan K. A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*. 2023, vol.20, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101372>
4. Mohanty R. M., Balasubramanian K., Seshadri S. K. Boron carbide-reinforced aluminium 1100 matrix composites: fabrication and properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, vol. 498, is. 1-2, pp. 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.154>
5. Dixit A. C., Achutha M. V., Sridhara B. K. Elastic properties of aluminum boron carbide metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 43, part 2, pp. 1253-1257. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.766>
6. Lee D., Kim J., Lee S.-K., Kim Y., Lee S.-B., Cho S. Effect of boron carbide addition on wear resistance of aluminum matrix composites fabricated by stir casting and hot rolling processes. *Metals*. 2021, vol. 11, pp. 1-10. <https://doi.org/10.3390/met11060989>
7. Ibraheem A. M., Aman Allah S. M., Darweesh S. Y. Enhancement the properties of aluminum by adding boron carbide by the powder method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1999, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1999/1/012074>
8. Needleman A., Tvergaard V. Comparison of crystal plasticity and isotropic hardening predictions for metal-matrix composites. *Journal of Applied Mechanics*. 1993, vol. 60 (1), pp. 70-76. <https://doi.org/10.1115/1.2900781>
9. Kawai M. Coupled Inelasticity and damage model for metal matrix composites. *International Journal of Damage Mechanics*. 1997, vol. 6 (4), pp. 453-478. <https://doi.org/10.1177/105678959700600405>
10. Li S., Luo T., Chao Z., Jiang L., Han H., Han B., Du S., Liu M. A review of dynamic mechanical behavior and the constitutive models

- of aluminum matrix composites. *Materials (Basel)*. 2024, Vol. 17(8), pp. 1-33. <https://doi.org/10.3390/ma17081879>
11. ISO 5753-1:2009. Rolling bearings – Internal clearance. Part 1: Radial internal clearance for radial bearings. Available at: <https://www.iso.org/standard/44742.html>. (accessed: 28.04.2025)
 12. Kochurov R., Martynenko V., Moroz L., Govorushchenko Y. Ball bearing dynamic stiffness prediction considering an uncertain position of rolling elements. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2025, vol. 147 (4), p. 1-9. <https://doi.org/10.1115/1.4066613>
 13. Babuška I., Suri M. Locking effects in the finite element approximation of elasticity problems. *Numerische Mathematik*. 1992, vol. 62, pp. 439-463. <https://doi.org/10.1007/BF01396238>
 14. Ambroziak A. Locking effects in the finite element method. *Shell Structures: Theory and Applications*. 2014, vol. 3, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1201/b15684-92>
 15. Lee S. W., Chung P. W. Element locking. *Finite Element Method for Solids and Structures: A Concise Approach*. 2021, pp. 266-282.
 16. Martynenko V. G., Hrytsenko M. I. Analysis of static and dynamic strength of the axial fan considering aerodynamic properties of the flow and nonuniformity of temperature field. *Journal of Mechanical Engineering*. 2015, vol. 18 (4/1), pp. 44-52. Available at: <http://journals.urau.ua/jme/article/view/57509>. (accessed: 28.04.2025)
 17. Chen W. J. *Practical Rotordynamics and Fluid Film Bearing Design*. Trafford Publishing, 2015, 599 p.

Надійшла (received) 28.04.2025

Прийнята до друку (accepted) 20.08.2025

Опублікована (published) 03.09.2025

Відомості про авторів / About the Authors

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