

В.Г. МАРТИНЕНКО, М.І. ГРИЦЕНКО, С.В. МАВРОДІЙ

ПРОЕКТУВАННЯ, АНАЛІЗ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ МІЦНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОЇ БІМЕТАЛІЧНОЇ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ШАХТИ

В роботі розроблені конструкція та метод виготовлення лопатки вентилятора головного провітрювання шахт, яка поєднує у собі сталевий хвіст із остовом та алюмінієве перо, що дозволяє досягти високої міцності її кріплення в машині у поєднанні із відносно низькою вагою робочої частини. Метод полягає у нанесенні алюмінієвого пера лопатки за допомогою процесу лиття у кокиль на сталевий остов із хвостом. Детальний аналіз внутрішньої структури поєднання двох матеріалів продемонстрував суцільність їхнього з'єднання та повний контакт поверхонь. Створена за допомогою проведених скінченно-елементних розрахунків методика спрощеного експериментального дослідження статичної міцності лопатки дозволила підтвердити працездатність з'єднання між сталевим та алюмінієвим частинами та дослідити особливості деформування і руйнування такої комбінації різнорідних елементів, що, в свою чергу, відкриває шлях для випробувань та використання даного інженерного рішення в реальних роторних машинах.

Ключові слова: вентилятор, біметалічна лопатка, статична міцність, нелінійний контакт, експеримент, профілювання.

В. Г. МАРТЫНЕНКО, Н. И. ГРИЦЕНКО, С. В. МАВРОДИЙ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТЫ

В работе разработаны конструкция и метод изготовления лопатки вентилятора главного проветривания шахт, которая сочетает в себе стальной хвост с остовом и алюминиевое перо, позволяющее достичь высокой прочности ее крепления в машине в сочетании с относительно низким весом рабочей части. Метод заключается в нанесении алюминиевого пера лопатки с помощью процесса литья в кокиль на стальной остов с хвостом. Детальный анализ внутренней структуры сочетания двух материалов продемонстрировал целостность их соединения и полный контакт поверхностей. Созданная с помощью проведенных конечно-элементных расчетов методика упрощенного экспериментального исследования статической прочности лопатки позволила подтвердить работоспособность соединения между стальной и алюминиевой частями и исследовать особенности деформирования и разрушения такой комбинации разнородных элементов, что, в свою очередь, открывает путь для испытаний и использования данного инженерного решения в реальных роторных машинах.

Ключевые слова: вентилятор, биметаллическая лопатка, статическая прочность, нелинейный контакт, эксперимент, профилирование.

V. G. MARTYNENKO, M. I. HRYTSENKO, S. V. MAVRODY

DESIGN, ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY OF STATIC STRENGTH OF COMPOSITE BIMETAL BLADE OF MINE MAIN VENTILATION FAN

The paper presents the design and the method for manufacturing a blade of a mine main ventilation fan, which combines a steel root with a skeleton and an aluminum airfoil. This new type of blades was designed to replace a standard cast aluminum solution which did not meet the operational requirements of a moving media, that were not provided by the initial project options of the customer. Such the combination allows to achieve the high strength of its mounting in the machine together with a relatively low weight of the working part. In addition to that, the concept of bimetallic blades enables a replacement of worn out blade airfoils without producing new blade roots, which should make a repairment process simpler and cheaper. The method is to apply an aluminum airfoil to the steel skeleton with the root using a coil casting process. The skeleton was designed on a side face of a circle cylinder in order to provide its relatively low cost and manufacturability. A detailed analysis of the internal structure of the combination of the two materials demonstrated a solidity of their connection and a full physical contact of their surfaces. The technique of a simplified experimental study of the static strength of the blade performed using the finite-element calculations allowed to confirm an efficiency of a connection between the steel and aluminum parts and to study features of a deformation and a rupture of such the combination of heterogeneous elements, which in turn opens the way for testing and use of this engineering solution in real rotary machines. The technique for profiling new blade airfoils on a side face of a circle cylinder was proposed in order to provide the best alignment of both the side surfaces of the steel skeleton and the aluminium airfoil, which should increase the strength of the connection and simplify the production of skeletons for future solutions and projects.

Keywords: fan, bimetallic blade, static strength, nonlinear contact, experiment, profiling.

Вступ. Вентилятори головного провітрювання шахт – це роторні машини, які виконують функції обміну повітря між атмосферою і підземними спорудами

та виробками [1]. Такі типи машин є ключовими ланками систем життєзабезпечення в гірничодобувній промисловості, тому до них виставляються жорсткі

вимоги по аеродинамічним характеристикам та міцності. В переважній більшості випадків поряд з основним вентилятором на підприємствах встановлюється резервний, який працює поперемінно з основним.

За способами забору, транспортування і подачі повітря вентилятори поділяються на відцентрові і осьові. Відцентрові вентилятори в більшості випадків працюють при невисоких окружних швидкостях і створюють високий перепад тиску повітря, а осьові мають більш високі обороти і здатні переміщати великі маси повітря при невисокому перепаді тиску. Це

обумовлює підвищену завантаженість осьових вентиляторів та необхідність проведення детальних аналізів їхньої статичної та динамічної міцності [2-4].

Нереверсивний осьовий вентилятор головного провітрювання рудника ВО-32 [5] (рис. 1, а-б) був спроектований і виготовлений фахівцями науково-виробничого об'єднання «Донвентилятор» з метою заміни відцентрового вентилятора ВЦД-31,5, що працював встановлений термін експлуатації, на руднику з видобутку мідної руди.

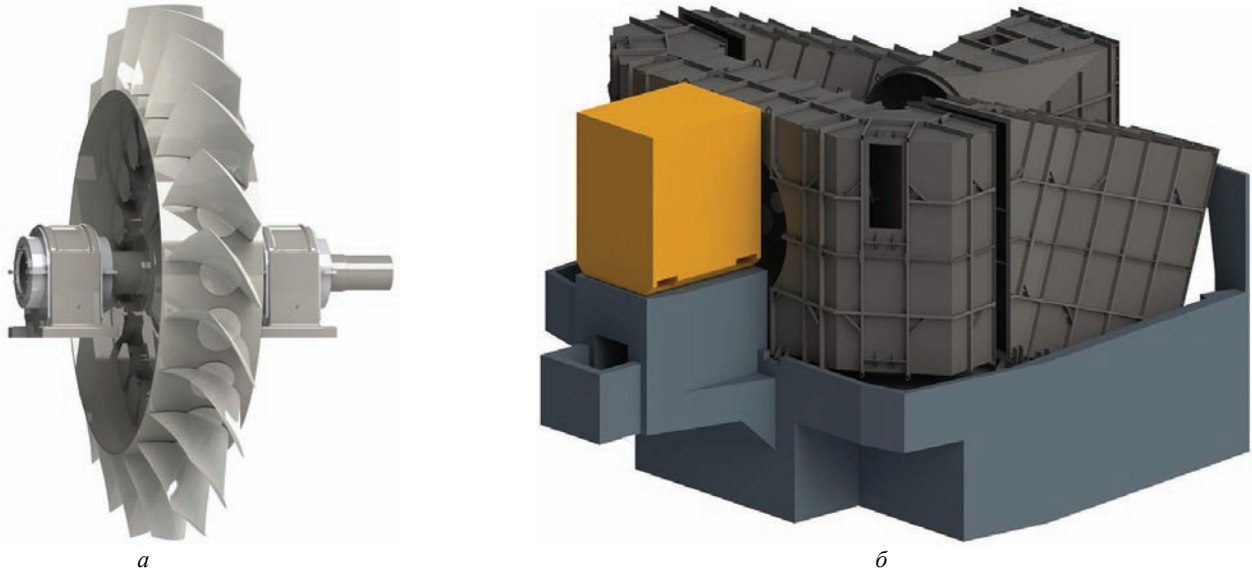


а

б

Рисунок 1 – Вентиляторна установка головного провітрювання шахти ВО-32:

а – робоче колесо без лопаток з частиною спрямляючого апарату; б – встановлена в робочому колесі лопатка



а

б

Рисунок 2 – Геометрична модель вентиляторної установки головного провітрювання шахти ВО-32:

а – модель ротора в підшипникових опорах; б – модель корпусу установки

Початково в конструкцію робочого колеса ротора вентилятора ВО-32 діаметром 3,2 м, представленого на рис. 2, а, були закладені тілесні алюмінієві лопатки, що виготовлялись за допомогою процесу лиття в кокіл із високоякісного алюмінієвого сплаву АК9М2. Таке конструкторське рішення дозволяло досягти, поперше, високої точності відтворення профілю пера лопатки і, по-друге, максимального балансу між цінними, ваговими та міцнісними характеристиками цих

лопаток. В роботі [2] було проведене комплексне дослідження статичної та динамічної міцності вентилятора, що розглядається, із врахуванням неоднорідних аеродинамічних та термічних навантажень, встановлені небезпечні зони у конструкції та зроблено висновок про відповідність його конструкції інженерним вимогам щодо безпечного функціонування машин.

Ротор вентилятора, що у номінальному режимі обертається із частотою 750 об/хв, разом із підшипни-

ковими опорами встановлювався в корпус із направляючим і спрямляючим апаратами та повітропроводами (рис. 2, б), що у сукупності представляє з себе повну конструкцію вентиляторної установки головного провітрювання шахти.

Проте в процесі експлуатації цієї роторної машини стикнулися із проблемою дуже високого абразивного зносу окремих частин пера лопаток, обумовленого високою швидкістю потоку повітря у сукупності із непередбаченою проектом наявністю в ньому абразивних частинок підвищеного розміру і навіть великих сторонніх предметів, що проходили через проточну частину ротору вентилятора, який обертася, та, безумовно, пошкоджували лопатки. Це значно знижувало їхній строк служби та викликало потребу у частій їхній заміні. Окрім того, постійні непередбачувані удари по лопаткам викликали підвищені динамічні напруження у місцях їхнього кріплення в робочому колесі, що також потребувало розробки альтернативного конструкторського рішення.

Таке рішення було знайдене у поєднанні конструкційних елементів, виготовлених з двох різних матеріалів – сталевих та алюмінієвих сплавів. Було запропоновано хвіст лопатки, тобто її частину, що кріпиться до робочого колеса та бере основну частину відцентрового навантаження на себе, виготовляти зі сталевих сплавів, а перо, яке повинно відповідати вимогами високої технологічності та аеродинамічності, як і раніше виплавляти із алюмінієвого сплаву. З'єднання двох різних матеріалів було запропоновано виконати із сталевим остовом, що був би приварений до сталевих хвоста та поверхнево контактував би із алюмінієвим пером.

Очікувані переваги такої конструкції над звичними рішеннями для ситуації, що розглядається, та взагалі полягали у наступному:

Використання сталевих сплавів для виготовлення хвоста лопатки забезпечує підвищену міцність місця кріплення, а алюмінієвих сплавів для виготовлення пера – його знижену вагу та легкість профілювання.

При абразивному зносі пера лопатки можливо не виготовляти нову лопатку, а замінити це перо, наплавивши його на сталеву частину, яка вже була попередньо використана, що значно здешевлює процес планової та непланової заміни лопаток.

Процес виготовлення лопаток стає дешевшим завдяки зниженому використанню литтєвого алюмінію в конструкції лопатки, який є більш дорогим у порівнянні зі сталевими елементами.

Таким чином, реалізація ідеї біметалічної сталевих-алюмінієвої лопатки вентилятора головного провітрювання шахти дозволила б зробити її міцнішою, дешевшою та більш технологічною у порівнянні зі стандартними рішеннями з алюмінієвих сплавів.

Треба зазначити, що ідея комбінування двох матеріалів в макрооб'ємах вже пропонувалася вченими та інженерами. Наприклад, в роботах [6-9] запропонована методика виготовлення та розрахунки міцності біметалічного замка для блісків газотурбінних двигунів. В такому з'єднанні фіксація відбувається за допомогою процесу блокування, тобто елементи поєдну-

ються тертям. В роботі [10] пропонується технологія виготовлення лопаток із захисним покриттям методом ізотермічного видавлювання біметалічної заготовки.

В [11] пропонується наносити термоміцний зовнішній шар сплаву на легке внутрішнє ядро лопатки турбіни за допомогою процесу пайки твердим припоєм.

В [12] розглядається процес формування біметалічних демпферів в лопатках турбін за допомогою впорскування у порожнину основного матеріалу розплавлених суперсплавів.

В [13] описується можливість створення біметалічного пера лопатки за допомогою видалення частини першого матеріалу на його периферії та подальшого нанесення в отриману порожнину другого матеріалу за допомогою наплавлення.

В [14] аналогічну із попередньою методикою пропонується реалізовувати при підвищених температурах 550-780°C.

Водночас, наведені роботи не розглядають можливості поєднання двох елементів, виконаних із різних матеріалів, за допомогою процесу лиття, тому запропонований нижче метод проектування, створення та аналізу міцності біметалічних лопаток можна вважати новим.

1. Розробка геометричної моделі остову біметалічної лопатки. При розробці геометричної моделі остову біметалічної лопатки розглядалися багато варіантів його форми. Основними обмеженнями виступало наступне:

Форма остову має бути технологічною, тому його еквідистанта повинна належати боковій поверхні кругового циліндру, що забезпечить можливість виготовлення остову за допомогою процесу вальцівки.

Товщина остову має бути достатньою, щоб забезпечити його міцність та зварюваність із хвостом.

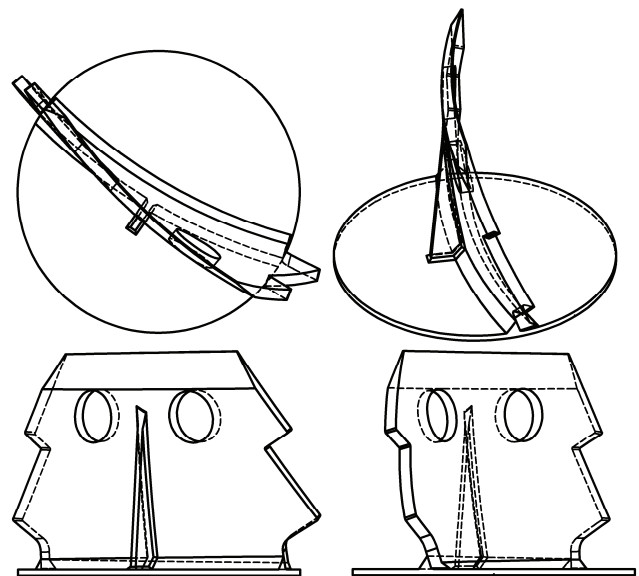


Рисунок 3 – Креслення остову біметалічної лопатки

Остов не повинен виходити за межі пера лопатки, а мінімальна товщина алюмінію між поверхнями

остову та пера має бути принаймні 2 мм, щоб забезпечити пролив алюмінію в таких місцях.

Остов повинен мати отвори та навісні об'єкти, які б виступали основними несучими елементами.

Остов повинен не знижувати статичну та динамічну міцності лопатки.

В результаті врахування таких обмежень була отримана форма остову, схематичне креслення якої в

проекціях показано на рис. 3. Його загальний вид разом із хвостом та пером лопатки представлений на рис. 4.

Як можна бачити з рисунків, остов має два отвори, по два навісних елементи з кожного боку та ортогональне ребро для підвищення згинної жорсткості та відбудови від відповідних власних частот.

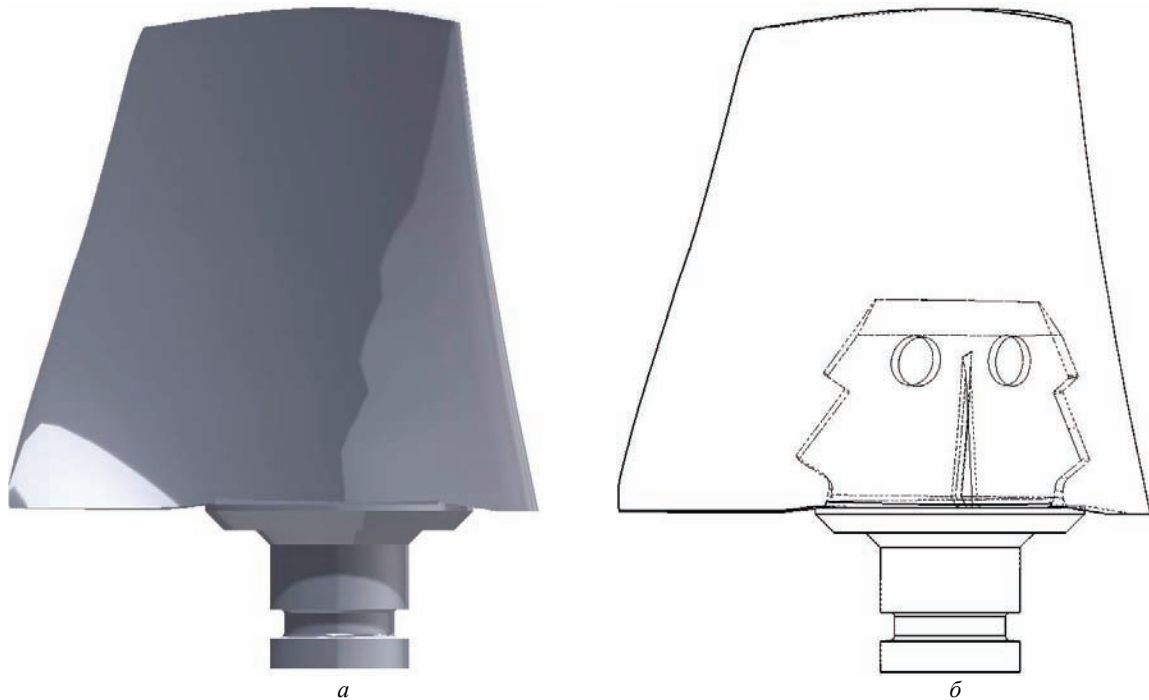


Рисунок 4 – Геометрична модель біметалічної лопатки: а – суцільний вид; б – вид у лініях

2. Розробка методів виготовлення та випробувань міцності біметалічної лопатки. Для виготовлення біметалічної лопатки використовувались конструкційні сплави, фізико-механічні характеристики яких у відповідності до діючих ГОСТів представлені в таблиці 1, а процес її створення продемонстрований на рис. 5.

Виготовлення біметалічної лопатки базується на застосуванні кокільної машини, яка попередньо використовувалась для виробництва цільних алюмінієвих лопаток. Процес створення біметалічних лопаток потребує точного розміщення хвоста у кокільній машині під правильним кутом до бічної поверхні пера таким чином, щоб уникнути можливих непроливів алюмінію.

У відповідності до цього сталевий хвіст разом із остовом (I) фіксується в кокіль (II). За допомогою спеціально розробленого процесу подачі із встановленими експериментально значеннями швидкості та напору алюмінієвий сплав (III) заливається в кокіль. Завдяки цьому забезпечується пролив матеріалу в отвори та труднодоступні місця, що призводить до суцільності та однорідності з'єднання між сталевими та алюмінієвими елементами, аналіз якого продемонстрований на рис. 6.

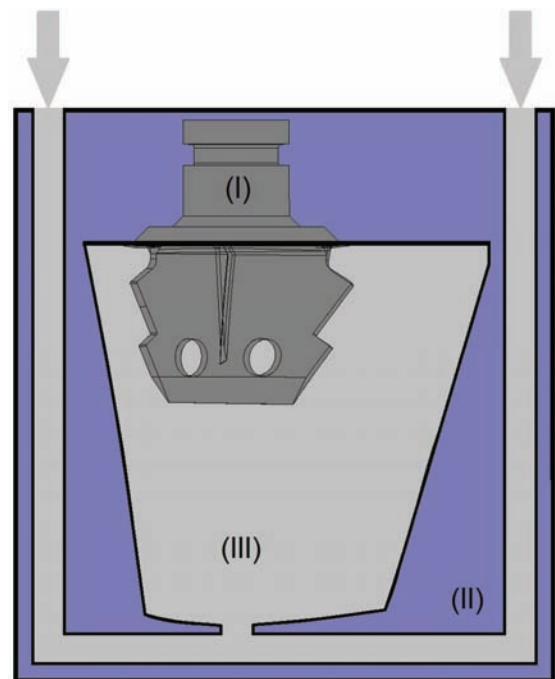


Рисунок 5 – Схема кокіль із встановленою в нього сталеву частину біметалічної лопатки

Таблиця 1 – Конструкційні матеріали для виготовлення біметалічної лопатки

Компонент	Матеріал	Границя текучості, [МПа]	Границя тимчасового опору, [МПа]	Коефіцієнт тертя, [-]
Хвіст	Сталь 20	ГОСТ 1050-88		0.15
		245	410	
Остов	Сталь 09Г2С	ГОСТ 5520-79		
		345	490	
Перо	Алюмінієвий сплав АК9М2	ГОСТ 1583-93		
		-	186	



а



б



в

Рисунок 6 – З'єднання елементів біметалічної лопатки: а – поперечний розріз біметалічної лопатки, вид зверху; б – поперечний розріз біметалічної лопатки, вид збоку; в – пролив у отворах біметалічної лопатки

Для реалізації експериментального дослідження статичної міцності з'єднання між сталевією та алюмінієвою частинами був розроблений та реалізований експериментальний стенд, що базується на використанні поршневої машини (рис. 7).

В цьому стенді поршень за допомогою двох сталевих стрижнів давить на основу хвоста біметалічної лопатки, тоді як лопатка фіксується шляхом обпирання сталевого штифта, що проходить через центр ваги алюмінієвого пера. Така схема навантаження моделює дію на з'єднання біметалічної лопатки відцентровієї сили, а рівень експериментального навантаження F визначається наступним чином:

$$F = \rho V \omega r^2, \quad (1)$$

де ρ – щільність алюмінію, кг/м³;
 V – об'єм алюмінієвого пера, м³;
 r – радіус центру ваги пера, м;
 ω – розрахункова кутова швидкість, рад/с, що визначається за формулою:

$$\omega = 2\pi n / 60, \quad (2)$$

де n – швидкість обертання, об/хв.

Для робочої швидкості обертання вентилятора, що дорівнює 750 об/хв, рівень еквівалентної відповідної відцентровієї сили експериментального навантаження становить 200 кН.

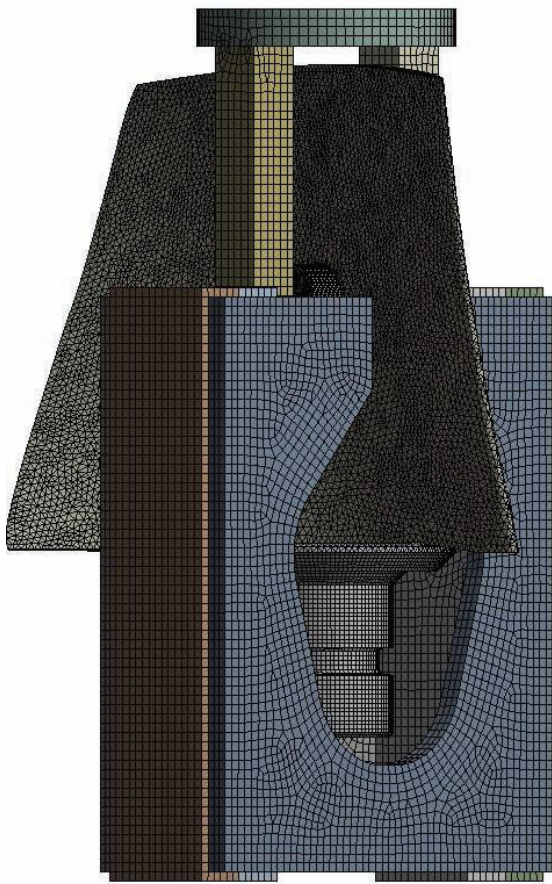


Рисунок 7 – Випробувальний стенд для біметалічної лопатки: *a* – скінченно-елементна модель; *б* – реальна конструкція



Рисунок 8 – Скінченно-елементна модель біметалічної лопатки:
a – для навантаження відцентровою силою; *б* – для навантаження зосередженою силою через штифт

3. Скінченно-елементний аналіз статичної міцності з'єднання елементів біметалічної лопатки. З метою аналізу статичної міцності біметалічної лопатки була створена її скінченно-елементна розрахункова модель, представлена на рис. 8, для випадку навантаження розподіленою відцентровою силою (рис. 8, *а*) та зосередженою силою через штифт (рис. 8, *б*). Тип контакту між сталевими та алюмінієвими елементами – нелінійний з тертям.

Закріплення в моделі із відцентровим навантаженням проводилось по нижній конічній поверхні канавки хвоста, а в моделі із навантаженням через штифт – у відповідності до її фіксації у експериментальному стенді (рис. 7).

Оцінка статичної міцності для сталевих та алюмінієвих елементів виконувалась за критерієм Мізеса [15]. У відповідності до нього еквівалентні напруження розраховуються наступним чином:

$$\sigma_{eqv} = \{0.5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]\}^{0.5}, \quad (3)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

При цьому сам критерій міцності полягає у неперевищенні максимальними еквівалентними напруженнями визначеної границі міцності $[\sigma]$:

$$\sigma_{eqv}^{max} \leq [\sigma], \quad (4)$$

а запасом міцності вважається відношення цих двох величин: $\eta = [\sigma] / \sigma_{eqv}^{max} \geq 1$.

На рис. 9 представлено еквівалентні за Мізесом напруження для обох розрахункових випадків. Картина розподілу напружень у корені пера лопатки для двох розрахункових схем є практично ідентичною, а для випадку навантаження її через штифт алюмінієве перо є більш навантаженим у деяких місцях. Це дозволяє зробити висновок про еквівалентність напружених станів в місцях з'єднання алюмінієвої та сталеві частин лопатки, а похибка в експерименті йде в запас міцності реальної конструкції.

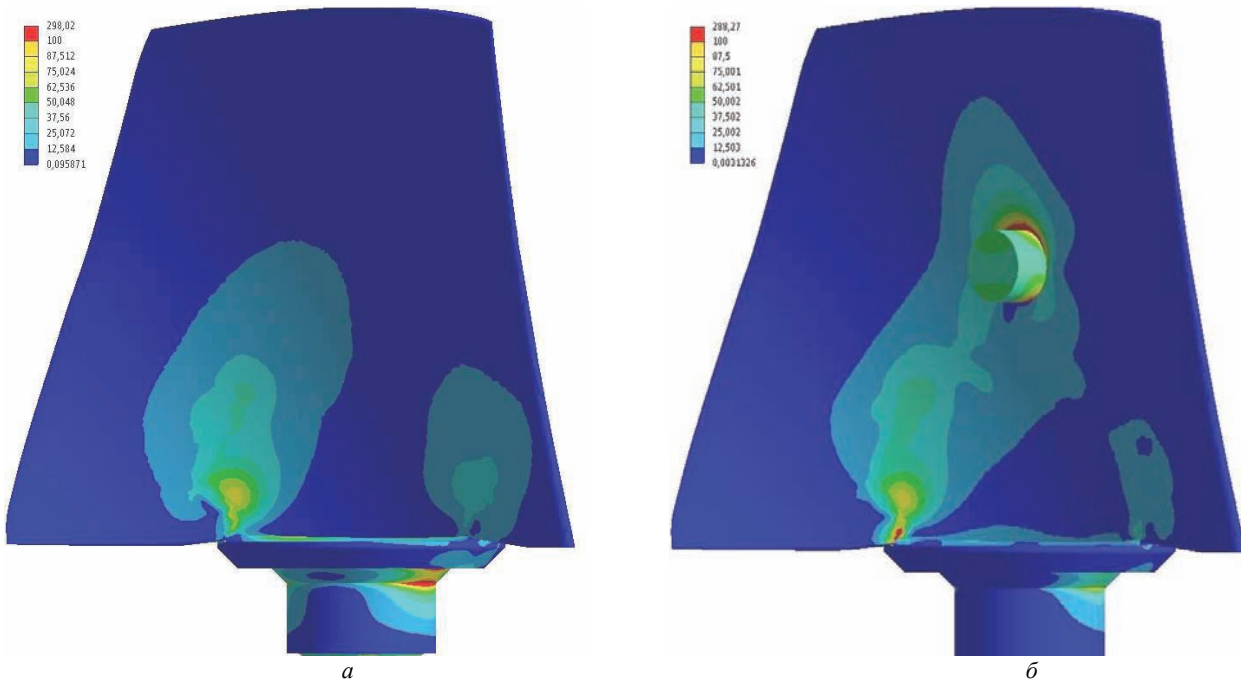


Рисунок 9 – Контурні графіки напружень, [МПа] в біметалічній лопатці:

а – навантаженої відцентровою силою; *б* – навантаженої зосередженою силою через штифт

На рис. 10 представлені еквівалентні за Мізесом напруження в остові біметалічної лопатки для двох випадків. Графіки свідчать про те, що загальна картина напруженого стану також повторюється. Разом із тим слід відзначити, що у випадку навантаження лопатки через штифт отвори остову є більш навантаженими. Окрім того, відносно великі напруження виникають в ортогональному до остова ребрі жорсткості. Таким чином, експериментальне дослідження й для остову погіршує напружений стан в конструкції, тобто реальна конструкція буде ще міцнішою для одного й того ж еквівалентного навантаження. Інформація про максимальні напруження в елементах лопатки для двох випадків представлена в табл. 2 та 3, де μ – це загальний запас міцності лопатки.

Таблиця 2 – Максимальні напруження в елементах біметалічної лопатки, навантаженої відцентровою силою

Компонент	σ_{eqv}^{max} , МПа	Локалізація	η , [-]	μ , [-]
Хвіст	193	Кріплення	1,27	1.27
Остов	236	Отвори	1,46	
Перо	131	Корінь	1,42	

Таблиця 3 – Максимальні напруження в елементах біметалічної лопатки, навантаженої зосередженою силою

Компонент	σ_{eqv}^{max} , МПа	Локалізація	η , [-]	μ , [-]
Хвіст	151	Основа	1.62	1.06
Остов	260	Отвір та ребро	1.33	
Перо	175	Отвір під штифт	1.06	

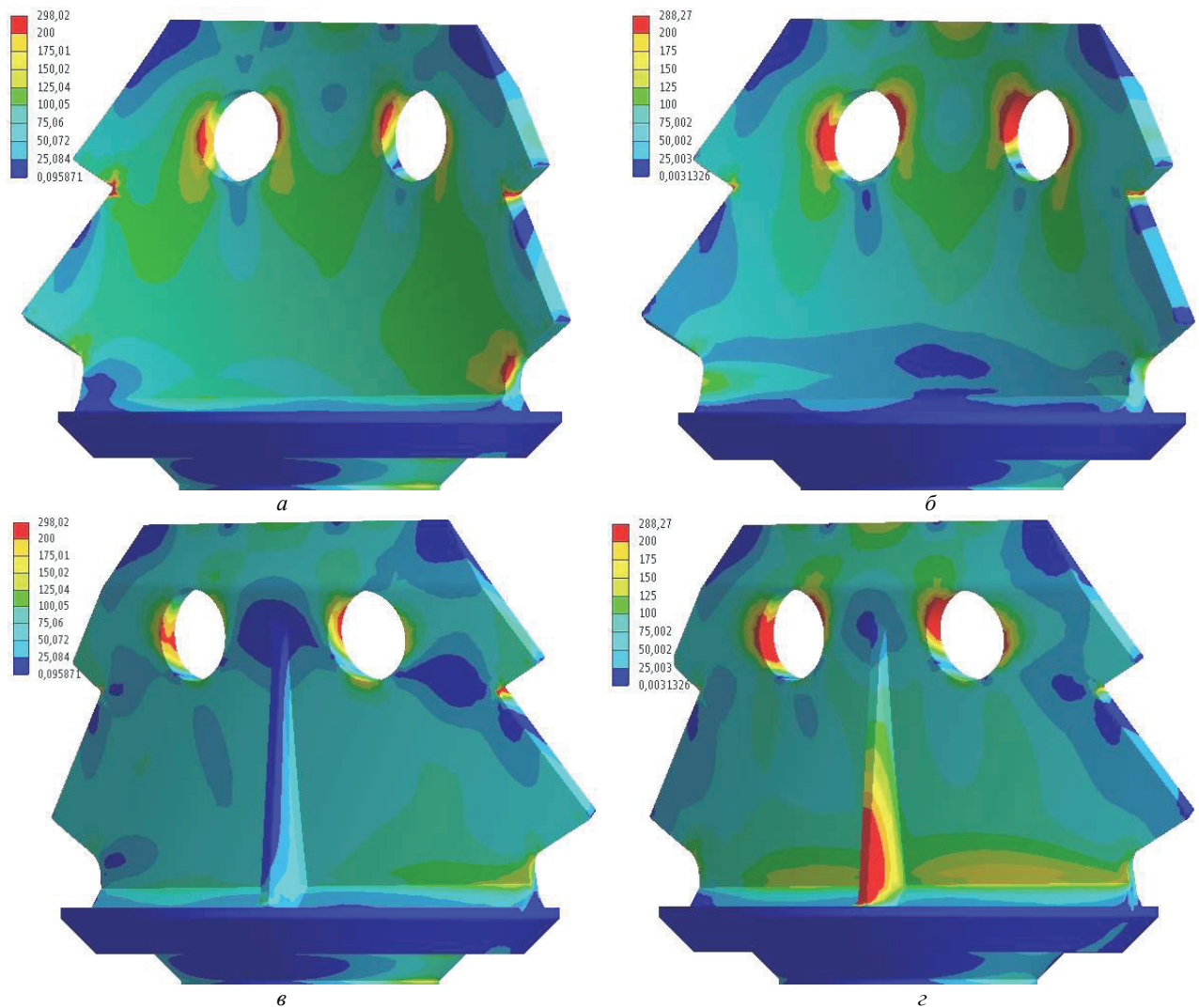


Рисунок 10 – Контурні графіки напружень, [МПа] в остові біметалічної лопатки:

a – навантаженої відцентровою силою, вид спереду; *б* – навантаженої зосередженою силою через штифт, вид спереду; *в* – навантаженої відцентровою силою, вид ззаду; *г* – навантаженої зосередженою силою через штифт, вид ззаду

Як можна визначити з таблиць, для експериментальної лопатки найбільш небезпечним місцем, що знижує її запас міцності, є отвір під штифт, оскільки він виступає концентратором напружень, до якого ще й прикладається навантаження. Це витікає з аналізу запасу міцності елементів конструкції, що визначається для сталевих елементів як відношення границі текучості відповідної сталі до максимальних напружень в елементі, а для алюмінієвих елементів як відношення напруження тимчасового опору до максимальних напружень в елементі.

Таким чином, розрахункове навантаження, за умови якого відбудеться руйнування в експерименті, становить 213 [кН].

4. Експериментальне дослідження міцності з'єднання елементів біметалічної лопатки. Була проведена серія трьох експериментів з розриву біметалічних лопаток, в кожному з яких розрив відбувався в місці отвору на алюмінієвому пері, як й очікувалось, виходячи з результатів чисельних розрахунків.

В табл. 4 наведена інформація про руйнування досліджуваних лопаток із перерахунком руйнуючого

навантаження F_r у відповідні значення частоти обертання вентилятора згідно з формулою (1).

Таблиця 4 – Експерименти з визначення статичної міцності біметалічної лопатки (HE – номер експерименту)

HE	F_r , [Н]	n , [об/хв]	η , [-]	μ , [-]
1	20206	754	1,01	1,15
2	23574	814	1,18	
3	25258	843	1,26	

Як витікає з таблиці, усереднене руйнуюче навантаження на 8% більше від очікуваного згідно з розрахунками значення, що, в свою чергу, може бути пов'язано із чисельною похибкою при визначенні максимальних еквівалентних за Мізесом напружень, яка може особливо посилюватись нелінійністю, пов'язаною із обраним типом контакту з тертям.

Водночас з цим, детальне візуальне дослідження місця поєднання сталеві та алюмінієвої частин біметалічної лопатки свідчить про відсутність пошкоджень в цих місцях та повній суцільності й однорідності з'єднання.

На рис. 11 можна бачити загальний вид зруйнованої біметалічної лопатки (рис. 11, а) та місце з'єднання двох частин (рис. 11, б). Як можна бачити з фотографій, поверхня пера лопатки не є пошкодженою та не містить тріщин. Згадуючи про те, що в попередньому розділі за допомогою чисельних розрахунків було встановлено, що напружений стан під час експерименту в місці з'єднання є більш небезпечним, ніж такий стан під час роботи вентилятора при швидкості обертання 750 об/хв, то можна зробити висновок про міцність даного з'єднання і лопатки в цілому при функціонуванні вентиляторної установки на максимальних оборотах.



а



б

Рисунок 11 – Зруйнована біметалічна лопатка: а – загальний вид у випробувальному стенді; б – нижня частина

5. Порівняльний модальний аналіз біметалічної лопатки. Для оцінки впливу застосування біметалічної конструкції на вібраційні властивості лопатки був виконаний порівняльний модальний аналіз суцільної алюмінієвої та сталєво-алюмінієвої лопаток та визначені їхні власні частоти, які представлені в табл. 5. Відбудова власних частот коливань лопаток

від кратностей збуджуючого навантаження оцінювалась за формулою [16]:

$$\Delta f_{ij} = [(f_i - j \cdot v) / v] \cdot 100\%, \quad (5)$$

де i – номер власної частоти;
 j – кратність збуджуючого навантаження;
 Δf_{ij} – запас відбудови;
 f_i – власна частота коливань лопатки;
 $v = \omega / 2\pi$ – частота збудження.

Рівень такої відбудови для суцільної та біметалічної конструкцій представлений в таблицях 6 та 7 відповідно.

Таблиця 5 – Власні частоти (ВЧ) суцільно алюмінієвої та біметалічної лопаток

№ ВЧ	Значення ВЧ, [Гц]		Характер відповідної власної форми коливань
	Для алюмінієвої лопатки	Для біметалічної лопатки	
1	142,80	95,12	Згин у напрямі меншої жорсткості
2	195,85	213,55	Згин у напрямі більшої жорсткості
3	300,23	283,25	Кручення навколо вісі
4	529,92	512,44	Кручення за чотирма границями пера
5	607,56	554,91	Кручення за двома границями пера
6	724,89	787,72	Згин верхньої границі пера

Таблиця 6 – Аналіз резонансів у алюмінієвій лопатці

№ ВЧ	Відносна відбудова ВЧ від кратностей збуджуючого навантаження (КЗН), %					
	1 КЗН	2 КЗН	3 КЗН	4 КЗН	5 КЗН	6 КЗН
1	1042,4	942,4	842,4	742,4	642,4	542,4
2	1466,8	1366,8	1266,8	1166,8	1066,8	966,8
3	2301,8	2201,8	2101,8	2001,8	1901,8	1801,8
4	4139,4	4039,4	3939,4	3839,4	3739,4	3639,4
5	4760,5	4660,5	4560,5	4460,5	4360,5	4260,5
6	5699,1	5599,1	5499,1	5399,1	5299,1	5199,1

Таблиця 7 – Аналіз резонансів у біметалічній лопатці

№ ВЧ	Відносна відбудова ВЧ від кратностей збуджуючого навантаження (КЗН), %					
	1 КЗН	2 КЗН	3 КЗН	4 КЗН	5 КЗН	6 КЗН
1	661,0	561,0	461,0	361,0	261,0	161,0
2	1608,4	1508,4	1408,4	1308,4	1208,4	1108,4
3	2166,0	2066,0	1966,0	1866,0	1766,0	1666,0
4	3999,5	3899,5	3799,5	3699,5	3599,5	3499,5
5	4339,3	4239,3	4139,3	4039,3	3939,3	3839,3
6	6201,8	6101,8	6001,8	5901,8	5801,8	5701,8

Відповідні власні форми коливань біметалічної лопатки представлені на рис. 12. Як видно з графіків та таблиць, перша власна частота біметалічної лопатки у півтора рази менша за аналогічне значення для суцільної лопатки, але це не впливає на відбудову біметалічної конструкції від резонансних режимів. Навіть для першої власної частоти біметалічної лопатки відбудова є більшою за 150 %, що дає можливість вважати розроблену конструкцію біметалічної лопатки задовільною з точки зору її вібраційних властивостей.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. № 38 (1314). 2018

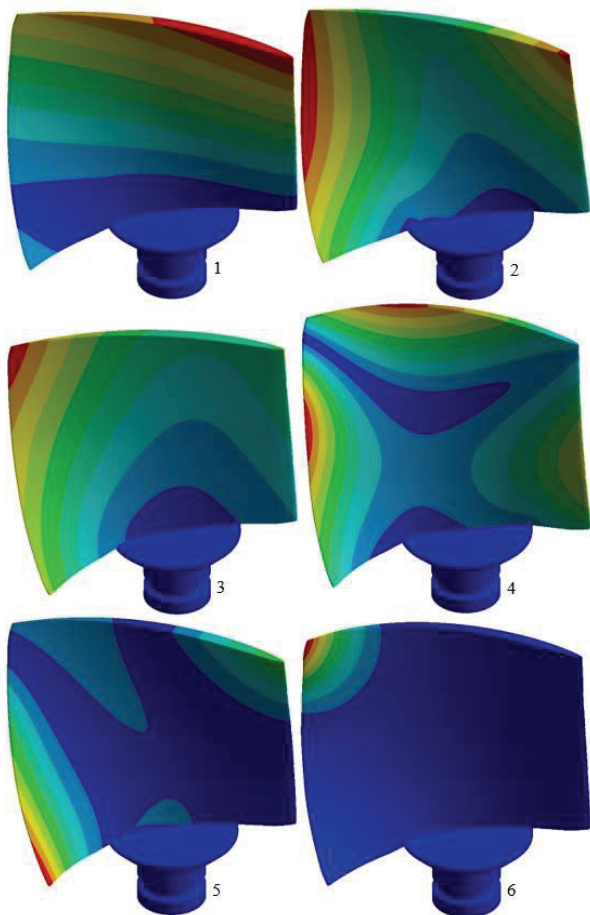


Рисунок 12 – Власні форми коливань біметалічної лопатки

6. Особливості профілювання біметалічних лопаток. В даній роботі розглядався випадок, в якому проектування сталевго остову, що з точки зору технологічності формується на бічній поверхні кругового циліндру, обмежувалось просторовою формою бічної поверхні пера лопатки, яка початково була спроектована для виготовлення цільноалюмінієвої литтєвої деталі. З метою уникнення таких обмежень для нових машин доцільно виконувати профілювання пера із еквідистантою, що також буде належати бічній поверхні того ж циліндру, що й остов, як це продемонстровано на рис. 13.

За допомогою розробленої методики виконується створення аеродинамічно ефективної середньої поверхні лопатки, що потім перетворюється у рівнотовщинний профіль її пера. Таким чином можна досягти рівності відстані між бічними поверхнями остову і пера лопатки та, як результат, відсутності місць із підвищеним ризиком непроливу алюмінію або його дуже малої товщини.

В такому випадку форма остова може бути змінена, а напруження, що виникають в конструкції, знижені за рахунок наближення центру ваги пера до вісі лопатки.

Окрім того, це дозволить при збереженні статичної та динамічної міцності біметалічної лопатки знизити товщину її остова та кількість і вираженість навісних елементів і отворів. Таким чином, процеси виготовлення біметалічних лопаток, а також їхнього ремонту стануть ще простішими, а значить, й більш технологічними.

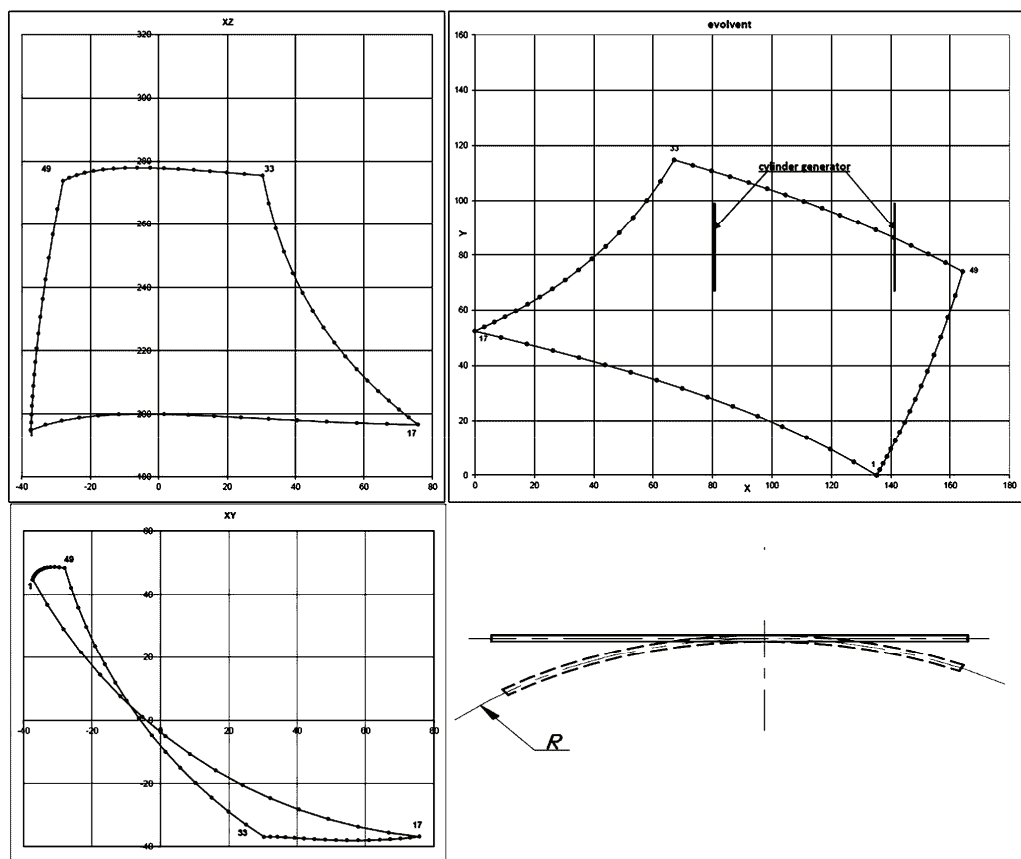


Рисунок 13 – Процес профілювання біметалічної лопатки

Висновки. В роботі була запропонована конструкція, що поєднує у собі корисні властивості сталевих та алюмінієвих сплавів для виготовлення біметалічної лопатки вентилятора головного провітрювання шахти.

Чисельна та експериментальна перевірки статичної міцності з'єднання сталевих та алюмінієвих елементів продемонстрували здатність конструкції витримувати робочі навантаження із достатнім запасом міцності.

Скінченно-елементний модальний аналіз біметалічної лопатки дозволив визначити відбудову її від резонансних режимів у порівнянні зі стандартними конструкторськими рішеннями з алюмінію, що продемонструвало відсутність резонансів власних частот біметалічної лопатки із кратностями збуджуючого навантаження.

Успіх такого комплексного дослідження дозволяє переходити до випробувань міцності біметалічної лопатки на реальних роторних машинах.

Профілювання пера біметалічної лопатки для нових машин доцільно виконувати методикою проектування середньої поверхні «на циліндрі».

Не викликає сумніву той факт, що особливості хімічних та фізико-механічних властивостей граничного шару між сталевим та алюмінієвим сплавами в біметалічній лопатці потребують окремого розгляду, але й на даному етапі можна зробити висновок, що запропонована концепція сталєво-алюмінієвої лопатки може бути реалізована та є застосовною до використання у вітчизняному та світовому машинобудуванні не тільки для вентиляторів головного провітрювання шахт, але для осевих роторних машин у цілому.

Список літератури

1. *Брусиловский И.В.* Аэродинамика осевых вентиляторов / *И.В. Брусиловский.* – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
2. *Мартыненко В.Г.* Анализ статической и динамической прочности осевого вентилятора с учетом аэродинамических свойств потока и неоднородности температурного поля / *В.Г. Мартыненко, Н.И. Гриценко* // Проблемы машиностроения. 2015. Т. 18, № 4/1. С. 44-52. URL: <http://journals.uran.ua/jme/article/view/57509> (дата звернення: 13.11.2018).
3. *Мартыненко В.Г.* Анализ статической и динамической прочности осевого вентилятора с учетом аэродинамических свойств потока и неоднородности температурного поля / *В.Г. Мартыненко, Н.И. Гриценко* // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : материалы XV междунар. науч.-техн. конф. Харьков, 14-17 сентября 2015 года. – Х.: ИПМаш им. А.Н. Подгорного, 2015.
4. *Мартыненко В.Г.* Комплексный подход к анализу статической и динамической прочности дымососа ДО-14 / *В.Г. Мартыненко, Н.И. Гриценко* // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды: материалы VI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды, Харьков, 22-23 марта 2017 года. – Х.: ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2017. С. 131-138. URL: <http://energostal.kharkov.ua/content/>

documents/19/1896/Attaches/sbornik_molodezhnoy_konferentsii_2017.compressed.pdf (дата звернення: 13.11.2018).

5. Донвентилятор. Вентиляторы главного проветривания серии ВО-Д. URL: <https://donvent.com/ru/node/34> (дата звернення: 13.11.2018).

6. *Маггеррамова Л.А.* Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин / *Л.А. Маггеррамова* // Вестник УГАТУ. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки ЛА. – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 33-38.

7. *Маггеррамова Л.А.* Биметаллические блиски турбин с бандажированными лопатками для газотурбинных двигателей / *Л.А. Маггеррамова, Б.Е. Васильев* // Наука и Образование. 2015. № 06. С. 143-156. URL: https://www.researchgate.net/publication/282061783_Bimetallic_Blisks_with_Shrouded_Turbine_Blades_for_Gas_Turbine_Engines (дата звернення: 15.11.2018). DOI: 10.7463/0615.0771150.

8. *Маггеррамова Л.А.* Экспериментальное исследование образцов-имитаторов биметаллического моноколеса высокотемпературной турбины с охлаждаемыми лопатками для перспективных газотурбинных двигателей / *Л.А. Маггеррамова, А.Н. Стадников* // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Т. 14, № 3, Ч. 1. – С. 114-121.

9. *Magerramova L.* Design of a Bimetallic Blisk Turbine for a Gas Turbine Engine and its Production Using Powder Metallurgy Methods / *L. Magerramova, B. Vasilyev, R. Nigmatullin, V. Kinzburskiy* // ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2650308> (дата звернення: 15.11.2018). DOI:10.1115/GT2017-63560.

10. *Кутыкова А.С.* Технология изготовления лопаток с защитным покрытием методом изотермического выдавливания биметаллической заготовки под изотермическую штамповку / *А.С. Кутыкова* // Наука и Образование. – 2009. – № 07. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12865433> (дата звернення: 15.11.2018).

11. *Lee Ch.P., Isburgh A.M., Wilson P.S.* Bimetallic Turbine Airfoil: Pat. US 005348446A, the USA, Publ. 20.09.1994.

12. *Patrick D.K., Bauer R.Ch., Kelly T.J.* Monolithic and Bi-Metallic Turbine Blade Dampers and Method of Manufacture: Pat. US 2010/0008778A1, the USA, Publ. 14.01.2010.

13. *Millet F., LeRoy D.* Method of Manufacturing a Bimetallic Turbine Blade and Use Thereof: Pat. US 006047474A, the USA, Publ. 11.04.2000.

14. *Millet F., LeRoy D.* Manufacturing Method for Bimetallic Turbine Blade and Use: Pat. EP 0919322 A1 19990602, France, Publ. 02.06.1999.

15. *Тимошенко С.П.* Сопротивление материалов. Том 1. Элементарная теория и задачи / *С.П. Тимошенко.* – М.: Наука, 1965. – 364 с.

16. Вибрации в технике. Справочник в 6-ти томах. Том 6. Защита от вибрации и ударов / *К.В. Фролова* (ред.). – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

References (transliterated)

1. Brusilovsky I.V. Aerodinamika osevykh ventilyatorov [Aerodynamics of axial fans]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 240 p.
2. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Analiz staticheskoy i dinamicheskoy prochnosti oseвого ventilyatora s uchotom aerodinamicheskikh svoystv potoka i neodnorodnosti temperaturnogo polya [Analysis of the static and dynamic strength of an axial fan, taking into account the aerodynamic properties of the flow and the heterogeneity of the temperature field]. Prob-

lemy mashinostroyeniya [Problems of machine building]. 2015, vol. 18, no. 4/1, pp. 44-52. Available at <http://journals.uran.ua/jme/article/view/57509> (accessed 13.11.2018).

3. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Analiz staticheskoy i dinamicheskoy prochnosti oseвого ventilyatora s uchotom aerodinamicheskikh svoystv potoka i neodnorodnosti temperaturnogo polya [Analysis of the static and dynamic strength of an axial fan, taking into account the aerodynamic properties of the flow and the heterogeneity of the temperature field]. Sovershenstvovaniye turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya [Improvement of turbine setups using mathematical and physical modeling]. Kharkov, IPMach im. A.N. Podgorny Publ., 2015.

4. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Kompleksnyy podkhod k analizu staticheskoy i dinamicheskoy prochnosti dymososa DO-14 [An integrated approach to the analysis of static and dynamic strength of the DO-14 smoke exhauster]. Innovatsionnyye puti modernizatsii bazovykh otrasley promyshlennosti, energo- i resursoberezheniye, okhrana okruzhayushchey prirodnoy sredy [Innovative ways of modernization of basic industries, energy and resource conservation, environmental protection]. Kharkov, SE "UkrNTTs "Energostal" Publ., 2017, pp. 131-138. Available at http://energostal.kharkov.ua/content/documents/19/1896/Attaches/sbornik_molodezhnoy_konferentsii_2017.compressed.pdf (accessed 13.11.2018).

5. Donvent. Main ventilation fans of the VO-D series. Available at <https://donvent.com/ru/node/34> (accessed 13.11.2018).

6. Magerramova L.A. Primeneniye bimetallicheskih bliskov, izgotavlivayemykh metodom GIP iz granuliruyemykh i liteynykh nikelevykh supersplavov, dlya uvelicheniya nadezhnosti i resursa gazovykh turbin [The use of bimetallic blisks, manufactured by the HIP method from granulated and cast nickel superalloys, to increase the reliability and service life of gas turbines]. Vestnik UGATU. Teplovyye, elektroraketnyye dvigateli i energoustanovki LA [Bulletin of UGATU. Thermal, electric propulsion engines and aircraft power installations]. 2011, vol. 15, no 4 (44), pp. 33-38.

7. Magerramova L.A., Vasilyev B.E. Bimetallicheskiye bliski turbin s bandazhirovanymi lopatkami dlya gazoturbinykh dvigateley [Bimetallic blisks of turbines with shrouded blades for gas turbine engines]. Nauka i Obrazovaniye [Science and Education]. 2015, no. 06, pp. 143-156. Available at https://www.researchgate.net/publication/282061783_Bimetallic_Blisks_with_Shrouded_Turbine_Blades_for_Gas_Turbine_Eng

ines (accessed 15.11.2018).

8. Magerramova L.A., Stadnikov A.N. Eksperimental'noye issledovaniye obraztsov-imitatorov bimetallicheskogo monokolesa vysokotemperaturnoy turbiny s okhlazhdayemyimi lopatkami dlya perspektivnykh gazoturbinykh dvigateley [Experimental study of bimetal monoepeller of a high-temperature turbine with cooled blades for promising gas turbine engines]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University]. 2015, vol. 14, no. 3, part 1. pp. 114-121.

9. Magerramova L., Vasilyev B., Nigmatullin R. Kinzburskiy V. Design of a Bimetallic Blisk Turbine for a Gas Turbine Engine and its Production Using Powder Metallurgy Methods. ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Available at <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2650308> (accessed 15.11.2018). DOI:10.1115/GT2017-63560.

10. Kutykova A.S. Tekhnologiya izgotovleniya lopatok s zashchitnym pokrytiyem metodom izotermicheskogo vydavlianiya bimetallicheskoy zagotovki pod izotermicheskuyu shtampovku [Manufacturing technology of blades with a protective coating by the method of isothermal extrusion of a bimetallic billet under isothermal stamping]. Nauka i Obrazovaniye [Science and Education]. 2009, no. 07. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12865433>. (accessed 15.11.2018)

11. Lee Ch.P., Isburgh A.M., Wilson P.S. Bimetallic Turbine Airfoil. The USA. Pat. US 005348446A.

12. Patrick D.K., Bauer R.Ch., Kelly T.J. Monolithic and Bi-Metallic Turbine Blade Dampers and Method of Manufacture. The USA. Pat. US 2010/0008778A1.

13. Millet F., LeRoy D. Method of Manufacturing a Bimetallic Turbine Blade and Use Thereof. The USA. Pat. US 006047474A.

14. Millet F., LeRoy D. Manufacturing Method for Bimetallic Turbine Blade and Use. France. Pat. EP 0919322 A1 19990602, France, Publ. 02.06.1999.

15. Tymoshenko S.P. Soprotivleniye materialov. Tom 1. Elementarnaya teoriya i zadachi. [Strength of materials. Volume 1. Elementary theory and problems]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 364 p.

16. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik v 6-ti tomakh. Tom 6. Zashchita ot vibratsii i udarov [Vibrations in the technique. Handbook in 6 volumes. Volume 6. Protection from vibration and shock]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 456 p.

Надійшла (received) 29.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мартиненко Володимир Геннадійович (Мартыненко Владимир Геннадьевич, Martynenko Volodymyr Gennadiyovych) – кандидат технічних наук, асистент кафедри Динаміки та міцності машин, НТУ «ХПІ», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-0905>; e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com.

Гриценко Микита Ігорович (Гриценко Никита Игоревич, Hrytsenko Mykyta Ihorovych) – ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор», директор; Харків, Україна; e-mail: nikitahrytsenko@gmail.com.

Мавродій Сергій Вячеславович (Мавродий Сергей Вячеславович, Mavrody Sergiy Vyacheslavovych) – ТОВ «НВО «Донвентилятор», генеральний директор; Харків, Україна; e-mail: donvent@gmail.com.