

УДК 621.452.3.03-226:669.295.018:539.3

doi: 10.32620/aktt.2024.2.05

О. Б. ГАЛЕНКОВА<sup>1</sup>, О. В. ОВЧИННИКОВ<sup>2</sup>, Р. Ю. ШАКАЛО<sup>1</sup>,  
Р. П. ПРИДОРЖНИЙ<sup>1</sup>, Д. О. КУЦ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ДП "Івченко-Прогрес", Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup> АТ «Інститут титану», Запоріжжя, Україна

<sup>3</sup> АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ ТА ФОРМ КОЛИВАНЬ ЛОПАТКИ ТУРБІНИ, ВИГОТОВЛЕНОЇ ЗІ СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ

Предметом вивчення статті є дослідження особливостей напружено-деформованого стану робочої лопатки 2 ступеня вільної турбіни з експериментального сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B). Сплави цього класу є важливими конструкційними матеріалами з унікальним набором фізико-механічних характеристик, таких як низька щільність, висока жароміцність та жаростійкість, та мають високий потенціал для заміни сплавів на основі нікелю, що призначені для експлуатації при температурах не більше 850°C. Однак використання нового сплаву у якості матеріалу для виготовлення лопатки турбіни передбачає проведення розрахунків міцності та коливань лопаток. Метою розрахунків є визначення можливості застосування сплаву на основі алюмініду системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B) замість сплаву ВЖЛІ2Э-ВІІ для обраної робочої лопатки. Завданням дослідження є проведення модального аналізу, визначення напружено-деформованого стану, перевірка умов міцності та масових характеристик лопатки, виготовленої з вихідного та запропонованого варіантів сплавів. В якості вихідних даних для розрахунку прийняті фізичні властивості матеріалів. Геометрія, розподіл температур лопатки та її закріплення залишалися сталими для двох варіантів. Побудована тривимірна модель дослідної лопатки з використанням системи Unigraphics NX та розроблена скінченноелементна модель за допомогою програмного комплексу Ansys. В ході проведених досліджень отримані наступні результати. Встановлено, що при використанні експериментального сплаву маса однієї лопатки зменшується майже на 40%. Методом скінченних елементів розраховано власні частоти та форми коливань лопатки, побудовані діаграми Кемпбела для вихідної та експериментальної лопатки для номінальної роботи двигуна. При використанні експериментального сплаву частоти власних коливань лопатки знаходяться далі від резонансної частоти. Визначено розподіл еквівалентних напружень та показано, що максимальні напруження діють у кореневому перетині пера лопатки. При використанні дослідного сплаву на основі алюмініду титану еквівалентні напруження зменшуються на 35% порівняно із вихідними значеннями. Показано, що коефіцієнт запасу міцності запропонованого матеріалу не менше запасу міцності сплаву ВЖЛІ2Э-ВІІ. Висновки. Використання лопаток зі сплаву на основі алюмініду системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B) дасть зниження маси лопатки на 40%, а колеса 2 ступеня вільної турбіни на 17% без зниження міцності та ресурсу лопатки. На підставі аналізу результатів дослідження, наведених в статті, встановлено, що сплав на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B) може бути використаний у якості матеріалу для виготовлення лопаток 2 ступеня вільної турбіни.

**Ключові слова:** алюмінід титану; лопатка турбіни; тривимірна модель; скінченноелементна модель; власні частоти коливань; діаграма Кемпбела.

### Вступ

Сучасні авіаційні газотурбінні двигуни (АГТД) працюють в жорстких умовах температури та навантажень при експлуатації. Постійне прагнення розробників до зменшення питомих витрат та до підвищення ефективності АГТД призводить до росту температурних і механічних навантажень. Одними з найбільш навантаженими елементами АГТД є робочі лопатки. Для забезпечення надійної роботи лопаток при

збільшених навантаженнях у сучасних АГТД все ширше використовуються новітні матеріали, що розширюють можливості лопаткового апарату [1, 2]. Але використання нового матеріалу вимагає проведення додаткових досліджень як самого матеріалу так і розрахунків міцності та коливань лопаток [3, 4].

В роботі у якості перспективного матеріалу для робочої лопатки обрано сплав на основі алюмініду титану експериментального складу системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B).

Порівняно з традиційними матеріалами, сплави на основі інтерметалідів титану володіють багатьма перевагами, такими як низька щільність [5, 6], висока міцність та краща стійкість до окислення [7].

Використання ливарних сплавів на основі  $\gamma$ -алюмініду титану є найбільш перспективними матеріалами для отримання лопаток турбіни АГТД нового покоління. Заміна нікелевих та залізонікелевих сплавів  $\gamma$ -сплавами дасть можливість зниження маси лопаток, що забезпечить зниження відцентрових напружень, що діють в турбіні та збільшить питому вагову тягу двигуна.

Метою роботи є визначення можливості застосування сплаву на основі алюмініду системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B) замість сплаву ВЖЛ12Э-ВИ для робочої лопатки. При цьому необхідно провести такі чисельні дослідження, як модальний аналіз, визначення напружено-деформованого стану, перевірку умов міцності та масових характеристик.

### Хід виконання роботи

В якості дослідного сплаву обрано експериментальний сплав на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B), розроблений авторами [8] для використання у гарячій частині турбіни. Об'єктом досліджень є лопатка 2 ступеня вільної турбіни (рис. 1), що виготовляється зі сплаву на нікелевій основі ВЖЛ12Э-ВИ.



Рис. 1. Лопатка 2 ступеню вільної турбіни

Сплав ВЖЛ12Э-ВИ – жароміцний та корозійно-стійкий сплав на нікелевій основі, використовується в литому стані. Робоча температура сплаву 800-1000 °С, густина – 7,93 г/см<sup>3</sup>.

В якості вихідних даних для розрахунку прийняті фізичні властивості матеріалів – густина дослідного сплаву  $\rho$ , модуль пружності матеріалу  $E$ , коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha$  (таблиця 1).

При розрахунках використані значення довготривалої міцності (за 100 год.) сплавів на основі алюмініду титану [9] та ВЖЛ12Э-ВИ [10], значення яких приведені на графіках рис. 2.

Таблиця 1  
Фізичні характеристики сплаву на основі алюмініду титану, використані при розрахунках

Властивості	ВЖЛ12Э-ВИ	Сплав на основі алюмініду титану
Густина, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	7,93	4,75
Модуль пружності $E$ , ГПа		
20 °С	197	170
700 °С	159	122
800 °С	153	115
Коефіцієнт лінійного термічного розширення $\alpha$ , $10^{-6} \text{ K}^{-1}$		
20...800 °С	11,8...13,8	12,6...13,8

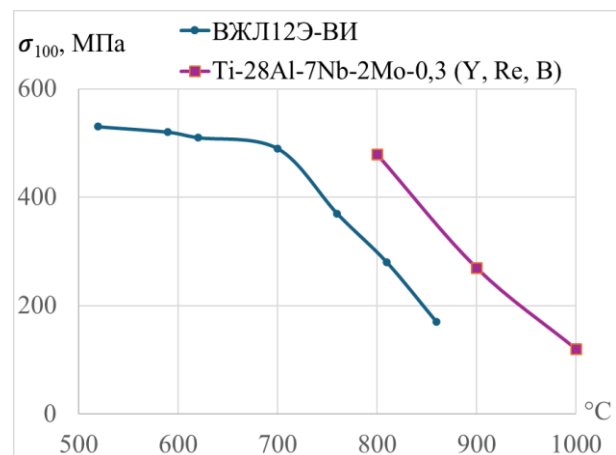


Рис. 2. Криві довготривалої міцності сплавів

Для визначення власних частот і форми коливань лопатки 2 ступеню ВТ проведено модальний аналіз для двох варіантів сплавів: вихідного та запропонованого. Для цього виконана побудова тривимірної моделі дослідної лопатки з використанням системи Unigraphics NX та розроблена скінченноелементна модель за допомогою програмного комплексу Ansys (рис. 3). Складність геометричної форми лопатки, наявність областей з кутами та виступами і необхідність найбільш повно виявити особливості на-

пружено-деформованого стану лопатки потребує використання її тривимірної моделі. При побудові скінченноелементної моделі використані тетрадральні елементи з квадратичними функціями форми, що забезпечують плавну зміну напружень за об'ємом лопатки і вплив локалізації напружень.

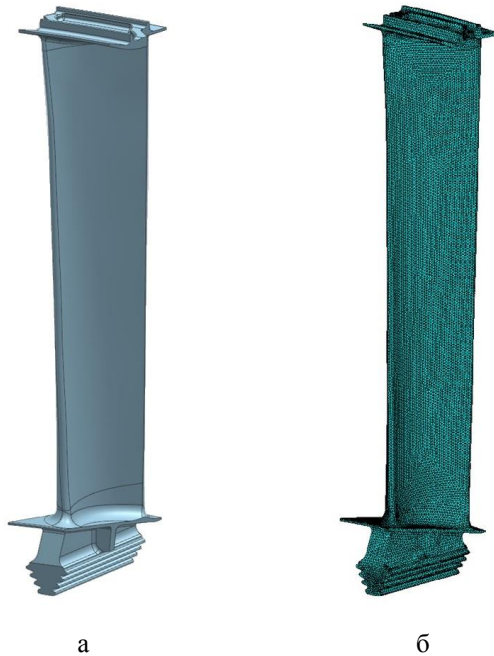


Рис. 3. Модель лопатки: а – тривимірна;  
б – скінченноелементна

Граничні умови такі як: частота обертання 8650 об/хв., що відповідає номінальному режиму роботи двигуна; геометрія, розподіл температур лопатки (рис. 4) та закріплення лопатки залишалися сталими для двох варіантів.

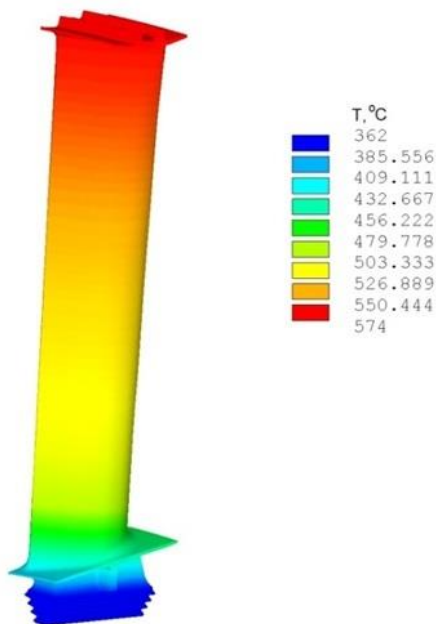


Рис. 4. Температурний стан лопатки  
2 ступеню ВТ

Побудовані діаграми Кемпбела [11, 12] для опису залежності власних частот коливань лопатки від частоти обертів та можливості визначення режимів роботи, при якому відбуваються резонансні коливання.

### Результати досліджень

З метою аналізу масових характеристик виконані розрахунки маси дослідної лопатки при заміні сплаву ВЖЛ12Э-ВИ на розроблений сплав на основі алюмінію експериментального складу (таблиця 2).

Таблиця 2  
Розрахунки маси лопатки 2 ступеню вільної турбіни

Показник	Сплав ВЖЛ12Э-ВИ	Експериментальний сплав
Щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	7,93	4,75
Об'єм, мм <sup>3</sup>	34345	
Маса однієї лопатки, гр	272	163
Кількість лопаток в колесі турбіни, шт	83	
Маса лопаток в колесі, гр (кг)	22576 (22,58)	13529 (13,53)

Встановлено, що маса лопатки зі сплаву ВЖЛ12Э-ВИ становить 272 гр, маса лопатки зі сплаву на основі алюмінію титану становить 163 гр. Зменшення маси однієї лопатки складає майже 40%. Відповідно і маса колеса турбіни з лопатками зменшується на 40 % з 22,58 кг до 13,53 кг.

В ході проведеного модального аналізу визначені власні частоти коливань лопатки найбільш наближені до резонансної частоти при роботі двигуна на номінальному режимі при обертах 8650 об/хв (таблиця 3). Значення власних частот коливань на цих обертах виникають від збуджуючої гармоніки, що відповідає кількості лопаток соплового апарату, встановленого перед дослідною лопаткою.

Таблиця 3  
Власні частоти коливань лопатки

Число обертів двигуна, об/хв	Збуджуюча гармоніка, шт	Резонансна частота, Гц	Власні частоти лопатки, Гц	
			вихідна	новий матеріал
8650	65	9371	8346	9062
			9385	9562

На рис. 5 та 6 наведено форми коливань робочої лопатки зі сплаву ВЖЛ12Э-ВИ та зі сплаву на основі алюмініду титану відповідно. З наведених рисунків видно, що форми коливань лопаток з різних сплавів якісно схожі.

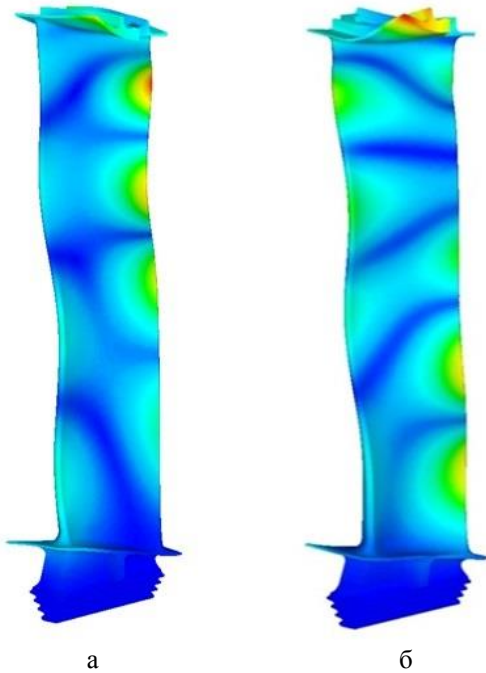


Рис. 5. Власна форма коливань робочої лопатки зі сплаву ВЖЛ12Э-ВИ: а –  $f=8346$  Гц; б –  $f=9385$  Гц

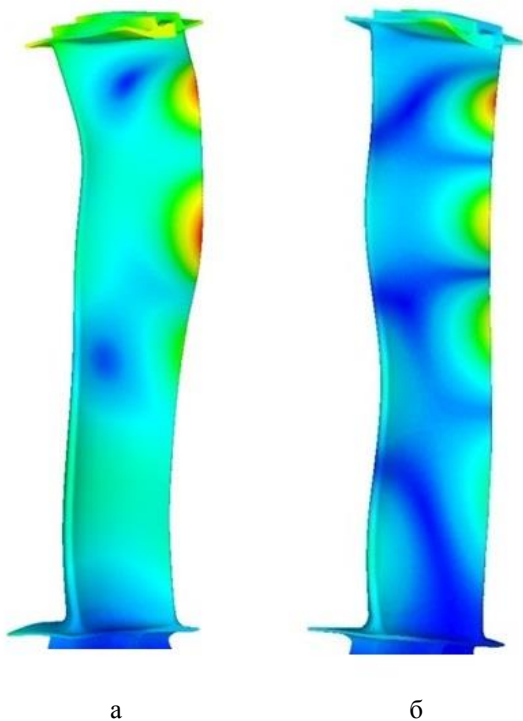


Рис. 6. Власна форма коливань робочої лопатки зі сплаву на основі алюмініду титану: а –  $f=9062$  Гц; б –  $f=9562$  Гц

Для двох варіантів лопаток з різних сплавів побудовані діаграми Кемпбела, що відображають зміну приведених в таблиці 3 власних частот лопатки від частоти обертів двигуна (рис. 7 і 8).

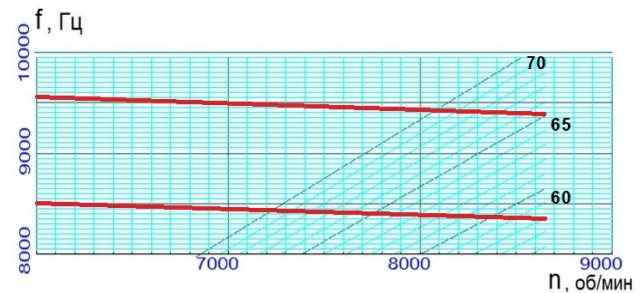


Рис. 7. Діаграма Кемпбела для робочої лопатки зі сплаву ВЖЛ12Э-ВИ

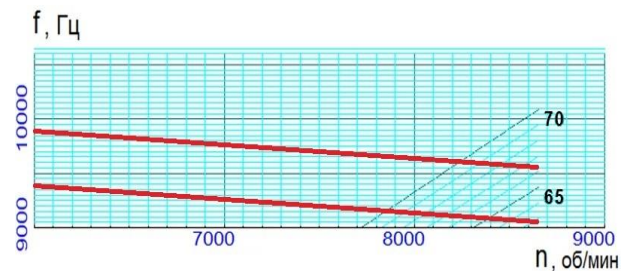


Рис. 8. Діаграма Кемпбела для робочої лопатки на основі алюмініду титану

Аналіз діаграм, приведених на рис. 7 і 8 дозволяє зробити висновок, що при номінальній роботі двигуна лопатка 2 ступеня турбіни як з ВЖЛ12Э-ВИ, так і зі сплаву на основі алюмініду титану не потрапляє у резонанс, який може виникнути в результаті дії 65 гармоніки, що відповідає кількості соплових апаратів. Однак слід зазначити, що при використанні вихідного сплаву ВЖЛ12Э-ВИ частота власних коливань лопатки 9385 Гц (таблиця 3 і рис. 7) близька до резонансної частоти 9371 Гц, а отже, враховуючи можливу відмінність фактичної частоти від розрахункової, лопатка з сплаву ВЖЛ12Э-ВИ в процесі роботи може знаходитись в резонансі. В той же час, при використанні сплаву на основі алюмініду частоти власних коливань лопатки 9062 та 9562 Гц (таблиця 3, рис. 8) знаходяться далі від резонансної частоти, а отже, і вірогідність роботи в резонансі менша.

Для перевірки умов міцності виконані розрахунки напруженого стану лопаток і приведено розподіл еквівалентних напружень при використанні ВЖЛ12Э-ВИ (рис. 9) та сплаву на основі алюмініду титану (рис. 10).



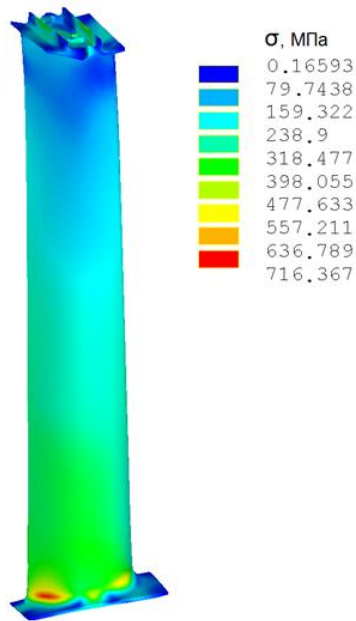


Рис. 9. Розподіл еквівалентних напружень у робочій лопатці зі сплаву ВЖЛ12Э-ВИ

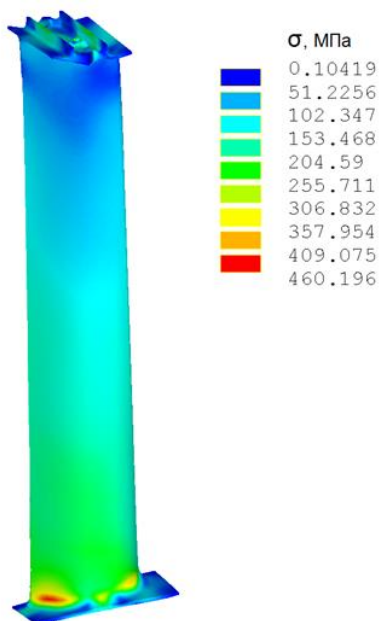


Рис. 10. Розподіл еквівалентних напружень у робочій лопатці зі сплаву на основі алюмініду титану

Показано, що максимальні напруження діють в кореневому перетині пера лопатки і при використанні серійного сплаву становлять 716 МПа (рис. 9). При застосуванні експериментального сплаву з алюмініду титану еквівалентні напруження зменшуються до 460 МПа (рис. 10), тобто на 35% порівняно із вихідними значеннями.

Розподіл температур по висоті пера представлено на рис. 4, згідно з яким максимальна температура лопатки становить 574°C в кінцевій частині

пера; у зоні максимальних напружень, що відповідають кореневому перетину лопатки, температура сягає 436°C. Наведені температурні дані підтверджують можливість використання у якості матеріалу для виготовлення лопатки 2 ступеню вільної турбіни експериментальний сплав системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B), температура застосування якого складає 600...800°C.

Результати розрахунків запасу міцності наведено у відносних величинах (таблиця 4).

Таблиця 4.

Результати розрахунку запасу міцності лопатки

Матеріал лопатки	Перетин лопатки	Температура, °C	Еквівалентні напруження, МПа	Відносний запас міцності, к	
				100 год	25000 год
ВЖЛ12Э-ВИ	кореневий	436	716	1,0	0,991
Алюмінід титану			460	1,02	0,993

Враховуючи температуру пера лопатки в найбільш напруженій її частині, що відповідає 436°C, розрахунки проводили з використанням даних довготривалої міцності сплавів, що розглядаються.

За базове значення «1,0» прийнято коефіцієнт запасу міцності матеріалу ВЖЛ12Э-ВИ за 100год. Розрахункові значення для сплаву з алюмініду титану показали, що запас міцності матеріалу при 100год не менше запасу міцності вихідного сплаву і складає 1,02 відносно базового значення. Шляхом інтерполяції кривої довготривалої міцності визначені коефіцієнти запасу міцності для ресурсу лопатки 25000 год. При розрахунках отримано не-значне зниження коефіцієнту відносно базового значення для обох сплавів.

Згідно проведеного аналізу розрахункових даних лопатки з алюмініду титану задовольняють умовам міцності, а їх ресурсні показники не гірші за вихідний матеріал. Таким чином, проведений комплекс розрахунків дозволяє зробити висновок про можливість використання дослідного сплаву на основі алюмініду титану в якості матеріалу для виготовлення лопатки 2 ступеню вільної турбіни.

## Висновки

1. Обґрунтована актуальність використання новітніх матеріалів для виготовлення деталей турбіни, зокрема лопаток.

2. З використанням програм UnigraphicsNX та Ansys побудовані тривимірні та скінченноелементні моделі лопатки, що відображають особливості її геометрії.

3. На підставі розрахункових моделей визначено зменшення маси дослідної модифікації лопатки при заміні серійного сплаву ВЖЛ12Э-ВИ на сплав на основі алюмініду титану експериментального складу на 40%.

4. Модальним аналізом визначено, що при номінальній роботі двигуна 8650 об/хв частоти власних коливань лопатки з алюмініду титану знаходиться далі від резонансної частоти.

5. Проведено розрахунки та виконано зрівняльний аналіз еквівалентних напружень лопатки з експериментального та серійного сплаву. Доведено, що максимальні напруження діють в кореневому перетині пера лопатки і при використанні експериментального сплаву з алюмініду титану еквівалентні напруження зменшуються на 35% порівняно із вихідними значеннями. Встановлено, що коефіцієнт запасу міцності дослідного сплаву на основі алюмініду не менше запасу міцності серійного сплаву ВЖЛ12Э-ВИ.

6. Використання лопаток з дослідного сплаву дасть зниження маси лопатки на 40%, а колеса 2 ступеню вільної турбіни на 17% без зниження міцності та ресурсу лопатки. На підставі аналізу результатів дослідження, наведених в статті, встановлено, що сплав на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, V) може бути використаний у якості матеріалу для виготовлення лопаток 2 ступеня вільної турбіни, що підтверджено актом впровадження №7 від 24.01.24р. на ДП «Івченко-Прогрес».

**Внесок авторів:** огляд та аналіз інформаційних джерел, формулювання мети і постановки задачі досліджень, аналіз результатів дослідження, формулювання висновків – **О. Б. Галенкова**; розроблення концептуальних положень дослідження – **О. В. Овчинников**; розробка тривимірної моделі, аналіз результатів дослідження – **Р. Ю. Шакало**, **Д. О. Куц**; побудова скінченноелементної моделі та діаграм Кемпбела, розрахунок власних частот коливань – **Р. П. Придорожний**; оформлення результатів – **Д. О. Куц**.

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів у зв'язку з цим дослідженням, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

## Фінансування

Дослідження проводились без фінансової підтримки.

## Доступність даних

Робота має пов'язані дані в сховищі даних.

## Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що під час створення представленої роботи вони не використовували методи штучного інтелекту.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

## Література

- Биргер, И. А. Динамика авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр. – М. : Машиностроение, 1981. – 232 с.
- Воробьев, Ю. С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / Ю. С. Воробьев. – Киев : Наукова думка, 1988. – 224 с.
- Разработка охлаждаемой рабочей лопатки ТВД с внутрисклопочной системой охлаждения [Текст] / Р. Ю. Шакало, Ю. В. Якушев, С. Б. Резник, С. Б. Борис, Р. П. Придорожний // Вестник двигателестроения. – 2018. – №2. – С. 159-163. – Режим доступу: [http://journal.zntu.edu.ua/vd/files/VD22018/VD\(2\)\\_2018.pdf](http://journal.zntu.edu.ua/vd/files/VD22018/VD(2)_2018.pdf). – 5.02.2024.
- Проблемы использования новых материалов для лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / Ю. С. Воробьев, О. В. Махненко, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Берлизова, П. Н. Кулаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 44-49. DOI: 10.20998/2078-774X.2016.09.06.
- Microstructure Design and Its Effect on Mechanical Properties in Gamma Titanium Aluminides [Text] / Xuqi Lui, Qia Lin, Wenjing Zhang, Constance Van Horne, & Limei Cha // Metals. – 2021. – Vol. 11. – Article no. 1644. DOI: 10.3390/met11101644.
- Influence of Nb on Ti diffusion in  $\gamma$ -TiAl intermetallics studied by mechanical spectroscopy [Text] / J. Ibáñez-Pérez, M. L. Nó, M. Oehring, H. Clemens, & J. M. San Juan // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 867. – Article no. 158880. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.158880.

7. Григоренко, С. Г. Интерметаллиды титана. Особенности, свойства, применение (обзор) [Текст] / С. Г. Григоренко, Г. М. Григоренко, О. М. Задорожнюк // Современная металлургия. – 2017. – № 3 (128). – С. 51-58. DOI: 10.15407/sem2017.03.08.

8. Отримання перспективних сплавів на основі алюмінідів титану для сучасного авіамоторобудування [Текст] / О. В. Овчинников, С. В. Ахонін, В. О. Березос, А. Ю. Северин, О. Б. Галенкова, В. Г. Шевченко // Сучасна електрометалургія. – 2024. – № 1. – С. 9-16. DOI: 10.37434/sem2024.01.01.

9. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства [Текст] : Справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.

10. OST 1 90126-85. Сплавы жаропрочные литейные вакуумной выплавки [Текст]. – 11 с. – Режим доступа: [https://bvbyans.by/media/files\\_gost/ost\\_1\\_90126-85.pdf](https://bvbyans.by/media/files_gost/ost_1_90126-85.pdf). – 5.02.2024.

11. Секачев, А. Ф. Определение собственных частот и форм колебаний лопатки МКЭ [Текст] / А. Ф. Секачев, М. Ю. Агарин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 24. – С. 115-116.

12. Расчетно-экспериментальное исследование собственных частот и форм колебаний попарно бандажированных охлаждаемых рабочих лопаток турбин [Текст] / Р. П. Придорожный, А. П. Зинковский, В. М. Меркулов, А. В. Шереметьев, Р. Ю. Шакало // Problemy mitsnosti. – 2019. – №6. – С. 5-17.

## References

1. Birger, I. A., & Shorr, B. F. *Dinamika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Dynamics of aviation gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 232 p. (In Russian).

2. Vorob'yev, Yu. S. *Kolebaniya lopatochnogo apparata turbomashin* [Vibrations of the blade apparatus of turbomachines]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1988. 224 p. (In Russian).

3. Shakalo, R. Yu., Yakushev, Yu. V., Reznik, S. B., Boris, S. B., & Pridorozhnyy, R. P. Razrabotka okhlazhdayemoy rabochey lopatki TVD s vnutristenochnoy sistemoy okhlazhdeniya [Development of a cooled HPT working blade with an intra-wall cooling system]. *Vestnik dvigatelestroeniya Bulletin of Engine Building*, 2018, no. 2, pp. 159-163. Available at: [http://journal.zntu.edu.ua/vd/files/VD22018/VD\(2\)\\_2018.pdf](http://journal.zntu.edu.ua/vd/files/VD22018/VD(2)_2018.pdf). (accessed 5.02.2024). (In Russian).

4. Vorobiev, I. S., Makhnenko, O. V., Ovcharova, N. I., Berlizova, T. I., & Kulakov, P. N. Problemy ispol'zovaniya novykh materialov dlya lopatochnogo apparata turbomashin [Problems of new materials for turbomachine blading]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya* –

NTU "KhPI" Bulletin: Power and Heat Engineering Processes and Equipment, Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2016, no. 9(1181), pp. 44-49. DOI: 10.20998/2078-774X.2016.09.06. (In Russian).

5. Lui, X., Lin, Q., Zhang, W., Van Horne, C., & Cha, L. Microstructure Design and Its Effect on Mechanical Properties in Gamma Titanium Aluminides. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 10, article no. 1644. DOI: 0.3390/met11101644.

6. Ibáñez-Pérez, J., Nô, M. L., Oehring, M., Clemens, H., & San Juan, J. M. Influence of Nb on Ti diffusion in  $\gamma$ -TiAl intermetallics studied by mechanical spectroscopy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 867, article no. 158880. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.158880.

7. Grigorenko, S. G., Grigorenko, G. M., & Zadorozhnyuk, O. M. Intermetallidy titana. Osobennosti, svoystva, primeneniye (obzor) [Intermetallics of titanium. Peculiar features, properties, application (Review)]. *Sovremennaya Elektrometallurgiya – Electrometallurgy Today*, 2017, no. 3 (128), pp. 51-58. DOI: 10.15407/sem2017.03.08. (In Russian).

8. Ovchinnikov, O. V., Akhonin, S. V., Beresos, V. O., Severin, A. Yu., Galenkova, O. B., & Shevchenko, V. G. Otrymannya perspektyvnykh splyaviv na osnovi aluminidiv tytanu dlya suchasnoho aviamotorobuduvannya [Producing advanced alloys based on titanium aluminides for modern aircraft engine manufacturing]. *Suchasna elektrometalurhiya – Electrometallurgy Today*, 2024, no. 1, pp. 9-16. DOI: 10.37434/sem2024.01.01. (In Ukrainian).

9. Il'in, A. A., Kolachev, B. A., & Pol'kin, I. S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik* [Titanium alloys. Composition, structure, properties. Directory]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009. 520 p. (In Russian).

10. OST 1 90126-85. *Splavy zharoprochnyye litynyye vakuumnoy vyplavki* [Heat-resistant vacuum casting alloys]. 11 p. Available at: [https://bvbyans.by/media/files\\_gost/ost\\_1\\_90126-85.pdf](https://bvbyans.by/media/files_gost/ost_1_90126-85.pdf). (accessed 5.02.2024). (In Russian).

11. Sekachev, A. F., & Agarin, M. Yu. Opredelenie sobstvennykh chastot i form kolebaniy lopatki MKE [Determination of the natural frequencies and forms of the oscillating blade using the finite element method]. *Mezhdnarnodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2014, no. 24, pp. 115-116. (In Russian).

12. Pridorozhnyi, R. P., Zin'kovskii, A. P., Merkulov, V. M., Sheremet'ev, A. V., & Shakalo, R. Yu. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie sobstvennykh chastot i form kolebaniy poparno bandazhirovannykh okhlazhdaemykh rabochikh lopatok turbin [Computational-experimental study of natural frequencies and forms of oscillating pair-banded cooled working blades of turbines]. *Problemy prochnosti – Strength of Materials*, 2019, no. 6, pp. 5-17. (In Russian).

**DETERMINATION OF NATURAL FREQUENCIES AND FORMS OF TURBINE BLADE OSCILLATIONS MADE OF AN ALLOY BASED ON TITANIUM ALUMINIDE**

*Olha Halienkova, Olexander Ovchinnikov, Ruslan Shakalo,  
Roman Prydorozhnyi, Dmytro Kuts*

This paper investigates the possibility of manufacturing the working blade of the 2nd stage of the free turbine from an experimental alloy based on titanium aluminide of the Ti-28Al-7Nb-2Mo-0.3 (Y, Re, B) system. Alloys of this class are important structural materials with a unique set of physical and mechanical characteristics. Alloys based on aluminide are characterized by low density, high heat strength, and heat resistance and have a high potential to replace nickel-based alloys designed for operation at temperatures no higher than 850°C. However, the use of a new alloy for the manufacture of a turbine blade involves calculations of the strength and oscillations of the blades. The purpose of the calculations is to determine the possibility of using an aluminide-based alloy of the Ti-28Al-7Nb-2Mo-0.3 (Y, Re, B) system instead of the VZHL12E-VI alloy for the selected working blade. The research was carried out by performing a modal analysis, determining the stress-deformed state, and checking the strength and mass characteristics. The physical properties of the materials were used as the initial data for the calculation. The geometry and temperature distribution of the blade and its fixing remained constant for the two options. A three-dimensional model of the experimental vane was built using the Unigraphics NX system, and a finite element model was developed using the Ansys software complex. It was established that when an experimental alloy is used, the mass of one blade is reduced by almost 40%. Using the finite element method, the natural frequencies and forms of blade oscillations were calculated, and Campbell's diagrams were constructed for the original and experimental blades for the nominal operation of the engine. When using an experimental alloy, the frequencies of the blades' natural oscillations are further from the resonant frequency. The distribution of equivalent stresses was determined, and it was shown that the maximum stresses act in the root section of the blade feather. When using the experimental alloy based on titanium aluminide, the equivalent stresses are reduced by 35% compared with the initial values. It is shown that the safety margin of the proposed material is not less than that of the VZHL12E-VI alloy.

**Keywords:** titanium aluminide; turbine blade; three-dimensional model; finite element model; natural frequencies of oscillations; Campbell's diagram.

**Галєнкова Ольга Борисівна** – інженер 2 категорії ВГМет ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Овчинников Олександр Володимирович** – Заступник генерального директора НДІ «Титан», Запоріжжя, Україна

**Шакало Руслан Юрійович** – керівник групи відділу компресорів ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Придорожний Роман Петрович** – канд. техн. наук, керівник групи ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Куц Дмитро Олексійович** – провідний конструктор управління головного конструктора АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна.

**Olha Halienkova** – Engineer of the 2nd Category at the Department of the Chief Metallurgist, SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: olya.galenkova@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6007-1931.

**Olexander Ovchinnikov** – Deputy General Director of SRI "Titan", Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: vikapaskozp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5649-1094.

**Ruslan Shakalo** – Group Leader at the Compressor Department, SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: Shakaloryu@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0003-4324-9191.

**Roman Prydorozhnyi** – Group Leader, SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0001-6014-634X.

**Dmytro Kuts** – Lead Designer of Main Designer Office JSC "MOTOR SICH", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kda-74@meta.ua, ORCID: 0009-0000-3110-4978.