

В.Г. МАРТИНЕНКО

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУЦІЛЬНОМЕТАЛІЧНОЇ, СКЛАДНОЇ ТА КОМПОЗИЦІЙНОЇ ЛОПАТОК ІЗ ОДНАКОВИМ ПРОФІЛЕМ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА АЕРОДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

В роботі представлений порівняльний аналіз динамічних властивостей лопаток однієї роторної машини, що мають одну і ту ж саму форму профілю, але виконані з трьох різних матеріалів, а саме алюмінієвого сплаву, складного матеріалу, що поєднує в собі алюмінієвий сплав та сталь, та композиційного матеріалу, яким виступає односпрямований склопластик. У випадку суцільнометалічної лопатки, її профіль та хвостовик виконані з алюмінієвого сплаву. У випадку складного матеріалу профілю лопатки хвостовик виконаний із сталі, що є також складовою частиною матеріалу профілю. У випадку композиційної лопатки хвостовик є сталевим та з'єднаний у кореновому перерізі з її композиційним пером. Основна увага при порівнянні моделей механічної поведінки трьох типів лопаток приділяється впливу з'єднання складних та композиційних елементів із хвостовиком на динамічні характеристики лопатки в цілому, що досягається за допомогою розгляду контактних взаємодій елементів під дією відцентрових та аеродинамічних навантажень та подальшій передачі переднапруженого стану лопаток у модальний аналіз для визначення динамічних характеристик зразків та їх порівняння. Для коректного відображення закріплення елементів у робочому колесі вентилятора у випадку алюмінієвої лопатки розглядається сектор циклічної симетрії ротора, що дає змогу зробити висновок про можливість подальшого окремого розгляду лопатки для визначення її динамічних характеристик за рахунок набагато більшої жорсткості з'єднання лопатки із робочим колесом у порівнянні із жорсткістю пера лопатки та поширене на випадок складної лопатки розглядом сталевих хвостовиків із алюмінієвим профілем з жорстким затисненням моделі по контактним полицкам хвостовика, а на випадок композиційної лопатки розглядом пера із жорстким затисненням у кореновому перерізі, де відбувається кріплення до сталевих хвостовиків лопатки. Результати порівняльного аналізу динамічної поведінки трьох типів лопаток однакового профілю представлені у вигляді дослідження власних частот та форм коливань лопатки.

Ключові слова: профіль лопатки; контакт; композиційний матеріал; динамічний відгук; аеродинамічне навантаження.

The paper presents a comparative analysis of the dynamic properties of the blades of one rotary machine which have the same airfoil shape, but are made of three different materials, namely aluminum alloy, a complex material combining aluminum alloy and steel, and a composite material which is unidirectional fiberglass. In the case of an all-metal blade, its airfoil and root are made of aluminum alloy. In the case of complex blade airfoil material, the root is made of steel which is also a component of the airfoil material. In the case of a composite blade, the root is steel and is connected at the root section to its composite airfoil. The main attention when comparing models of the mechanical behavior of three types of blades is paid to the influence of the connection of complex and composite elements with the root on the dynamic characteristics of the blade as a whole which is achieved by considering the contact interactions of the elements under the action of centrifugal and aerodynamic loads and the subsequent transfer of the prestressed state of the blades to the modal analysis for determination of the dynamic characteristics of samples and their comparison. In order to correctly display the fixation of elements in the fan impeller in the case of an aluminum blade, the sector of cyclic symmetry of the rotor is considered which makes it possible to draw a conclusion about the possibility of further separate consideration of the blade for determination of its dynamic characteristics due to the much greater stiffness of the connection of the blade with the impeller in comparison with stiffness of the blade airfoil, and to generalize this conclusion in the case of a complex blade by considering a steel root with an aluminum profile with rigid clamping of the model on the contact shelves of the root, and in the case of a composite blade by considering an airfoil with rigid clamping in the root section, where the fastening to the steel root of the blade takes place. The results of a comparative analysis of the dynamic behavior of three types of blades with the same airfoil shape are presented in the form of a study of the blade natural frequencies and mode shapes.

Keywords: blade airfoil; contact; composite material; dynamic response; aerodynamic load.

Вступ. Вентилятори головного провітрювання – це роторні машини, що виконують функції обміну повітря між атмосферою і підземним устаткуванням шахти [1].

Такі типи машин є ключовими елементами системи життєзабезпечення в гірничодобувній промисловості, і, відповідно, до них висуваються жорсткі вимоги по аеродинамічним характеристикам і параметрам міцності. Крім того, практично у всіх випадках з основним вентилятором на підприємствах встановлюється резервний, що працює одночасно з основним.

По способам забору, транспортування та подачі повітря вентилятори головного провітрювання розділяються на відцентрові та осьові. Відцентрові вентилятори в більшості випадків працюють при відносно невисоких окружних швидкостях і створюють відносно високий перепад тиску повітря, а осьові, у свою чергу, мають більш високі оберти і здатні переміщати більші маси повітря при невисокому перепаді тиску. Певний тип вентилятора

вибирається виходячи з конкретних вимог підприємства.

Враховуючи той факт, що 10% використання виробленої електроенергії в промисловості припадає на вентиляційні системи, вентилятори головного провітрювання повинні мати оптимальну конструкцію, що забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії при заданих параметрах споживання, що досягається за допомогою профілювання лопаток колеса вентилятора, проектування геометричної форми вхідних коробок і подальшого застосування професійних конструкторських і технологічних підходів до об'єднання компонентів машини, виробництва та монтажу.

Оскільки вентилятор головного провітрювання є швидкохідною роторною машиною, він знаходиться в інтенсивному полі відцентрових сил, що накладає жорсткі обмеження на його статичні і динамічні параметри міцності. Ситуація з визначення цих параметрів може бути ускладнена ще й тим фактом, що за рахунок наявності теплових джерел (наприклад, двигуна і підшипників) з однієї сторони і середовища

конвективного теплообміну (переміщувачого повітря) з іншого машина має значний температурний градієнт. Він вимагає визначення з метою уточнення властивостей матеріалу в тій або іншій частині ротора, а також урахування неоднорідності температурних деформацій.

Не менш важливим є і акустичний аспект, оскільки машини такого типу піддаються жорсткій регламентації відповідно до норм безпеки по охороні праці.

Усі ці факти в цілому дозволяють зробити висновок про те, що вентилятор головного провітрювання при його проектуванні та перевірці вимагає розробки комплексного підходу, який враховує взаємний вплив статичних і динамічних параметрів міцності, а також аеродинамічних, теплових і акустичних ефектів.

Такий підхід був запропонований в роботі [2], яка представила комплексний аналіз статичної та динамічної міцності ротора вентилятора головного провітрювання шахти з алюмінієвою лопаткою із урахуванням аеродинамічних та теплових навантажень.

Проте такий аналіз не міг врахувати високої абразивності середовища, що переміщувалося цим вентилятором та призводило до швидкого зношування пера лопатки та необхідності їх заміни кожні декілька місяців через суттєву зміну форми зношеного профілю та, як результат, падіння аеродинамічних характеристик. Заміна суцільнометалічної алюмінієвої лопатки означала, що окрім зношеного профілю пера лопатки потребував заміни й незношений та придатний до застосування хвостовик, що підвищувало вартість таких заміни. З метою зменшення витрат на заміни та пошуку більш оптимального рішення в такій ситуації, в роботі [3] була запропонована конструкція складної сталево-алюмінієвої лопатки, що складалася зі сталевого хвостовика та алюмінієвого профілю пера лопатки, який наплавлявся на сталеву частину, приварену до хвостовика. В цій роботі був також запропонований підхід до моделювання механічної поведінки та визначення міцності такої лопатки та проведене експериментальне дослідження з метою перевірки цього підходу.

Робота [4] пропонує інший погляд на вирішення цієї проблеми та проводить розробку композиційного пера лопатки того ж самого вентилятора, яке у кореневому перерізі кріпиться до сталевого хвостовика. Композиційне перо виконане зі склопластику, механічні властивості якого були визначені експериментально за допомогою експериментальної установки, описаної в роботі [5], та який має змінну товщину шарів та посилюючі ребра жорсткості для забезпечення оптимального співвідношення масових характеристик та параметрів міцності такої лопатки.

Таким чином, проведені дослідження дозволили розробити різні варіанти лопаток одного вентилятора та з одним і тим самим профілем, які є виготовленими

із різних матеріалів та міцними під дією робочих навантажень, що перевірено за допомогою засобів експерименту та чисельного моделювання. Проте залишається питання прямого порівняння динамічних властивостей таких лопаток та висновків щодо можливого впливу цих властивостей на зміну динамічної поведінки машини при переході від одного конструктивного рішення до іншого, що є предметом дослідження в даній роботі.

1. Аналіз сучасного стану вирішення проблеми. Питання розробки рішень для заміни лопаток роторних машин різних типів широко розглядається в сучасних наукових дослідженнях, від порівняння ефективності застосування сталевих та композиційних лопаток стельових вентиляторів у приміщеннях [6-8] до використання композиційних лопаток у вентиляторних ступенях турбореактивних двигунів [9, 10] та ступенях газових турбін [11]. Робота [12] дає детальний огляд того, як композиційні матеріали застосовуються зокрема в турбомашинах. Композиційні лопатки пропонуються на заміну металевих лопаток пропелерів морських суден [13, 14]. Композиційні матеріали використовуються для виготовлення лопаток гідротурбін [15-17] та вітрогенераторів [18, 19]. На додачу, композиційні матеріали також можуть виступати конструктивним рішенням для лопатей гелікоптерів [20, 21].

Порівняння характеристик міцності композиційних лопаток та тих, що виготовлені з різних сплавів, також є популярною темою дослідження в роботах. Наприклад, в [6] виконується порівняння композиційної та сталеві лопаток для стельового вентилятора. В [9] наводиться два підходи до виготовлення складних лопаток вентиляторної ступені газотурбінного двигуна, один з яких передбачає використання складної металічної конструкції лопатки із алюмінієвою серцевиною, а інший комбінацію склопластику та вуглепластику для обшивки лопатки та композиційні стільники для серцевини. В [11] порівнюються переміщення та деформації композиційної, титанової, сталеві та алюмінієвої лопаток газової турбіни. В [21] проводиться порівняння напружень та динамічних характеристик алюмінієвої, склопластикової та вуглепластикової лопатей гелікоптера. В [22] порівнюються характеристики міцності лопаток пропелера літака, що виготовлені з алюмінієвого сплаву та композиту із алюмінієвою матрицею та оболонкою бананового листа у якості армування.

Саме тому порівняння динамічних характеристик лопаток вентилятора, виготовлених з різних матеріалів, є актуальним завданням.

2. Основні відомості про осьовий вентилятор. На рисунку 1 зліва представлений загальний вид вентиляторної установки, її вхідні коробки, змонтовані на бетонній основі, зі схематично показаним двигуном. Дана конструкція вхідних коробок була спеціально розроблена для виконання

жорстких вимог по габаритам, вазі і якості установки. На рисунку 1 справа представлена конструкторська

модель ротора осьового вентилятора, який має робоче колесо з діаметром 3.2 м.

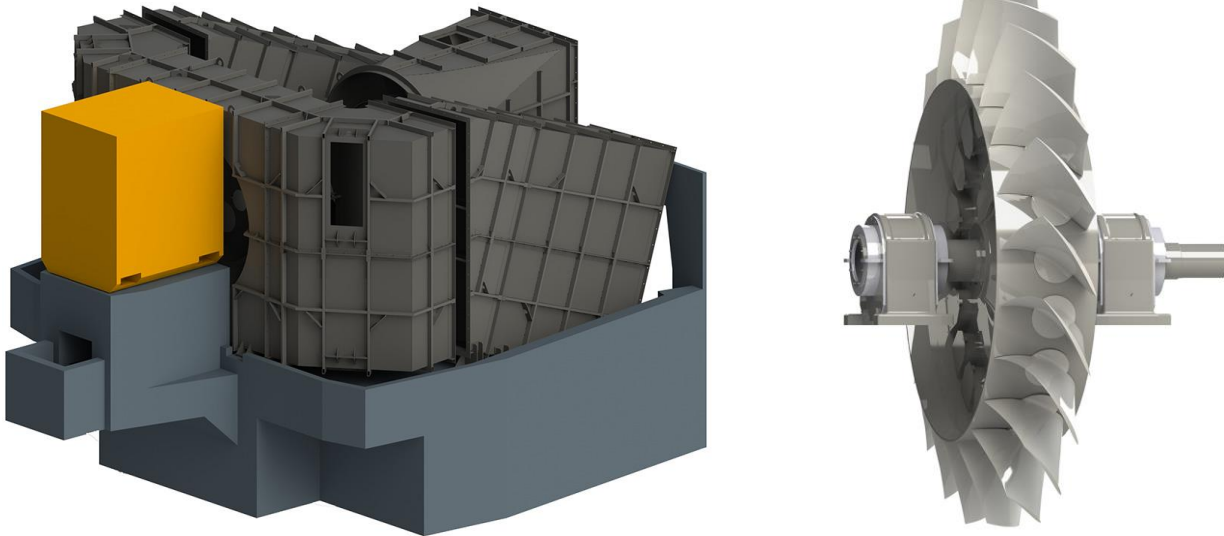


Рис. 1 – Загальний вид вентиляторної установки (зліва) та ротор вентилятора в підшипникових опорах (справа)

Вал і робоче колесо вентилятора виготовлені з високоякісної вуглецевої сталі, а лопатки в первинному варіанті – з легкого алюмінієвого сплаву. При цьому вентилятор призначений для переміщення маси повітря з температурою в межах від -5°C до 40°C зі швидкістю обертання 750 об/хв. Він закріплений у двох роликових підшипниках – радіально-упорному та упорному.

Практично весь експлуатаційний період вентилятор працює в стаціонарному режимі з мінімальною кількістю пусків і зупинок.

3. Аеродинамічний розрахунок проточної частини вентиляторної установки. З метою отримання картини розподілу аеродинамічних навантажень на лопатки робочого колеса, а також

параметрів конвективного теплообміну між повітрям проточної частини і матеріалом вентилятора в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу вирішена стаціонарна задача течії газу через напрямний систему апарат-ротор-випрямний апарат в постановці циклічної симетрії.

На рисунку 2 зліва показана скінченно-об'ємна модель проточної частини вентиляторної установки, що представляє з себе сектор циклічної симетрії повітря навколо лопаток статорів та ротору, із схематичним позначенням поверхонь симетрії і входу та виходу повітря. Слід відзначити, що використані налаштування моделі дозволяють розрізнити в числі ступенів статор-ротор-статор, а також правильно відобразити умови переходу між інтерфейсами рухомих і нерухомих частин газу.

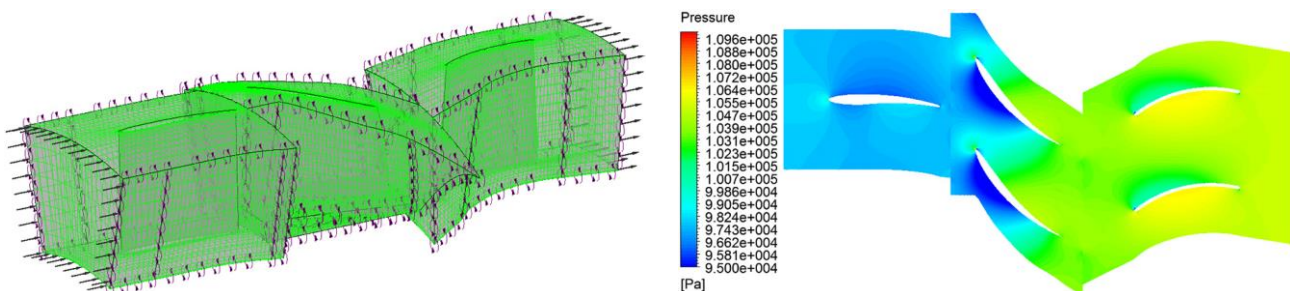


Рис. 2 – Розрахунок проточної частини вентилятора у вигляді скінченно-об'ємної моделі (зліва) та результатів аеродинамічного розрахунку (справа)

Вхідною інформацією для аеродинамічного розрахунку були граничні умови (повний тиск $P_t = 101325$ Па на вході напрямного апарату; масовий розхід $Q = 420$ кг/с на виході випрямного апарату; умови періодичної симетрії на відповідних гранях об'ємів повітря), а також властивості робочого середовища, зокрема температура вентилятора 22°C .

У результаті проведення стаціонарного аналізу течії газу отримана картина розподілу його

кінематичних і силових характеристик у проточній частині вентилятора, зокрема, розподіл вектору швидкостей і значення повного тиску. На рисунку 2 справа показаний розподіл повного тиску в меридіональному перерізі проточної частини турбомашини. Відповідно до обраної моделі теплопередачі, отримані параметри конвективного теплообміну середовища (а саме поверхневий коефіцієнт α і зсувна температура T_{ref}), які в результаті

були використані для аналізу теплопровідності у вентиляторі та подальшої корекції механічних властивостей матеріалів та визначення температурних напружень при обчисленні переднапруженого стану.

4. Розрахункова модель лопаток вентилятора.

У процесі побудови розрахункової моделі для проведення основних типів аналізів конструкторська модель ротора осьового вентилятора, зображена на рисунку 1, була піддана ряду геометричних спрощень в місцях, що істотно не впливають на точність визначення основних параметрів напружено-деформованого стану (НДС) та динамічних характеристик моделі, але здатні значно збільшити

розмірність задачі через необхідність згущення скінченно-елементної сітки в цих місцях.

Оскільки жорсткість підшипників є набагато більшою порівняно з жорсткістю конструкції, у розрахунковій моделі вони були замінені жорсткими опорами з відповідними місцями та напрямками закріплень. Крім того, в ході проведення попередніх аналізів було встановлено, що неврахування ваги конструкції не вносить значної похибки в отримання основних характеристик НДС конструкції, а це дозволило для зниження розмірності задачі та чисельної похибки розглядати її у постановці циклічної симетрії, як показано на рисунку 3.

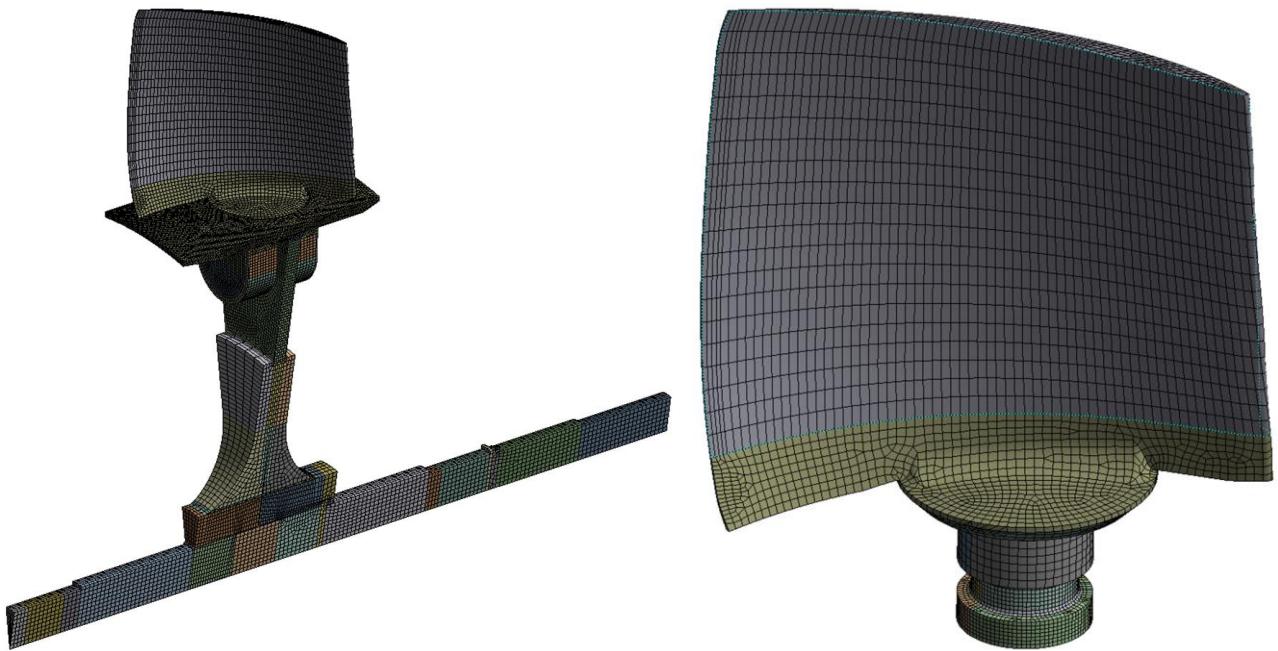


Рис. 3 – Скінченно-елементна модель ротору із алюмінієвою лопаткою у вигляді сектору циклічної симетрії (зліва) та лопатки, зображеної окремо (справа)

Більш детально процес підготовки та контролю якості скінченно-елементної моделі ротору вентилятора, що розглядається, описаний в роботі [2].

Сталево-алюмінієва лопатка, що складається зі сталевого хвостовика, до якого приварений сталевий профіль спеціальної форми, на який наплавляється алюмінієвий профіль лопатки, має принципову схему, зображену на рисунку 4 зліва, та моделюється за допомогою скінченно-елементної сітки, показаної на рисунку 4 справа. Взаємодія між сталевими та алюмінієвими елементами описується моделями нелінійних контактів, що більш детально обговорюється в роботі [3]. Лопатка такої конструкції встановлюється в ротор вентилятора, зображеного на рисунку 1, на заміну алюмінієвій лопатці.

Композиційна лопатка складається з склопластикового пера, зображеного на рисунку 5, та сталевого хвостовика, який у кореновому перерізі профілю з'єднаний із ним. Композиційний матеріал моделюється оболонковими скінченними елементами, що враховують різну кількість та спрямованість шарів склопластику, а взаємодія між сталевим та

композиційним елементами моделюється жорстким з'єднанням, враховуючи велику різницю у жорсткості сталі та композиційного матеріалу. Більш детально схема з'єднання та загальний вид композиційної лопатки обговорюється в роботі [4]. Вона також встановлюється в ротор вентилятора, зображеного на рисунку 1, на заміну алюмінієвій лопатці.

Таким чином, попередньо були побудовані три моделі принципово різних виконань лопатки одного і того ж самого профілю та із тою ж самою формою кріплення для забезпечення взаємозамінності таких рішень при встановленні в один і той самий ротор та для забезпечення таких же самих аеродинамічних параметрів.

В зазначених роботах за допомогою описаних в цьому розділі розрахункових моделей детально досліджувалась міцність цих лопаток, а в даній роботі пропонується використати ці розрахункові моделі для визначення динамічних характеристик цих лопаток із урахуванням переднапруженого стану та усіх особливостей моделей та порівняти їх для встановлення переваг та недоліків кожного типу

лопатки з точки зору їхнього впливу на динамічну поведінку роторної машини.

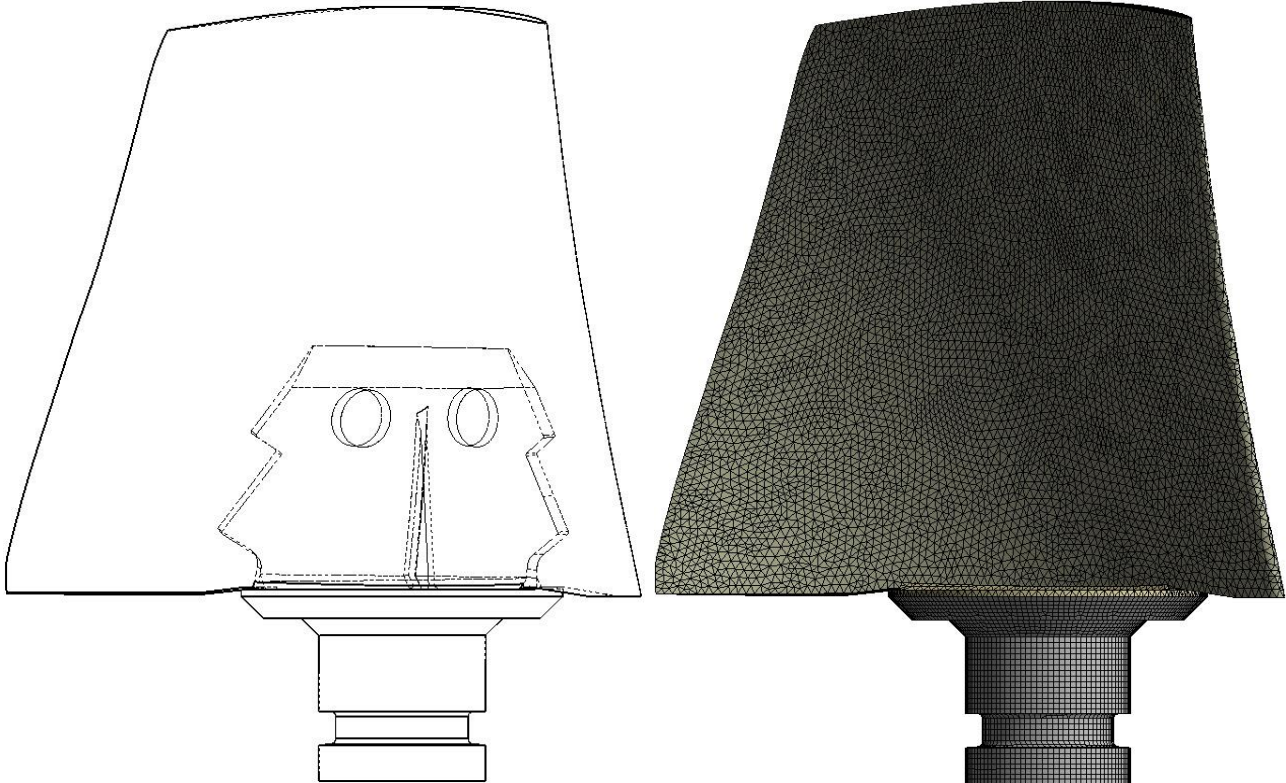


Рис. 4 – Сталево-алюмінієва лопатка у вигляді схематичного зображення (зліва) та скінченно-елементної моделі (справа)

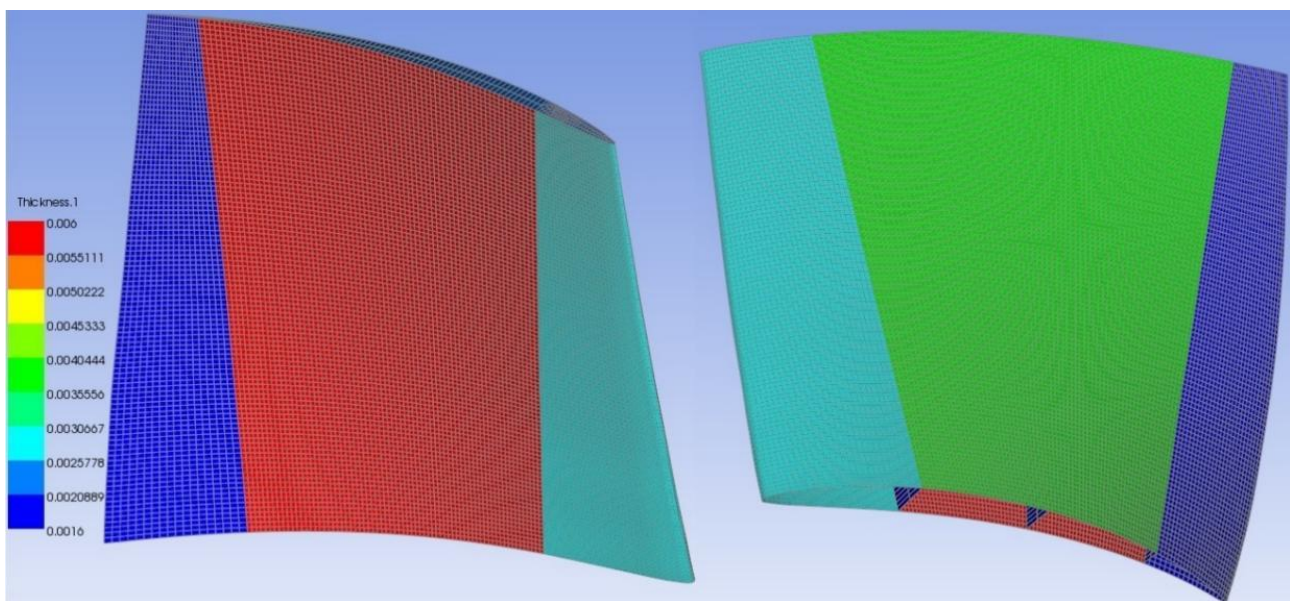


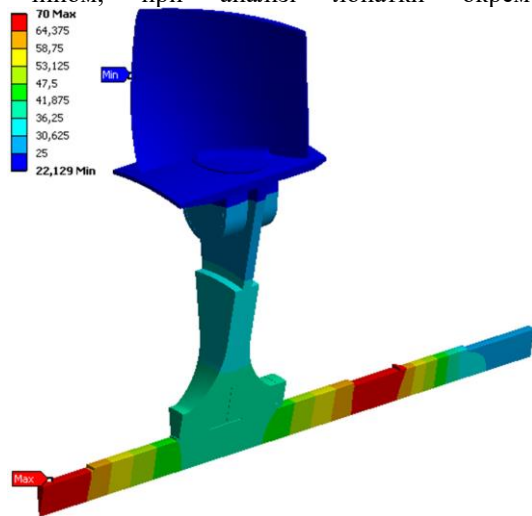
Рис. 5 – Скінченно-елементна модель композиційного профілю лопатки, що кріпиться до сталевго хвостовика, із зазначенням товщини композиту, [м]

5. Термічне та аеродинамічне навантаження на лопатку. Для проведення аналізу статичних деформацій та напружень ротора вентилятора із різними лопатками був визначений розподіл температури по сектору циклічної симетрії ротора, що показаний на рисунку 6 зліва, та статичне навантаження на перо лопатки з боку тиску повітря,

яке проходить через проточну частину вентилятора, що показано на рисунку 6 справа.

Змінний розподіл температур впливає як на властивості матеріалів, так і на температурні напруження в місцях, де є обмеження розширення конструкції. Втім, як видно з рисунку, в місці лопатки спостерігається досить незмінний розподіл температури завдяки постійному охолодженню

лопатки з боку повітря, що протікає навколо неї. Таким чином, при аналізі лопатки окремо



непостійністю температури можна буде знехтувати.

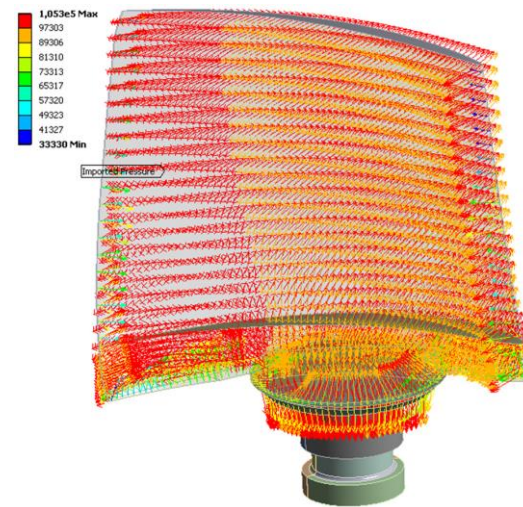


Рис. 6 – Поле температур у роторі, [°C] (зліва) та тиску на профіль лопатки, [Pa] (справа), які використовуються для статичного розрахунку переднапруженого стану ротору для подальшого визначення динамічних характеристик

6. Статичний аналіз лопаток для визначення переднапруженого стану. Проведений статичний аналіз напружено-деформованого стану у роторі вентилятора з алюмінієвою, сталєво-алюмінієвою та композиційною лопатками дозволив визначити напруження в моделі під дією інерційних (відцентрові сили), термічних (неоднорідний розподіл температур) та аеродинамічних (тиск повітря) навантажень. На рисунку 7 показаний контурний графік еквівалентних

за Мізесом напружень у алюмінієвій лопатці та секторі циклічної симетрії ротора, який її містить.

Як видно з рисунків, суттєві значення напруження набувають в хвостовику лопатки в місці його кріплення до диску ротора, а також в місцях кріплення лопатки на роторі. В той же самий час, переважна більшість пера лопатки залишається ненапруженою, що й дало змогу розробити сталєво-алюмінієві та композиційні варіанти такої лопатки.

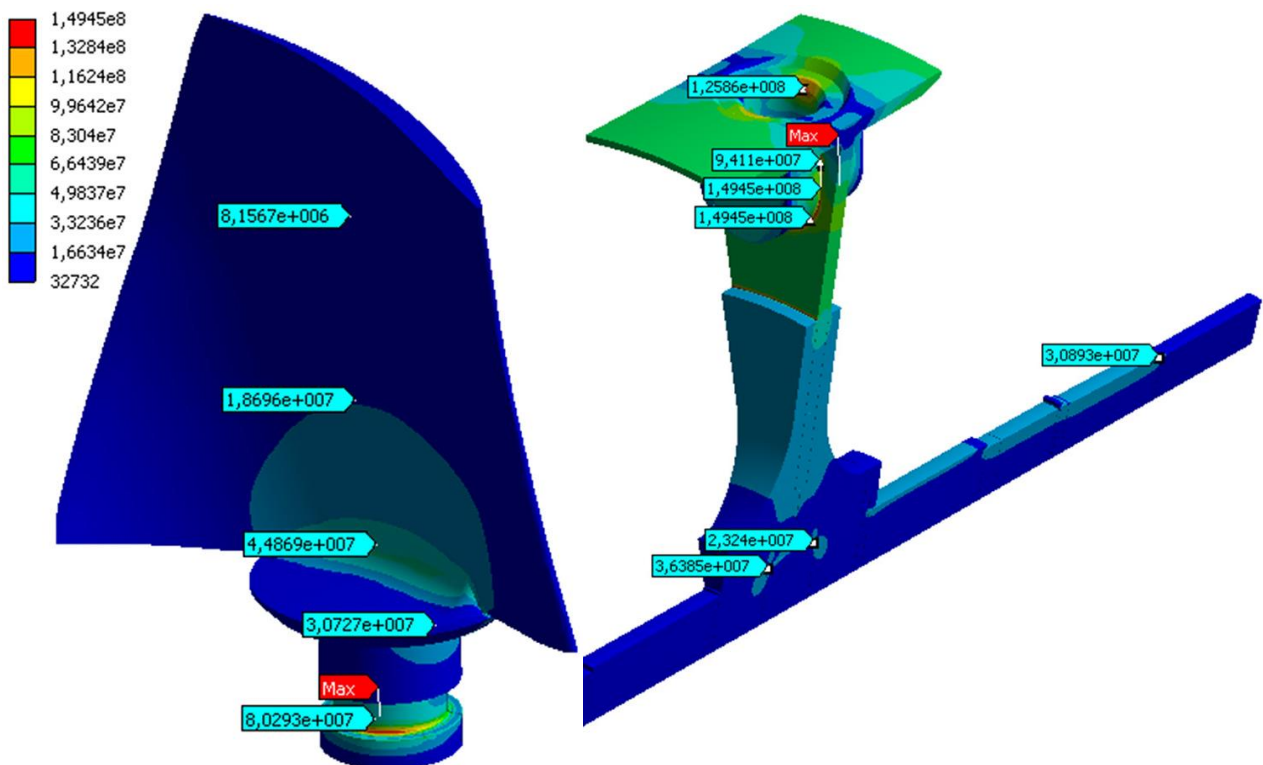


Рис. 7 – Контурний графік еквівалентних за Мізесом напружень, [Pa] у алюмінієвій лопатці (зліва) та роторі, що її містить (справа)

Напружений стан в сталєво-алюмінієвій лопатці в умовах, аналогічних до алюмінієвої лопатки, показано на рисунку 8. На цьому рисунку можна побачити, що напруження в алюмінієвій частині сталєво-алюмінієвої є вищими за ті ж самі місця на алюмінієвій лопатці через наявність концентраторів напружень в місцях з'єднання алюмінієвої та сталєвої

частин. Проте, як було зазначено у вступі, головною метою застосування такої конструкції було не зниження напружень, а вирішення проблеми швидкого зношення лопаток шляхом заміни лише її профілів, а не усіх лопаток в цілому. Тому основною вимогою з точки зору напружень було виконання критерію міцності, а не їхнє зниження.

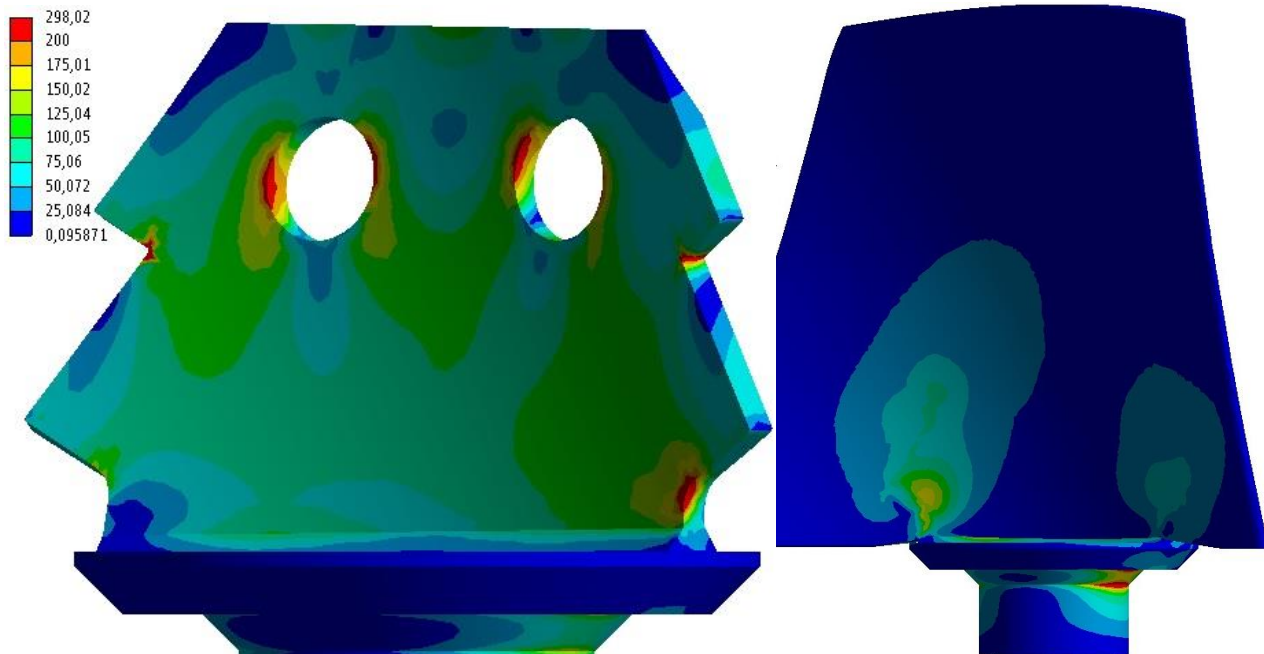


Рис. 8 – Контурний графік еквівалентних за Мізесом напружень, [МПа] в сталевій частині (зліва) та сталєво-алюмінієвій лопатці в цілому (справа)

У випадку композиційної лопатки її міцність в умовах, аналогічних до умов алюмінієвої та сталєво-алюмінієвої лопаток, визначалась за допомогою аналізу функції критерію міцності Хашина,

зображеної на рисунку 9, а переднапружений стан для аналізу динамічних характеристик передавався за тим же самим принципом, що й у випадку двох попередніх моделей.

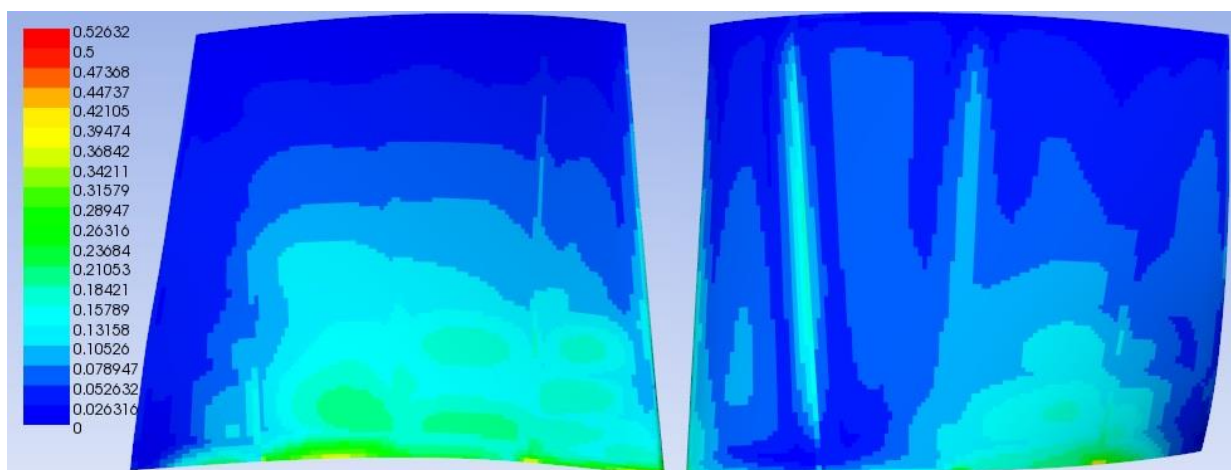


Рис. 9 – Контурний графік розподілу функції критерію міцності Хашина у пері лопатки, [-]

За допомогою таких дій, були підготовлені усі необхідні моделі та розрахунку для проведення порівняльного аналізу динамічних характеристик алюмінієвої, сталєво-алюмінієвої та композиційної лопаток, що враховує особливості навантаження та

кріплення кожного типу лопатки шляхом лінеаризації нелінійних типів контактів відповідно до їхнього статусу при передачі переднапруженого стану з нелінійного статичного аналізу до лінійного динамічного, а саме модального аналізу.

7. Результати аналізу динамічних характеристик лопаток та їхнє обговорення. Було проведено декілька досліджень динамічної поведінки роторів із різними лопатками. В таблиці 1 наведено порівняння абсолютних значень власних частот алюмінієвої, сталєво-алюмінієвої та композиційної

лопаток (другий, третій та четвертий стовпчики) із характеристикою відповідних форм коливань. Разом із цим, у першому та другому стовпчиках порівнюються власні частоти коливань при моделюванні ротора із алюмінієвими лопатками, власні форми якого показані на рисунку 10, та окремо алюмінієвої лопатки.

Таблиця 1 – Власні частоти (ВЧ) суцільно алюмінієвої, біметалічної та композиційної лопаток

№ ВЧ	Колесо з алюмінієвою лопаткою		Алюмінієва лопатка		Сталєво-алюмінієва лопатка		Композиційна лопатка	
	ВЧ, [Гц]	Характер форми коливань	ВЧ, [Гц]	Характер форми коливань	ВЧ, [Гц]	Характер форми коливань	ВЧ, [Гц]	Характер форми коливань
1	30.5	Кручення ротора	142.80	Згинання у напрямі меншої жорсткості	95.12	Згинання у напрямі меншої жорсткості	120.36	Згинання у напрямі меншої жорсткості
2	58.8	Перша форма згинання диску	195.85	Згинання у напрямі більшої жорсткості	213.55	Згинання у напрямі більшої жорсткості	217.69	Кручення навколо осі
3	69.2	Друга форма згинання диску	300.23	Кручення навколо осі	283.25	Кручення навколо осі	285.93	Одна хвиля вздовж проточної частини
4	86.4	Зонтична форма	529.92	Кручення за чотирма границями пера	512.44	Кручення за чотирма границями пера	312.91	Дві хвилі вздовж проточної частини
5	120.7	Перша форма згинання ротора	607.56	Кручення за двома границями пера	554.91	Кручення за двома границями пера	334.57	Згинання зверху вихідної кромки
6	139.7	Перша форма коливань лопатки	724.89	Згинання верхньої границі пера	787.72	Згинання верхньої границі пера	369.10	Дві хвилі та згинання вихідної кромки

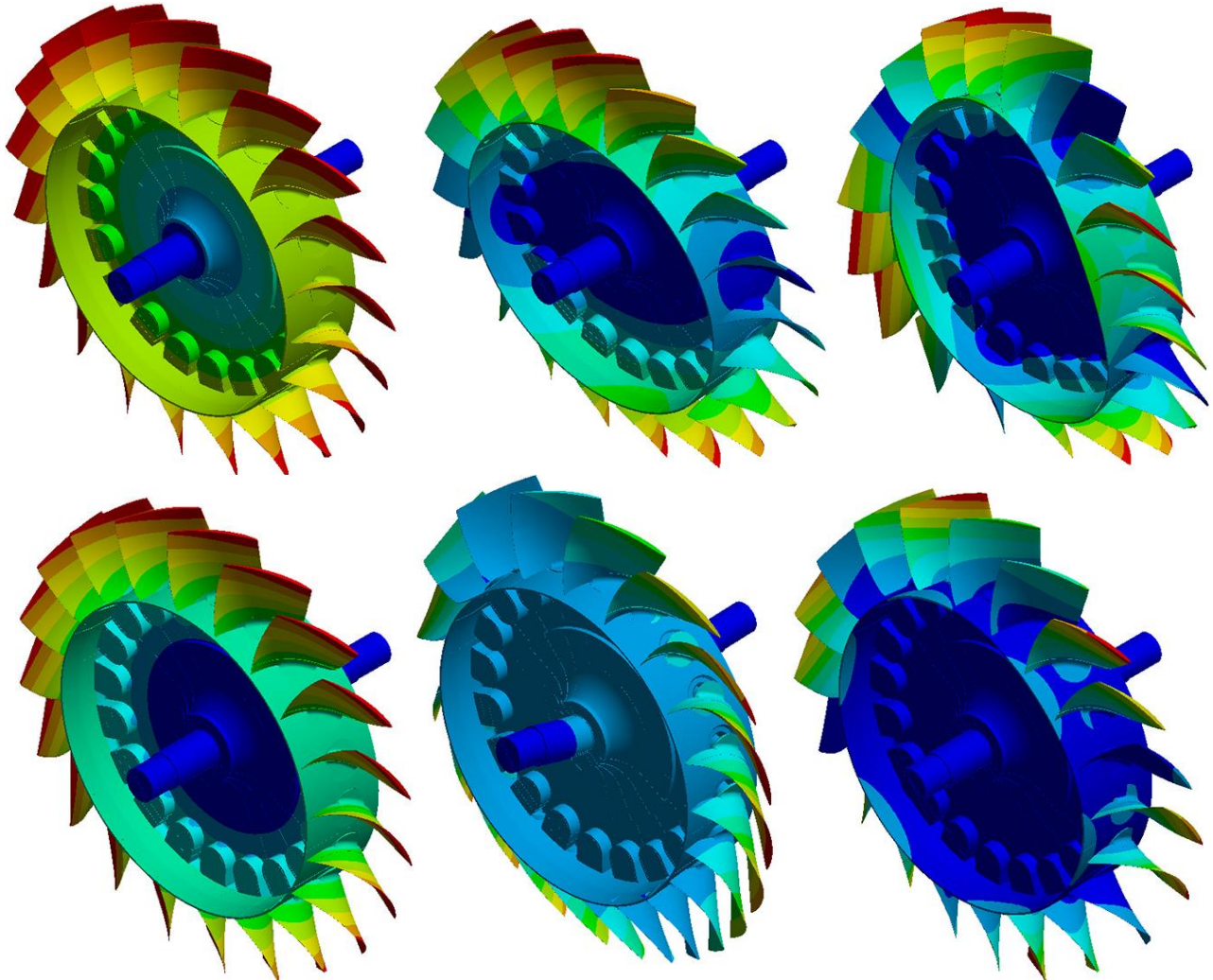


Рис. 10 – Власні форми коливань ротору, що містить алюмінієві лопатки

Як видно із таблиці, шоста власна частота ротора з алюмінієвими лопатками є в межах інженерної точності першою власною частотою коливань алюмінієвої лопатки, що розглядається окремо та жорстко закріплена по поверхням, що контактують із диском ротора в повній моделі. Із тих же самих міркувань, для більш детального порівняння саме лопаткових власних частот та форм, подальший порівняльний аналіз виконаний для окремого розгляду лопаток, що у випадку сталеві-алюмінієвого варіанту закріплені по тим же самим поверхням, що й

алюмінієва лопатка, а у випадку композиційного варіанту закріплені по кореневому перерізу із відкиданням сталеві частини за рахунок набагато більшої жорсткості сталі у порівнянні зі склопластиком та набагато меншої маси пера зі склопластику у порівнянні з масою пера з алюмінію.

Рисунок 11 представляє перші шість власних форм коливань сталеві-алюмінієвої лопатки, які за характером співпадають із відповідними формами алюмінієвої лопатки, про що свідчить опис у другому та третьому стовпчику таблиці 1.

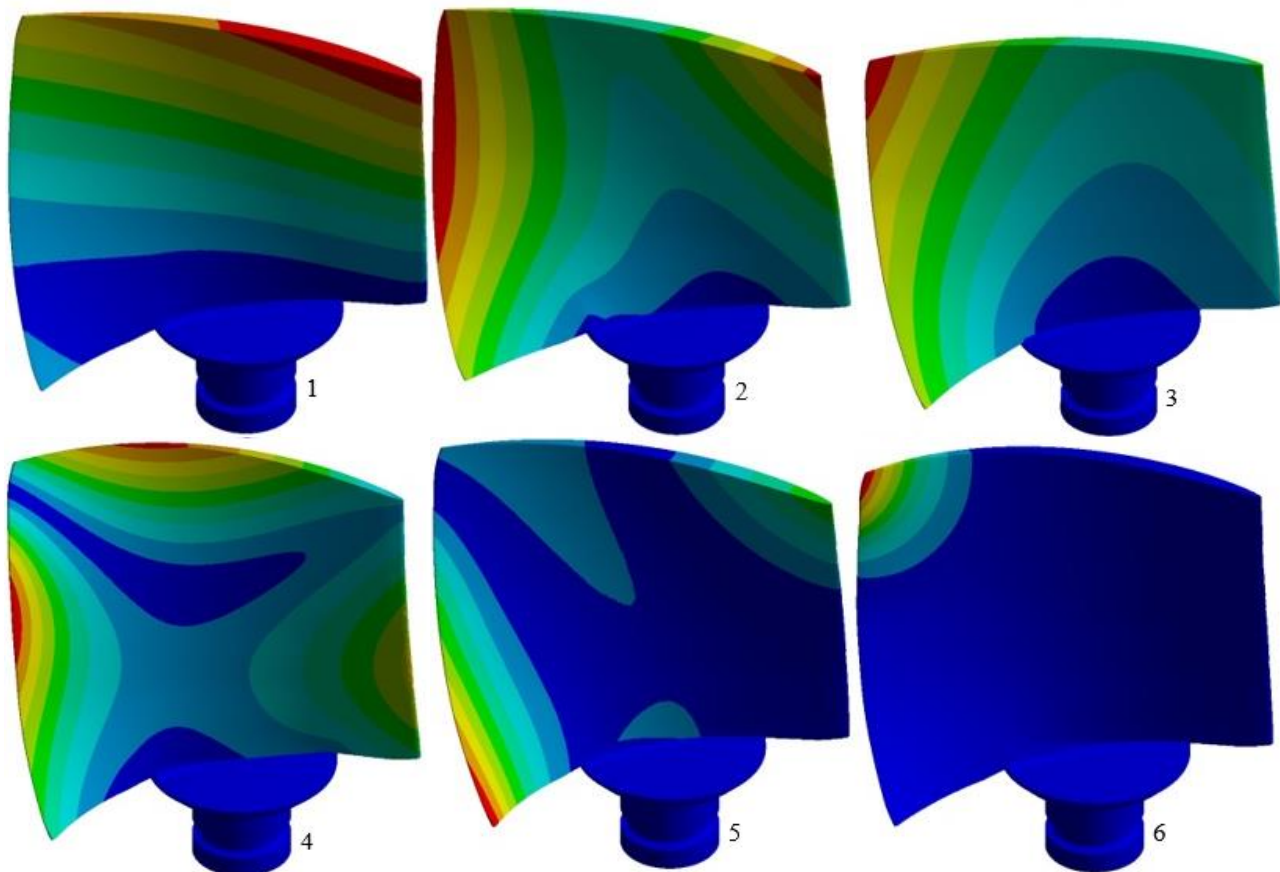


Рис. 11 – Власні форми коливань сталеві-алюмінієвої лопатки

Порівняння власних частот алюмінієвої та сталеві-алюмінієвої лопаток свідчить про те, що найбільш суттєва відмінність між ними є для першої власної частоти, яка у випадку сталеві-алюмінієвої лопатки є приблизно в півтора рази меншою за відповідне значення для алюмінієвої лопатки. Поясненням цього є той факт, що відповідна форма коливань характеризується в обох випадках згинанням у напрямку меншої жорсткості пера, що у випадку алюмінієвої лопатки забезпечується усім кореневим перерізом пера, а у випадку сталеві-алюмінієвої лопатки лише сталевію частиною, яка приварена до сталевію хвостовика та на яку наноситься алюмінієве перо (рис. 4). Вищі власні частоти двох лопаток є співставними із відмінністю до 10%, що обумовлено тим фактом, що на відповідні власні форми має вплив

жорсткість саме пера лопатки, яке в обох випадках є алюмінієвим за виключенням невеликого об'єму сталевію серцевини у сталеві-алюмінієвому варіанті.

Отже, сталеві-алюмінієвий варіант лопатки при порівнянні динамічних характеристик має недолік у вигляді суттєвого зниження першої власної частоти лопатки у порівнянні з алюмінієвим варіантом. В той же самий час, цей недолік для даної конкретної машини нівелюється тим фактом, що навіть при такому зниженні власної частоти відстроювання від кратностей частоти збуджуючого навантаження є достатнім, щоб забезпечити безпечне функціонування машини, що було доведено в [3].

Композиційний варіант лопатки призводить до появи щільнішого спектру власних частот, показаних у таблиці 1, та форм, показаних на рисунку 12.

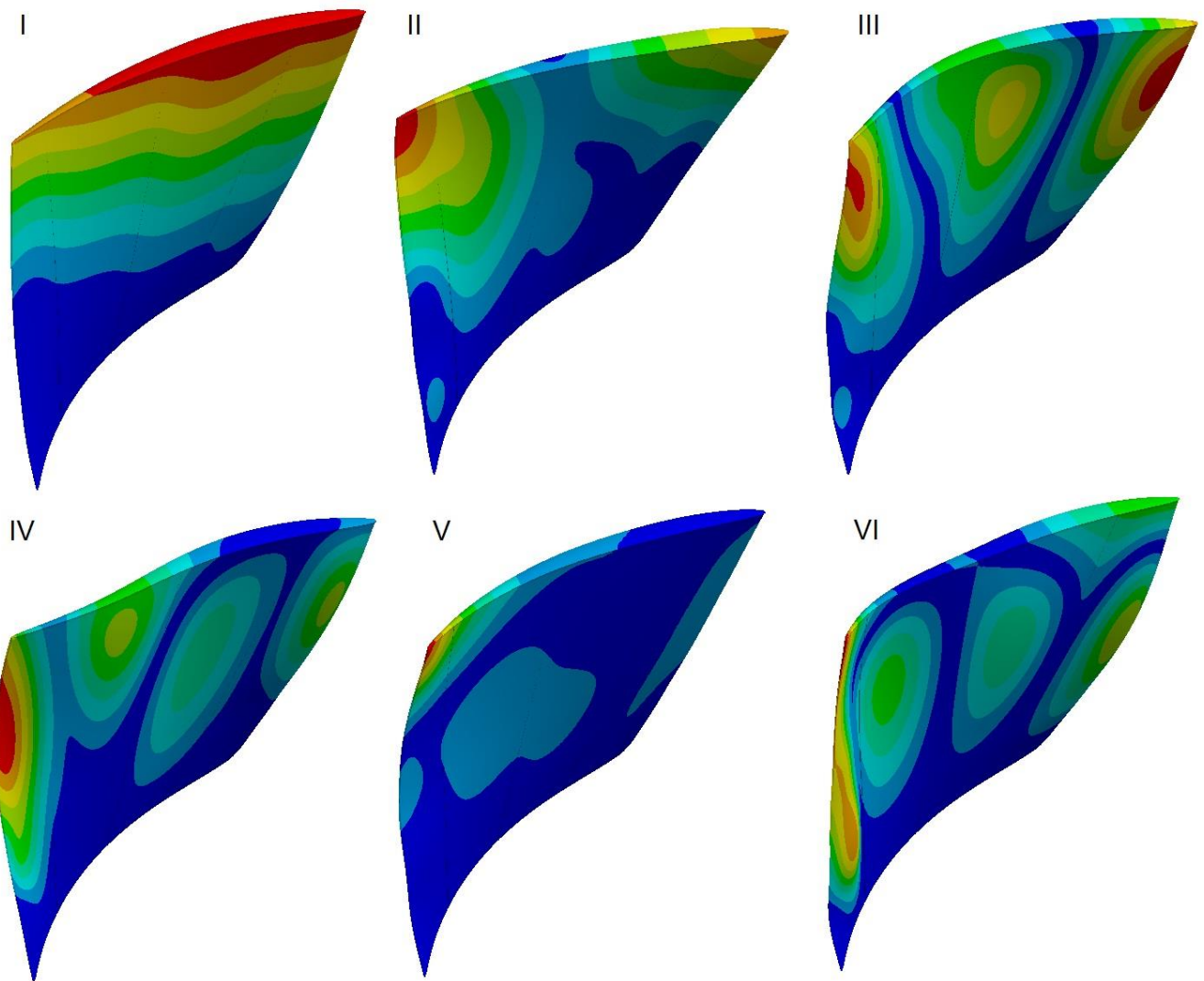


Рис. 12 – Власні форми коливань композиційного пера лопатки

Важливим є той факт, що перша власна форма пера композиційної лопатки є більш наближеною до відповідного значення алюмінієвої лопатки у порівнянні зі сталеву-алюмінієвим варіантом, що свідчить про ефективність застосованих ребер жорсткості у композиційному варіанті для супротиву згинанню пера лопатки. Друга власна частота композиційної лопатки є також близькою до двох попередньо розглянутих варіантів, оскільки вона пов'язана із глобальною деформацією пера. Вищі ж власні частоти композиційної лопатки є меншими за відповідні значення двох попередньо розглянутих варіантів, що обумовлено їх відповідністю власним формам, пов'язаним із коливаннями композиційного пера як оболонки, а не як суцільного тіла.

Отже, композиційний варіант лопатки при порівнянні динамічних характеристик насамперед із алюмінієвим варіантом має недоліки, які полягають у зниженні першої власної частоти та щільнішому спектрі власних частот. Проте це не є проблемою для конкретної машини, що було продемонстровано в [4].

Варто також відзначити, що такі спостереження зроблені для розглянутої форми профілю лопатки,

типу машини та кріплень. У випадку інших геометричних параметрів висновки щодо конкретних значень та співвідношень розглянутих типів лопаток можуть відрізнятись.

Висновки. В роботі було проведено дослідження динамічних характеристик трьох варіантів лопатки вентилятора головного провітрювання шахти із одним і тим же самим профілем для збереження аеродинамічних показників машини та кріпленням для встановлення в один і той же самий диск ротора. Перший та первісний варіант є суцільно алюмінієвим, другий – складним сталеву-алюмінієвим, а третій – композиційним.

В попередніх дослідженнях була доведена ефективність використання сталеву-алюмінієвого та композиційного варіантів для вирішення проблем функціонування машини, зокрема, швидкого зношування профілів лопаток і, як результат, падіння аеродинамічних характеристик та потреби заміни лопаток разом із хвостовиками.

В представленому в роботі дослідженні був проведений порівняльний аналіз динамічних

характеристик трьох варіантів лопаток, метою якого було доведення того факту, що використання нових рішень не призведе до проблем у роботі машини з точки зору її динамічної поведінки. Таке дослідження проводилося із урахуванням інерційних, термічних та аеродинамічних навантажень лопаток, особливостей їх кріплення, а також впливу переднапруженого стану від цих навантажень на динамічні характеристики, щоб врахувати усі можливі чинники, яким повинна бути приділена увага при аналізі механічної поведінки твердого тіла, що деформується.

В результаті проведеного порівняння було встановлено, що використання як сталевих-алюмінієвих, так і композиційних варіантів лопатки через особливості конструкції в той чи іншій мірі призводить до зниження власних частот коливань лопатки, зокрема першої власної частоти, що потенційно може вплинути на резонансний стан системи, проте в даному випадку конкретної машини такі зміни в динамічних характеристиках не мають суттєвого впливу, що дозволяє використовувати усі варіанти лопатки за їхнім призначенням.

Список літератури

1. Мартиненко В.Г. Розробка здвоєної лопатки осевого вентилятора із підвищеними аеродинамічними характеристиками / В.Г. Мартиненко, М.І. Гриценко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – 2019. – № 1. – С. 28-33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2019.1.187414>
2. 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. URL: <http://journals.urau.ua/jme/article/view/57509> (дата звернення: 30.11.2023).
3. Мартиненко В.Г. Проекування, 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>
4. 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>
5. Martynenko V.G. Modernization of an experimental installation and a procedure for investigating the anisotropic viscoelastic properties of composite materials at elevated temperatures / V.G. Martynenko, Yu.N. Ulianov // Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 21 (2). – P. 3-11. <https://doi.org/10.15407/pmach2018.02.003>
6. Garg H. Comparative study of sheet metal and carbon fibre reinforced composites ceiling fan blade / H. Garg, J. Singh, M.R. Tyagi, K. Singh, K. Aditya, H. Gupta // In: Kumar, M., Pandey, R., Kumar, V. (eds.) Advances in Interdisciplinary Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – P. 413-419. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6577-5_39
7. Chandragowda M. Designing and enhancing the mechanical properties of composite fan blades by glass fiber reinforced polymer composites / M. Chandragowda, C. Chakrasali, S. Yogeshwara Rao, G. Krishna, P. Abhishek // Journal of Scholastic Engineering Science and Management. – 2022. – Vol. 1, Is 1. – P. 16-25. URL: <https://hal.science/hal-03698564/document> (дата звернення: 06.12.2023).
8. An X. Coupled numerical simulation and modal analysis of composite ducted propeller / X. An, B. Song, H. Xia, Y. Ding, Z. Jin, L. Lessard // Sixth International Symposium on Marine Propulsors. – 2019. – P. 1-8. URL: <https://www.marinepropulsors.com/proceedings/2019/MB2-4.pdf> (дата звернення: 06.12.2023).
9. Krishnam S. Recent developments of materials used in air breathing and advanced air breathing engines / S. Krishnam, G. Srinivas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 872. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012082>
10. Praveen Kumar S.D. Impact simulation: comparison of composite jet engine fan blade with and without leading edge reinforcement / S.D. Praveen Kumar, K.S. Tejas // International Research Journal of Engineering and Technology. – Vol. 08, Is. 08. – P. 1474-1479. URL: <https://www.irjet.net/archives/V8/i8/IRJET-V8I8208.pdf> (дата звернення: 06.12.2023).
11. Faiza K. A study of the thermo-mechanical behavior of a gas turbine blade in composite materials reinforced with mast / K. Faiza, M. Rabah, S. Salah, H. Ameddah // Revue des composites et des matériaux avancés. – Vol. 31. – P. 101-108. <https://doi.org/10.18280/rcma.310205>
12. Roeseler W.G. Composite structures: the first 100 years / W.G. Roeseler, B. Sarh, M.U. Kismarton // 16th International Conference on Composite Materials. – 2007. – P. 1-10. URL: https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/MonA/MoA_M1-01sp_roeselerw228184p.pdf (дата звернення: 07.12.2023).
13. Rokvam S. A computational iterative design method for bend-twist deformation in composite ship propeller blades for thrusters / S. Rokvam, N. Vedvik, L. Mark, E. Røncke, J. Ølnes, L. Savio, A. Echtermeyer // Open Engineering. – 2023. – Vol. 13. – P. 1-18. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0419>
14. Rokvam S. Designing composite adaptive propeller blades with passive bend-twist deformation for periodic-load variations using multiple design concepts / S. Rokvam, N. Vedvik, L. Savio, A. Echtermeyer // Polymers. – 2023. – Vol. 15, No. 12 (2749). – P. 1-34. <https://doi.org/10.3390/polym15122749>
15. Li H. Design and performance of composite runner blades for ultra low head turbines / H. Li, D. Zhou, J. Martinez, Z. Deng, K.I. Johnson, M. Westman // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 132. – P. 1280-1289. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.110>
16. Walker S.R.J. A life cycle assessment comparison of materials for a tidal stream turbine blade / S.R.J. Walker, P.R. Thies // Applied Energy. – 2022. – Vol. 309. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118353>
17. Finnegan W. Manufacture of high-performance tidal turbine blades using advanced composite manufacturing technologies / W. Finnegan, R. Allen, C. Glenmon, J. Maguire, M. Flanagan, T. Flanagan // Applied Composite Materials. – 2021. – Vol. 28. – P. 2061-2086. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09967-y>
18. Appadurai M. Finite element analysis of composite wind turbine blades / M. Appadurai, E.F.I. Raj // 7th International Conference on Electrical Energy Systems. – 2021. – P. 585-589. <https://doi.org/10.1109/ICEES51510.2021.9383769>
19. Teng H. Carbon fiber composites for large-scale wind turbine blades: applicability study and comprehensive evaluation in China / H. Teng, S. Li, Z. Cao, S. Li, C. Li, T.J. Ko // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11, No. 3 (624). – P. 1-22. <https://doi.org/10.3390/jmse11030624>
20. Hadār A. A novel composite helicopter tail rotor blade with enhanced mechanical properties / A. Hadār, A.D. Voicu, F. Baciú, D. Vlăsceanu, D.I. Tudose, S. Pastrama // Aerospace. – 2023. – Vol. 10, No. 7 (647). – P. 1-18. <https://doi.org/10.3390/aerospace10070647>
21. Sudhir Sastry Y.B. Stress analysis of helicopter composite blade using finite element analysis / Y.B. Sudhir Sastry, I. Bhargavi Rachana, K. Durga Rao // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2013. – Vol. 2, Is. 12. – P. 1291-1299. URL: <https://www.ijert.org/research/stress-analysis-of-helicopter-composite-blade-using-finite-element-analysis-IJERTV2IS120036.pdf> (дата звернення: 07.12.2023).
22. Louis S. Experimental study on strength comparison of light weight aluminium alloy propeller blade with metal propeller blade / S. Louis, P. Louis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 955. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/955/1/012034>

References (transliterated)

1. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Rozrobka zdvoynoyi lopatky os'ovoho ventylyatora iz pidvyshchenymy aerodynamichnymy kharakterystykamy [Development of a double blade axial fan with

increased aerodynamic characteristics]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 1, pp. 28-33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2019.1.187414>

2. 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, no. 4/1, pp. 44-52. Available at <http://journals.urau.ua/jme/article/view/57509> (accessed 30.11.2023).

3. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I., Mavrody S.V. Proektuvannya, analiz ta eksperymental'ne doslidzhennya statychnoyi mitsnosti kompozytsiynoyi bimetalichnoyi lopatky ventilyatora holovnoho provitryuvannya 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>

4. Martynenko V.G. Kompleksna otsinka mitsnosti kompozytsiynoyi lopatky ventilyatora holovnoho provitryuvannya 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>

5. Martynenko V.G., Ulianov Yu.N. Modernization of an experimental installation and a procedure for investigating the anisotropic viscoelastic properties of composite materials at elevated temperatures. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 3-11. <https://doi.org/10.15407/pmach2018.02.003>

6. Garg H., Singh J., Tyagi M.R., Singh K., Aditya K., Gupta H. Comparative study of sheet metal and carbon fibre reinforced composites ceiling fan blade. In: Kumar, M., Pandey, R., Kumar, V. (eds.) *Advances in Interdisciplinary Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, pp. 413-419. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6577-5_39

7. Chandragowda M., Chakrasali C., Yogeshwara Rao 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, Is 1, pp. 16-25. Available at <https://hal.science/hal-03698564/document> (accessed 06.12.2023).

8. An X., Song B., Xia H., Ding Y., Jin Z., Lessard L. Coupled numerical simulation and modal analysis of composite ducted propeller. *Sixth International Symposium on Marine Propulsors*, 2019, pp. 1-8. Available at <https://www.marinepropulsors.com/proceedings/2019/MB2-4.pdf> (accessed 06.12.2023).

9. Krishnam S., Srinivas G. Recent developments of materials used in air breathing and advanced air breathing engines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 872, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012082>

10. Praveen Kumar S.D., Tejas K.S. Impact simulation: comparison of composite jet engine fan blade with and without leading edge reinforcement. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 08, Is. 08, pp. 1474-1479. Available at <https://www.irjet.net/archives/V8/i8/IRJET-V8I8208.pdf> (accessed 06.12.2023).

11. Faiza K., Rabah M., Salah S., Ameddah H. A study of the thermo-mechanical behavior of a gas turbine blade in composite

materials reinforced with mast. *Revue des composites et des matériaux avancés*, Vol. 31, pp. 101-108. <https://doi.org/10.18280/rcma.310205>

12. Roeseler W.G., Sarh B., Kismarton M.U. Composite structures: the first 100 years. *16th International Conference on Composite Materials*, 2007, pp. 1-10. Available at https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/MonA/MoA_M1-01sp_roeselerw228184p.pdf (accessed 07.12.2023).

13. Rokvam S., Vedvik N., Mark L., Rømkje E., Ølnes J., Savio L., Echtermeyer A. A computational iterative design method for bend-twist deformation in composite ship propeller blades for thrusters. *Open Engineering*, 2023, Vol. 13, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0419>

14. Rokvam S., Vedvik N., Savio L., Echtermeyer A. Designing composite adaptive propeller blades with passive bend-twist deformation for periodic-load variations using multiple design concepts. *Polymers*, 2023, Vol. 15, No. 12 (2749), pp. 1-34. <https://doi.org/10.3390/polym15122749>

15. Li H., Zhou D., Martinez J., Deng Z., Johnson K.I., Westman M. Design and performance of composite runner blades for ultra low head turbines. *Renewable Energy*, 2019, Vol. 132, pp. 1280-1289. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.110>

16. Walker S.R.J., Thies P.R. A life cycle assessment comparison of materials for a tidal stream turbine blade. *Applied Energy*, 2022, Vol. 309, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118353>

17. Finnegan W., Allen R., Glennon C., Maguire J., Flanagan M., Flanagan T. Manufacture of high-performance tidal turbine blades using advanced composite manufacturing technologies. *Applied Composite Materials*, 2021, Vol. 28, pp. 2061-2086. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09967-y>

18. Appadurai M., Raj E.F.I. Finite element analysis of composite wind turbine blades. *7th International Conference on Electrical Energy Systems*, 2021, pp. 585-589. <https://doi.org/10.1109/ICEES51510.2021.9383769>

19. Teng H., Li S., Cao Z., Li S., Li C., Ko T.J. Carbon fiber composites for large-scale wind turbine blades: applicability study and comprehensive evaluation in China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, Vol. 11, No. 3 (624), pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/jmse11030624>

20. Hadār A., Voicu A.D., Baciu F., Vlăsceanu D., Tudose D.I., Pastrama S. A novel composite helicopter tail rotor blade with enhanced mechanical properties. *Aerospace*, 2023, Vol. 10, No. 7 (647), pp. 1-18. <https://doi.org/10.3390/aerospace10070647>

21. Sudhir Sastry Y.B., Bhargavi Rachana I., Durga Rao K. Stress analysis of helicopter composite blade using finite element analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, Vol.2, Is. 12, pp. 1291-1299. Available at <https://www.ijert.org/research/stress-analysis-of-helicopter-composite-blade-using-finite-element-analysis-IJERTV2IS120036.pdf> (accessed 07.12.2023).

22. Louis S., Louis P. Experimental study on strength comparison of light weight aluminium alloy propeller blade with metal propeller blade. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 955, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/955/1/012034>

Hadziivana (received) 12.12.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Мартиненко Володимир Геннадійович (Martynenko Volodymyr) – кандидат технічних наук, 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>.