

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Неманежин Євген Олександрович

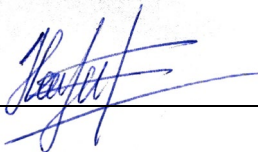
УДК 629.7:539.4

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ
МІЦНОСТІ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН ПРИ СТАТИЧНИХ ТА
ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Спеціальність 113 – Прикладна математика
Галузь знань 11 – Математика та статистика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


Є.О. Неманежин

Наукові керівники:
Львов Геннадій Іванович,
доктор технічних наук, професор

Торба Юрій Іванович,
кандидат технічних наук

Харків - 2024

АНОТАЦІЯ

Неманежин Є.О. Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 113 – Прикладна математика. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2024.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню характеристик високотемпературної міцності лопаток турбін газотурбінних двигунів (ГТД) в умовах статичних та динамічних навантажень та розробці методів для якісного оцінювання параметрів напружено деформованого стану.

Об'єкт дослідження – процес розвитку пружних деформацій та повзучості в робочих режимах лопаток турбін з монокристалічних нікелевих жароміцних сплавів.

Предмет дослідження – характеристики високотемпературної міцності лопаток турбін при статичних та динамічних навантаженнях з урахуванням анізотропних властивостей монокристалічних сплавів.

Метою дослідження є розробка теоретичних та експериментальних підходів до визначення характеристик високотемпературної міцності лопаток турбін в умовах статичного та динамічного навантаження, які враховують особливості складного об'ємно-напруженого стану лопаток, навантаження у місцях концентрації напружень та анізотропію пружних та інших механічних властивостей нікелевих жароміцних сплавів.

У *вступі* наведено обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження, надана інформація про предмет та об'єкт дослідження, методи дослідження, а також зазначено наукову новизну представленої роботи. Зокрема, у вступі визначені основні практичні результати дисертаційного дослідження,

містяться відомості про апробацію результатів дисертації, а також про внесок здобувача в опублікованих наукових працях.

У *першому розділі* було виконано огляд науково-технічних джерел інформації, що стосуються сучасних підходів до оцінки високотемпературної міцності лопаток турбін. Зокрема, у розділі приведено порівняльний аналіз різних методів виготовлення лопаток турбін ГТД, а саме спрямовану кристалізацію та монокристалічне лиття. Також міститься інформація про основні фізико-механічні властивості різних поколінь жароміцних нікелевих сплавів вітчизняного та закордонного виробництва.

Обґрунтовано основні особливості математичного моделювання анізотропії жароміцних сплавів, які отримуються в результаті монокристалічного лиття, та її вплив на характеристики міцності лопаток турбін. Проведена систематизація інформації про сучасні та фундаментальні дослідження у області повзучості, довготривалої та втомної міцності монокристалічних жароміцних сплавів на нікелевій основі.

В *другому розділі* дисертації досліджено вплив анізотропії пружних властивостей монокристалів на власні частоти та форми коливань лопаток турбін ГТД. Розроблено та описано метод визначення пружних характеристик монокристалів для різних температур на основі експериментальних даних. Запропоновано метод розрахунку пружних податливостей жароміцних монокристалічних сплавів з метою оцінки зміни власних частот коливань лопаток турбін при повороті кристалографічних систем напрямків монокристалів. Проведено чисельний експеримент з визначення власних форм та частот коливань охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску. Виконана побудова діаграм Кемпбелла лопаток турбіни, визначені основні небезпечні гармоніки збуджуючих сил та наведено приклад відстроювання від небезпечних резонансних форм та частот коливань лопатки.

Обґрунтовано процес верифікації розрахункової дискретної математичної моделі лопатки. Правильність побудови моделі для обчислень підтверджувалася шляхом порівняння визначених експериментального перших двох резонансних

форм та частот коливань натурних лопаток турбіни та результатів скінченно-елементного моделювання перших двох власних форм та частот моделі лопатки турбіни, що охолоджується.

Третій розділ дисертаційного дослідження присвячено процесу моделювання стаціонарної повзучості лопаток турбіни ГТД. Розроблена математична модель повзучості монокристалічного сплаву, а також метод розрахунку констант повзучості на усталеній (стаціонарній) стадії згідно закону Нортон-Бейлі (Norton-Bailey) шляхом апроксимації експериментальних даних по повзучості монокристалічного нікелевого жароміцного сплаву.

На прикладі розрахункової моделі лопатки турбіни, що охолоджується, проведено скінченно-елементне моделювання повзучості для декількох часових проміжків дії процесу повзучості. В результаті проведеного моделювання показано перерозподіл напружень та деформацій по об'єму лопатки.

У четвертому розділі описано метод оцінки впливу анізотропних властивостей монокристалічних жароміцних сплавів на довговічність лопаток газових турбін. Зазначений метод включає в себе апроксимацію експериментальних температурно-часових залежностей, представлених у вигляді параметру Ларсона-Міллера (Larson-Miller), для різних орієнтацій монокристалу. Виконано скінченно-елементне моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера (Larson-Miller) по об'єму лопатки турбіни. За допомогою розробленого методу, на основі проведеного моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера (Larson-Miller), проведено чисельний експеримент з визначення часу до руйнування лопатки турбіни для різних кристалографічних орієнтацій монокристалу та для декількох температурних режимів.

П'ятий розділ присвячено експериментальному дослідженню високотемпературної багатоциклової втомної міцності монокристалічних лопаток турбіни. Наведено опис розробленої спеціальної установки для випробування лопаток турбін в умовах комбінованого температурного та динамічного навантаження. Запропоновано комбінований метод оцінки багатоциклової втомної міцності в умовах високих температур, який включає

проведення досліджень на натурних лопатках турбіни та розрахунки методом скінченних елементів. Проведено динамічне та температурне тарування відібраних монокристалічних лопаток турбін. Виконані втомні випробування з визначення межі витривалості лопаток в умовах високої температури, яка дорівнює $T = 820$ °С.

У висновках підводяться підсумки дисертації, надано опис основних задач науково-прикладного характеру, що були вирішені в процесі проведення дослідження, а також висвітлено основні результати практичного застосування.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає у тому, що *вперше* зроблено наступне:

- розроблено метод моделювання впливу зміни орієнтації кристалографічних напрямків на власні частоти коливань турбінних лопаток з монокристалічних сплавів. Метод реалізовано в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу, що дозволяє на стадії проектування лопаток забезпечувати відмежування від небезпечних резонансних режимів;

- проведено верифікацію результатів модального аналізу шляхом експериментального дослідження першої та другої частот резонансних коливань охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску авіаційного двигуна, що підтвердило достовірність врахування орієнтації кристалографічних напрямків;

- проведено експериментальні дослідження втомної міцності монокристалічних лопаток газової турбіни при високотемпературному багатоцикловому навантаженні;

- побудовано математичну модель анізотропної повзучості монокристалів з кубічною симетрією та процедуру ідентифікації матеріальних констант моделі по результатам фізичних експериментів при різних температурах;

- створено чисельно-аналітичний метод обчислення довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбіни, які знаходяться під навантаженням від відцентрових сил. Скінченно-елементний аналіз розподілу напружень в стані повзучості, що встановилася, поєднано з використанням феноменологічного параметру Ларсона-Міллера (Larson-Miller). Розроблене програмне забезпечення

дозволяє знаходити час до руйнування лопаток з різними кристалографічними орієнтаціями (КГО).

При виконанні дисертаційного дослідження отримані наступні основні *результати практичного використання*:

1. Побудована діаграма резонансу монокристалічних лопаток турбіни високого тиску та визначені основні небезпечні гармоніки збуджуючої сили. Запропоновано метод відстроювання від небезпечних резонансних режимів. Базуючись на основі розрахованих пружних характеристик матеріалу, цей метод включає оцінку зміни власних частот та форм коливань лопаток турбін при повороті обраної кристалографічної системи напрямків на довільний кут. Розроблені співвідношення для зручного обчислення компонентів матриці пружних податливостей при повороті кристалографічної системи напрямків монокристалу.

2. Запропоновано модель повзучості монокристалічного сплаву із властивостями кубічної симетрії, яка дозволяє визначити всі характеристики повзучості анізотропного монокристалічного матеріалу.

3. Запропоновано метод обчислення довготривалої міцності лопаток турбін, виготовлених із монокристалічних нікелевих сплавів. Метод складається з декількох етапів: ідентифікація рівнянь параметру Ларсона-Міллера, базуючись на експериментальних даних для кристалів з різною орієнтацією; моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера по лопатці турбіни; розрахунок часу до руйнування для кристалів із різною кристалографічною орієнтацією.

4. Розроблена спеціальна експериментальна установка для проведення випробувань лопаток турбін в умовах комбінованого високотемпературного та динамічного навантаження. Основне призначення установки полягає у виконанні багатоциклових втомних випробувань з метою визначення межі витривалості лопаток газових турбін. Значення межі витривалості може використовуватися при оцінці запасів міцності лопаток турбін.

За результатами дослідження, актом впровадження на підприємстві ДП «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя), підтверджено практичну та теоретичну цінність розроблених методів, надано практичні рекомендації, щодо застосування розроблених методів та розглянуто перспективи їх подальшого розвитку.

Ключові слова: математична модель, ресурс, скінченно-елементний аналіз, відцентрова сила, модальний аналіз, власна частота коливань, тривимірний скінченно-елементна модель, ортотропія властивостей, руйнування від повзучості, метод найменших квадратів, апроксимація, напружено-деформований стан, термонапружений стан, експериментальна верифікація, міцність.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Неманежин Є. О., Івко В. М., Торба Ю. І. Теоретичні та експериментальні методи визначення характеристик міцності лопаток турбін при термомеханічному навантаженні. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. № 4 спецвипуск 1(173). С. 93-101. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4sup1.13> (Б)

2. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Методика визначення характеристик сталого повзучості монокристалічного сплаву. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022. №4 спецвипуск 2(182). С. 42-49. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.07> (Б)

3. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Методика оцінки залежності власних частот коливань лопаток газових турбін від анізотропії монокристалу. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. №4 спецвипуск 2(190). С. 50-58. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4sup2.06> (Б)

4. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Чисельне моделювання повзучості лопатки турбіни з монокристалічного сплаву. *Вісник Національного*

технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. 2023. № 2. С. 88-94. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.2.276861> (Б)

5. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Оцінка впливу анізотропних властивостей монокристалічних лопаток турбін авіаційних газотурбінних двигунів на їх довготривалу міцність. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2024. №4 спецвипуск 2. С. 39-51. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4sup2.06> (Б)

6. Неманежин Є. О. Чисельно-експериментальне дослідження високотемпературної багатоциклової втомної міцності монокристалічних лопаток газових турбін. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2024. №5. С. 14-26. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.5.02> (Б)

7. Неманежин Є. О. Аналіз особливостей умов роботи сучасних лопаток газових турбін та огляд методів визначення параметрів їх високотемпературної міцності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин*. 2024. № 1. С. 52-61. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2024.1.312052> (Б)

8. Nemanezhyn Y., Lvov G., Torba Y. Numerical simulation of the steady creep of single-crystal alloys. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds). ICTM 2022. *Lecture notes in networks and systems (Electronic ISSN 2367-3389)*. Springer. Cham. 2023. Vol. 657. P. 421-429. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_36 (Scopus, Швейцарія)

9. Nemanezhyn Y., Lvov G., Torba Y. Numerical simulation of the natural frequencies dependence of turbine blade vibrations on single-crystal anisotropy. In: Tonkonogyi V., Ivanov V., Trojanowska J., Oborskyi G., Pavlenko I. (eds). *Advanced manufacturing processes V. InterPartner 2023. Lecture notes in mechanical engineering (Electronic ISSN 2195-4364)*. Springer. Cham. 2024. P. 485-497. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_45 (Scopus, Швейцарія)

10. Nemanezhyn Y., Lvov G., Torba Y. A research on the influence of anisotropic characteristics of single-crystal gas turbine blades on their durability. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Krytskyi D. (eds). ICTM 2023. *Lecture notes in networks*

and systems (Electronic ISSN 2367-3389). Springer. Cham. 2024. Vol. 1008. P. 397-408. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_34 (Scopus, Швейцарія)

Публікації, що засвідчують апробацію результатів дисертації:

11. Неманежин Є. О., Івко В. М., Торба Ю. І. Сучасні методи випробування лопаток турбін в умовах термомеханічного навантаження. *XXVI Міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків: НАКУ «ХАІ». 2021. С. 29.*

12. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Неізотермічна модель повзучості з урахуванням пошкоджуваності. *XV Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців»: матеріали конференції. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. С. 429-430.*

13. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Моделювання повзучості монокристалічного сплаву та визначення його середніх характеристик. *XXVII Міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків: НАКУ «ХАІ». 2022. С. 14.*

14. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Скінчено-елементне моделювання коливань лопатки турбіни. *XVI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців»: матеріали конференції. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. С. 121-122.*

15. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Оцінка залежності власних частот коливань лопаток турбін ГТД від анізотропії пружних властивостей монокристалу. *XXVIII Міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків: НАКУ «ХАІ». 2023. С. 34.*

16. Nemanezhyn Y., Lvov G., Torba Y. Numerical simulation of the natural frequencies dependence of turbine blade vibrations on single-crystal anisotropy. *Book of abstracts of the 5th Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes. Odessa. Sumy: IATDI. 2023. P. 74.*

17. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Моделювання стаціонарної повзучості монокристалічної лопатки турбіни авіаційного газотурбінного

двигуна. *XVII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців»: матеріали конференції. Харків: НТУ «ХПИ». 2023. С. 104-105.*

18. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Дослідження довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбін АГТД з урахуванням їх анізотропних характеристик. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024. Харків: НТУ «ХПИ». 2024. С. 485.*

19. Неманежин Є. О., Львов Г. І., Торба Ю. І. Розробка методу визначення впливу анізотропних характеристик монокристалічних турбінних лопаток газотурбінних двигунів на їх довготривалу міцність. *XXIX Міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків: НАКУ «ХАІ». 2024. С. 44-45.*

ABSTRACT

Nemanezhyn Y.O. Development of methods for calculating the high-temperature strength of gas turbine blades under static and dynamic loading. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 113 – Applied Mathematics. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the study of high-temperature strength characteristics of gas turbine engine (GTE) turbine blades under static and dynamic loading and the development of methods for qualitative assessment of the parameters of the stress-strain state.

Object of research is the process of development of elastic deformation and creep in operating modes of turbine blades made of single-crystal nickel heat-resistant alloys.

The subject of research is the characteristics of high-temperature strength of turbine blades under static and dynamic loading with consideration of anisotropic properties of single-crystal alloys.

The purpose of the dissertation is to develop theoretical and experimental approaches to determining the characteristics of high-temperature strength of turbine blades under static and dynamic loading, taking into account the peculiarities of the complex volume-stressed state of the blades, loading in places of stress concentration and anisotropy of elastic and other mechanical properties of nickel heat-resistant alloys.

The *introduction* provides the rationale for choosing the topic of the dissertation thesis, provides information on the subject and object of the investigation, research methods, and indicates the scientific novelty of the presented work. In particular, the main practical results of the dissertation thesis are identified, and there is information about the approbation of the results of the dissertation, as well as the applicant's contribution to published scientific works.

In *the first chapter*, a review of scientific and technical sources of information related to modern approaches to assessing the high-temperature strength of turbine blades was performed. A comparative analysis of different methods of manufacturing turbine blades for GTEs, namely, directional crystallization and single-crystal casting were presented. It also contains information on the main physical and mechanical properties of different generations of heat-resistant nickel alloys produced in Ukraine and abroad.

The main features of mathematical modelling of the anisotropy of heat-resistant alloys produced by single-crystal casting, and its impact on the strength characteristics of turbine blades were justified. Information on modern and fundamental research in the field of creep, long-term and fatigue strength of single-crystal nickel-based heat-resistant alloys was systematized.

In *the second chapter* of the dissertation thesis the effect of the anisotropy of the elastic properties of single crystals on the natural frequencies and vibration modes of GTE turbine blades was investigated. A method for determining the elastic characteristics of single crystals for different temperatures based on experimental data was developed and described. A method for calculating the elastic compliances of heat-resistant single-crystal alloys was proposed to assess the change in the natural frequencies of turbine blade vibrations when the crystallographic systems of single-crystal directions are rotated. A numerical experiment was carried out to determine the natural shapes and vibration modes of a cooled high-pressure turbine blade. Campbell diagrams of the turbine blades are constructed, the main dangerous harmonics of the exciting forces were determined, and an example of detuning from dangerous resonant frequencies and vibration modes of the blade was introduced.

The process of verification of the discrete mathematical calculation model of the blade was justified. The correctness of the model construction for computations was confirmed by comparing the first two resonant frequencies and vibration modes of the natural turbine blades determined experimentally and the results of finite-element modelling of the first two eigenfrequencies and vibration modes of the model of the cooled turbine blade.

The third chapter of the dissertation research is devoted to the process of modelling the stationary creep of GTE turbine blades. A mathematical model of single-crystal alloy creep was developed, as well as a method for calculating creep constants at the steady-state stage according to the Norton-Bailey law by approximating experimental data on the creep of a single-crystal nickel heat-resistant alloy.

On the example of a computational model of a cooled turbine blade, a finite-element modelling of creep was carried out for several time intervals of the creep process. The results of numerical modelling show the redistribution of stresses and strains over the blade volume.

In *the fourth chapter*, a method for assessing the influence of anisotropic properties of single-crystal heat-resistant alloys on the durability of gas turbine blades was described. The specified method includes the approximation of experimental temperature-time dependences, represented in form of the Larson-Miller parameter, for different single crystal orientations. A finite-element modelling of the distribution of the Larson-Miller parameter over the volume of the turbine blade was performed. Using the developed method, based on the modelling of the Larson-Miller parameter distribution, a numerical experiment was carried out to determine the time-to-failure of the turbine blade for different crystallographic orientations of the single crystal and for several temperature regimes.

The fifth chapter is devoted to the experimental study of the high-temperature multi-cycle fatigue strength of single-crystal turbine blades. Description of the developed special installation for testing turbine blades under combined temperature and dynamic loading is described. A combined method for assessing the multi-cycle fatigue strength at high temperatures has been developed, which includes tests on full-scale turbine blades and finite-element calculations. Dynamic and temperature calibration of selected single-crystal turbine blades was carried out. Fatigue tests were carried out to determine the endurance limit of the blades at high temperature, equal to $T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The *conclusions* summarize the results of the dissertation, describe the main scientific and applied tasks that were solved in the course of the study, and highlight the main results of practical application.

The *scientific novelty* of the results of the dissertation is that the following was done *for the first time*:

- a method for modelling the effect of changes in the orientation of crystallographic directions on the natural vibration frequencies of turbine blades made of single-crystal alloys was developed. The method is implemented in finite-element analysis software packages, which allows to ensure detuning from dangerous resonance modes at the blade design stage;

- verification of the results of the modal analysis was carried out by experimental study of the first and second frequencies of resonant vibrations of the cooled blade of a high-pressure turbine of an aircraft engine, which confirmed the reliability of taking into account the orientation of crystallographic directions;

- experimental studies of fatigue strength of single-crystal gas turbine blades under high-temperature multi-cycle loading were carried out;

- a mathematical model of anisotropic creep of single crystals with cubic symmetry and a procedure for identifying the material constants of the model based on the results of physical experiments at different temperatures were developed;

- a numerical-analytical method for calculating the long-term strength of single-crystal turbine blades under centrifugal force loading was developed. The finite-element analysis of stress distribution in the steady-state creep state is combined with the use of the phenomenological Larson-Miller parameter. The developed software allows finding the time-to-fracture for blades with different crystallographic orientations (CGO).

The following *main results of practical application* were obtained in the course of the dissertation research:

1. The resonance diagram of single-crystal blades of a high-pressure turbine was constructed and the main dangerous harmonics of the exciting force were determined. A method for detuning from dangerous resonance modes is proposed. Based on the

calculated elastic characteristics of the material, this method includes an assessment of changes in the natural frequencies and vibration modes of turbine blades when the selected crystallographic system of directions is rotated by an arbitrary angle. The relations for convenient calculation of the components of the elastic elasticity matrix when the crystallographic system of directions of a single crystal is rotated were developed.

2. A model of creep of a single-crystal alloy with cubic symmetry properties is proposed, which allows determining all the creep characteristics of an anisotropic single-crystal material.

3. A method for calculating the long-term strength of turbine blades made of single-crystal nickel alloys is proposed. The method consists of several steps: identification of the equations of the Larson-Miller parameter based on experimental data for crystals with different orientations; modelling the distribution of the Larson-Miller parameter over the turbine blade; calculation of the time-to-failure for crystals with different crystallographic orientations.

4. A special experimental setup was developed for testing turbine blades under combined high-temperature and dynamic loading. The main purpose of the installation is to perform multi-cycle fatigue tests to determine the endurance limit of gas turbine blades. The value of the endurance limit can be used to assess the safety margins of turbine blades.

The results of research confirm, with an act of implementation at “Ivchenko-Progress” SE, Zaporizhzhia, the practical and theoretical value of the developed methods, provide practical recommendations on the application of the developed methods and consider the prospects for their further improvement.

Key words: mathematical model, life-time, finite element analysis, centrifugal forces, modal analysis, natural vibration frequency, three-dimensional finite element model, orthotropy of characteristics, creep rupture, least squares method, approximation, stress-strain state, thermal stress state, experimental verification, strength.

List of publications of the applicant

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are highlighted (transliterated):

1. Nemaneyzhyn Y. O., Ivko V. M., Torba Yu. I. Teoretychni ta eksperymental'ni metody vyznachennya kharakterystyk mitsnosti lopatok turbin pry termomekhanichnomu navantazhenni [Theoretical and experimental methods for determining the strength characteristics of turbine blades under thermomechanical loading]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aerospace technic and technology*. 2021. No. 4 special issue 1(173). P. 93-101. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4sup1.13> [In Ukrainian].

2. Nemaneyzhyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Metodyka vyznachennya kharakterystyk staloyi povzuchosti monokrystalichnoho splavu [A method for determining the characteristics of the steady creep of a single crystal alloy]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aerospace technic and technology*. 2022. No. 4 special issue 2(182). P. 42-49. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.07> [In Ukrainian].

3. Nemaneyzhyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Metodyka otsinky zalezhnosti vlasnykh chastot kolyvan' lopatok hazovykh turbin vid anizotropiyi monokrystalu [A method for evaluation of the dependence of gas turbine blade vibrations on monocrystalline anisotropy]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aerospace technic and technology*. 2023. No. 4 special issue 2(190). P. 50-58. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4sup2.06> [In Ukrainian].

4. Nemaneyzhyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Chysel'ne modelyuvannya povzuchosti lopatky turbiny z monokrystalichnoho splavu [Numerical modelling of creep of a turbine blade made of single-crystal alloy]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Dynamika ta mitsnist' mashyn – Bulletin of the National technical university «KhPI». Series: Dynamics and strength of machines*. 2023. No. 2. P. 88-94. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.2.276861> [In Ukrainian].

5. Nemanazhyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Otsinka vplyvu anizotropnykh vlastyvostey monokrystalichnykh lopatok turbin aviatsiynykh hazoturbinykh dvyhuniv na yikh dovhotryvalu mitsnist' [Evaluation of the influence of anisotropic properties of single-crystal turbine blades of aircraft turbofan engines on their long-term strength]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aerospace technic and technology*. 2024. No. 4 special issue 2. P. 39-51. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4sup2.06> [In Ukrainian].

6. Nemanazhyn Y. O. Chysel'no-eksperymental'ne doslidzhennya vysokotemperaturnoyi bahatotsyklovoi vtomnoyi mitsnosti monokrystalichnykh lopatok hazovykh turbin [Numerical and experimental study of high-temperature multi-cycle fatigue strength of single-crystal gas turbine blades]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aerospace technic and technology*. 2024. No. 5. P. 14-26. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.5.02> [In Ukrainian].

7. Nemanazhyn Y. O. Analiz osoblyvostey umov roboty suchasnykh lopatok hazovykh turbin ta ohlyad metodiv vyznachennya parametriv yikh vysokotemperaturnoyi mitsnosti [Analysis of the features of the operating conditions of modern gas turbine blades and review of methods for determining their high temperature strength parameters]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Dynamika ta mitsnist' mashyn – Bulletin of the National technical university «KhPI». Series: Dynamics and strength of machines*. 2024. No. 1. P. 52-61. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2024.1.312052> [in Ukrainian].

8. Nemanazhyn Y., Lvov G., Torba Y. Numerical simulation of the steady creep of single-crystal alloys. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds). ICTM 2022. *Lecture notes in networks and systems (Electronic ISSN 2367-3389)*. Springer. Cham. 2023. Vol. 657. P. 421-429. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_36

9. Nemanazhyn Y., Lvov G., Torba Y. Numerical simulation of the natural frequencies dependence of turbine blade vibrations on single-crystal anisotropy. In: Tonkonogyi V., Ivanov V., Trojanowska J., Oborskyi G., Pavlenko I. (eds). *Advanced manufacturing processes V. InterPartner 2023. Lecture notes in mechanical*

engineering (Electronic ISSN 2195-4364). Springer. Cham. 2024. P. 485-497. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_45

10. Nemaneshyn Y., Lvov G., Torba Y. A research on the influence of anisotropic characteristics of single-crystal gas turbine blades on their durability. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Krytskyi D. (eds). ICTM 2023. *Lecture notes in networks and systems (Electronic ISSN 2367-3389). Springer. Cham. 2024. Vol. 1008. P. 397-408. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_34*

Publications that certify the approbation of the results of dissertation thesis:

11. Nemaneshyn Y. O., Ivko V. M., Torba Yu. I. Suchasni metody vyprobuvannya lopatok turbin v umovakh termomekhanichnoho navantazhennya [Modern methods of testing turbine blades under thermomechanical loading]. *XXVI International congress of engine builders: abstracts of reports. Kharkiv: NAU «KhAI». 2021. P. 29. [In Ukrainian].*

12. Nemaneshyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Neizotermichna model' povzuchosti z urakhuvannyam poshkodzhuvanosti [Non-isothermal creep model with damage consideration]. *XV International scientific and practical conference for master and postgraduate students "Theoretical and practical research of young scientists": conference abstracts. Kharkiv: NTU «KhPI». 2021. P. 429-430. [In Ukrainian].*

13. Nemaneshyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Modelyuvannya povzuchosti monokystalichnoho splavu ta vyznachennya yoho serednikh kharakterystyk [Modelling of single-crystal alloy creep and determination of its average characteristics]. *XXVII International congress of engine builders: abstracts of reports. Kharkiv: NAU «KhAI». 2022. P. 14. [In Ukrainian].*

14. Nemaneshyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Skincheno-elementne modelyuvannya kolyvan' lopatky turbiny [Finite-element modelling of turbine blade vibrations]. *XVI International scientific and practical conference for master and postgraduate students "Theoretical and practical research of young scientists": conference abstracts. Kharkiv: NTU «KhPI». 2022. P. 121-122. [In Ukrainian].*

15. Nemaneshyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Otsinka zalezhnosti vlasnykh chastot kolyvan' lopatok turbin HTD vid anizotropiyi pruzhnykh vlastyvostry monokryystalu [Estimation of the dependence of natural vibration frequencies of GTE turbine blades on the anisotropy of single crystal elastic properties]. *XXVIII International congress of engine builders: abstracts of reports. Kharkiv: NAU «KhAI». 2023. P. 34. [In Ukrainian].*

16. Nemaneshyn Y., Lvov G., Torba Y. Numerical simulation of the natural frequencies dependence of turbine blade vibrations on single-crystal anisotropy. *Book of abstracts of the 5th Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes. Odessa. Sumy: IATDI. 2023. P. 74.*

17. Nemaneshyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Modelyuvannya statsionarnoyi povzuchosti monokryystalichnoyi lopatky turbiny aviatsiynoho hazoturbinnoho dvyhuna [Modelling of steady-state creep of a single-crystal turbine blade of an aircraft gas turbine engine]. *XVII International scientific and practical conference for master and postgraduate students "Theoretical and practical research of young scientists": conference abstracts. Kharkiv: NTU «KhPI». 2023. P. 104-105. [In Ukrainian].*

18. Nemaneshyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Doslidzhennya dovhotryvaloyi mitsnosti monokryystalichnykh lopatok turbin AHTD z urakhuvannyam yikh anizotropnykh kharakterystyk [Study of the long-term strength of single-crystal AGTE turbine blades with regard to their anisotropic characteristics]. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: abstracts of reports of the XXXII International scientific and practical conference MicroCAD-2024. Kharkiv: NTU «KhPI». 2024. P. 485. [In Ukrainian].*

19. Nemaneshyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Rozrobka metodu vyznachennya vplyvu anizotropnykh kharakterystyk monokryystalichnykh turbinykh lopatok hazoturbinykh dvyhuniv na yikh dovhotryvalu mitsnist' [Development of a method for determining the influence of anisotropic properties of single-crystal turbine blades of gas turbine engines on their long-term strength]. *XXIX International congress of engine builders: abstracts of reports. Kharkiv: NAU «KhAI». 2024. P. 44-45. [In Ukrainian].*