

УДК 621.452.3.03-226:539.4

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.06

Є. О. НЕМАНЕЖИН^{1,2}, Г. І. ЛЬВОВ², Ю. І. ТОРБА¹¹Державне підприємство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна²Національний технічний університет «

Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ АНІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЛОПАТОК ТУРБІН АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ НА ЇХ ДОВГОТРИВАЛУ МІЦНІСТЬ

Показник довготривалої статичної міцності є одним із ключових та найважливіших параметрів, який обчислюється на стадії ресурсного проектування лопаток турбін авіаційних двигунів. Важливість дослідження та моделювання цього показника базується на багатьох факторах. Зокрема, слід зазначити, що одним із таких факторів є особливості прояву анізотропних характеристик монокристалічних турбінних лопаток, які виготовляються із нікелевих жароміцних сплавів, у широкому діапазоні температурних та силових навантажень. Також, ще одним важливим фактором при цьому виступають різні кристалографічні орієнтації монокристала. Аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день загальних уніфікованих підходів до оцінки довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбін не існує. До основних підходів, описаних в наукових джерелах, можна віднести мікромеханічні (фізичні, кристалографічні) та феноменологічні моделі оцінки довговічності конструкцій, виготовлених із монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів. Також є багато авторських методів, розроблених у колах наукової спільноти. Основна маса існуючих підходів, які описані у значній кількості літературних джерел, мають як багато своїх переваг, так і багато значних недоліків. У цьому дослідженні пропонується власний комплексний підхід до розрахунку та оцінки довготривалої міцності монокристалічних лопаток газових турбін. Пропонований у наведеному матеріалі алгоритм засновано на отриманні рівнянь розподілу параметру Ларсона-Міллера методом апроксимації літературних експериментальних даних для різних кристалографічних орієнтацій лопаток турбін. Основою для проведення чисельного моделювання розподілу параметру Ларсона-Міллера по об'єму лопатки турбіни є розрахунок повзучості за законом Нортонна. Отримані при апроксимації рівняння параметру Ларсона-Міллера для різних орієнтацій кристала були використані при скінчено-елементному моделюванні його розподілу на прикладі охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску. Розрахунки проводилися з використанням потужностей програмного комплексу ANSYS Workbench. На основі проведених обчислень виконано моделювання часу до руйнування для різних кристалографічних орієнтацій та для різних температурних станів лопатки.

Ключові слова: скінчено-елементне моделювання; анізотропія; монокристалічний сплав; кристалографічна орієнтація; повзучість; довготривала міцність; параметр Ларсона-Міллера; лопатки турбіни; авіаційний двигун.

Вступ

При оцінюванні ефективного життєвого циклу монокристалічних лопаток газових турбін особливу увагу слід приділяти дослідженню довготривалої статичної міцності нікелевих жароміцних сплавів. При цьому, необхідно враховувати особливості деформування різних кристалографічних орієнтацій при змінах, в широкому діапазоні, силових та температурних навантажень. Зазначені фактори виступають в якості найбільш впливових при ресурсному проектуванні авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД).

На сьогоднішній день відсутні загальноприйняті підходи оцінки довговічності та розрахунку на-

пружено-деформованого стану монокристалічних лопаток газових турбін. Для оцінки характеристик міцності анізотропних монокристалічних турбінних лопаток не підходять існуючі ізотропні непружні розрахункові моделі. Найбільш прийнятним підходом до оцінки довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбін АГТД при знакозмінному термоциклічному навантаженні є використання мікромеханічних (фізичних, кристалографічних) моделей непружного деформування монокристалів [1-3]. Такі моделі враховують особливості деформування монокристалу по його системам ковзання. До недоліків мікромеханічних моделей можна віднести: визначення величезної кількості невідомих парамет-

рів конкретних матеріалів; неможливість використання сучасного програмного забезпечення скінчено-елементного аналізу для розрахунків; потреба у розробці спеціалізованого програмного забезпечення для проведення обчислень. До альтернативних підходів оцінки довговічності монокристалічних сплавів можна віднести різноманітні феноменологічні моделі непружного деформування матеріалів [4-7], які також мають низку переваг та недоліків.

Додатковим ускладненням при вивченні закономірностей непружного деформування монокристалів є необхідність врахування еволюції вихідної мікроструктури $\gamma-\gamma'$ конкретного досліджуваного сплаву в умовах тривалого високотемпературного навантаження. Наступні фактори впливають на особливості еволюції мікроструктури сплавів, а саме: змінна або стійка температура, час дії деформацій та величина деформацій, особливості кристалографічної орієнтації конкретних зразків з матеріалу, структура та хімічний склад конкретного нікелевого жароміцного сплаву [8]. Якісну оцінку залежності міцності монокристалів від орієнтації кристала також може представляти розподіл фактору Шміда (Shmid) в різних октаедраїчних системах стереографічного трикутника [9].

На сьогоднішній день присутня можливість створення прогресивних розрахункових моделей непружного деформування, з використанням методу скінчених елементів. При цьому за допомогою сучасних методів моделювання можна виконувати обчислення із урахуванням особливостей фізично-нелінійних процесів, таких як повзучість, у монокристалічних нікелевих сплавах. Виходячи із недосконалої сучасних підходів та вищевказаних факторів, дуже актуальною задачею на сьогодні є розробка методів розрахунку параметрів довговічності лопаток газових турбін, виготовлених із монокристалічних нікелевих сплавів.

1. Постановка проблеми

Проблематика вивчення впливу властивостей монокристалічних лопаток турбін на їх довготривалу міцність описується у достатній кількості вітчизняних та закордонних публікацій.

Відомі підходи до розрахунку довготривалої міцності монокристалічних лопаток базуються на декількох критеріях:

1. Перший підхід засновано на оцінці працездатності монокристалічної лопатки протягом заданого циклічного ресурсу без утворення в ній тріщин багатоциклової втоми на основі використання коефіцієнта запасу циклічної довговічності [10].

2. Другий підхід засновано на використанні деформаційного критерію руйнування монокристалічного сплаву [10].

3. Третій підхід [9], у випадку монокристалічних матеріалів, базується на використанні відношення максимальної довготривалої міцності сплаву при розтягуванні у напрямку $\langle 001 \rangle$ до еквівалентних напружень при повзучості.

Зазначені підходи потребують великої трудомісткості та точності проведення розрахунків, а також наявності та обробки великої кількості експериментальних даних.

На практиці, багато авторів сьогодення вже підіймали питання дослідження довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбін. Зокрема, існує достатньо публікацій [9, 11-17], де зазначаються різноманітні підходи до оцінки довговічності, які базуються як на фундаментальних знаннях, так і на власних підходах авторських колективів. Колектив авторів у дослідженні [9] представив методологічні засади підходу до вирішення задачі скінчено-елементного визначення тривалої статичної міцності охолоджуваних монокристалічних лопаток газотурбінних двигунів. Дослідниками проведено аналіз розподілу факторів Шміда в сферичному трикутнику для первинних і вторинних кубічних, а також октаедральних систем ковзання. Наведено процедуру визначення коефіцієнтів анізотропії довготривалої міцності на основі даних розрахунків для різних орієнтацій монокристалу. Проведено порівняльний аналіз результатів скінчено-елементних розрахунків з використанням мікрOMEХАНІЧНОЇ (кристалографічної) та феноменологічної моделей повзучості та тривалої статичної міцності охолоджуваних монокристалічних лопаток газотурбінного двигуна.

Автори публікації [12] присвятили матеріал вивченню накопичення деформацій і вплив цього явища на термін служби монокристала. У наведених відомостях дослідниками розроблено аналітичний метод, що враховує пошкоджуваність від пластичної, циклічної деформацій та деформації, спричиненої повзучістю. Зазначений метод пройшов експериментальне підтвердження випробуванням у вакуумі монокристалічних зразків різної просторової орієнтації, а також зразків з нанесеними попередньо концентраторами напружень. Дослідниками запропоновано новий експериментально-розрахунковий метод з використанням критеріїв руйнування-деформації для оцінки довготривалої міцності монокристала.

У дослідженні [13] авторський колектив займався вивченням механізмів руйнування монокристалів на прикладі спеціальних зразків і з'ясував, що при середніх і низьких температурах таке руйнування характеризується ковзанням по певним площинах.

нам з певною пластичною деформацією. Час до руйнування при випробуваннях на повзучість зразків із монокристалічних сплавів описується для широкого діапазону температурного навантаження. Автори також врахували зміни механізму повзучості з підвищенням температури.

Дослідники у публікації [14] розмістили відомості про характеристики повзучості, довготривалої міцності та малоциклової втомної міцності монокристалічного нікелевого сплаву DZ125. Ці характеристики проаналізовано за допомогою модифікованої уніфікованої моделі в'язкопластичності Шабоса (Chaboche). Зазначена модель враховує анізотропну поведінку матеріалу, ефект циклічного зміцнення та релаксацію напружень. При заданні параметрів матеріалу використовувалася процедура оптимізації Левенберга–Марквардта (Levenberg-Markvardt), яка враховує властивості заданого матеріалу при розтягуванні, його циклічну поведінку та характеристики повзучості. Модель була побудована у програмі FORTRAN та інтегрована в програмне забезпечення скінчено-елементного аналізу UMAT/ABAQUS. Колектив авторів у статті [15] запропонував процедуру структурного аналізу для дослідження довготривалої міцності охолоджуваних лопаток газових турбін.

У публікації [16] науковці навели відомості про феноменологічну модель пластичності монокристалічного сплаву на основі використання «еквівалентного» напрямку, у якому розглядається відносна орієнтація між головними напруженнями та осями монокристалів. Для вивчення впливу кристалографічної орієнтації на механічні характеристики монокристалічного матеріалу описано проведення серії випробувань при різних напруженнях та температурах в умовах тривалого та короткочасного навантаження. Стаття також містить приклад використання розробленого авторами методу розрахунку, в застосуванні до лопатки турбіни, в програмному комплексі скінчено-елементного аналізу CalculiX. Дослідники у статті [17] приводять висновки аналізу наявних опублікованих відомостей про результати і технічні особливості проведення термомеханічних випробувань жароміцних нікелевих сплавів.

У даному дослідженні пропонується методика оцінки довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбін на прикладі скінчено-елементної 3D-моделі охолоджуваної лопатки турбіни, виготовленої з нікелевого жароміцного сплаву.

2. Вибір вихідних даних для дослідження довговічності монокристалічних лопаток турбін

Експериментальні дані довготривалої міцності зразків із монокристалічних матеріалів характери-

зуються неповнотою інформації для широкого спектру температур та часу знаходження під навантаженням, а також значним розсіюванням своїх значень. Одним із найкращих варіантів демонстрації та упорядкування даних таких досліджень є використання температурно-часових залежностей у формі параметру Ларсона-Міллера (Larson-Miller), який представляється наступним виразом:

$$P_{LM} = T(\log \tau_{fail} + 20), \quad (1)$$

де $\log \tau_{fail}$ – час до руйнування зразку, год;

T – температура матеріалу, К.

Для проведення оцінки довготривалої міцності лопаток турбін були підібрані експериментальні криві параметру Ларсона-Міллера для різних орієнтацій монокристала. На рис. 1 показана експериментальна крива параметру Ларсона-Міллера (Larson-Miller) для типового монокристалічного сплаву четвертого покоління з кристалографічною орієнтацією (КГО) <001> [9]. На рис. 1 також показані параметри точок, які були обрані для подальших розрахунків, мова про які буде вестися далі у тексті цієї публікації. Для подальшого чисельного моделювання довготривалої міцності лопаток необхідно визначити рівняння експериментальної кривої параметру Ларсона-Міллера.

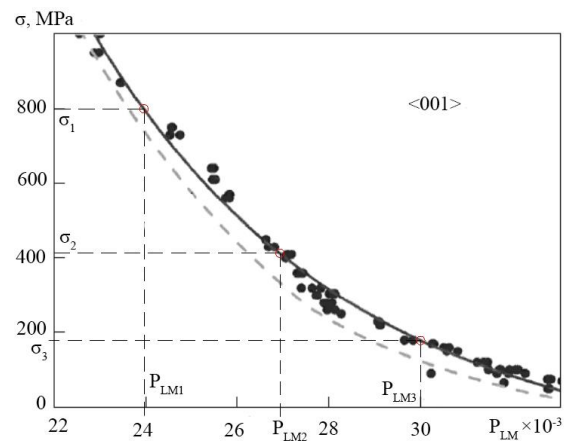


Рис. 1. Крива параметру Ларсона-Міллера для кристалографічної орієнтації монокристалічного сплаву <001>

Для отримання рівняння експериментальної кривої проведено її апроксимацію методом параболічної інтерполяції. Для цього, спочатку, на графіку обрано три довільні точки, які в подальшому було використано для проведення обчислень. Координати цих точок на графіку вказують на конкретні напруження та відповідні до них значення параметрів

Ларсона-Міллера. В даному випадку були отримані наступні параметри зазначених точок:

- координати точки № 1 на графіку:
 $\sigma_1 = 800$ МПа; $P_{LM1} = 23995$;
- координати точки № 2 на графіку:
 $\sigma_2 = 413$ МПа; $P_{LM2} = 26980$;
- координати точки № 3 на графіку:
 $\sigma_3 = 179$ МПа; $P_{LM3} = 30000$.

Параболічне рівняння, яке описує криву Ларсона-Міллера на рис. 1, в загальному вигляді приймає наступне значення:

$$P_{LM} = C_1 \sigma^2 + C_2 \sigma + C_3 \quad (2)$$

де C_1, C_2, C_3 – невідомі константи;

Для проведення апроксимації була складена система рівнянь із трьома невідомими характеристиками, яка має вигляд наступним чином:

$$\begin{cases} P_{LM1} = C_1 \sigma_1^2 + C_2 \sigma_1 + C_3 \\ P_{LM2} = C_1 \sigma_2^2 + C_2 \sigma_2 + C_3 \\ P_{LM3} = C_1 \sigma_3^2 + C_2 \sigma_3 + C_3 \end{cases} \quad (3)$$

При наявності координат трьох обраних на рис. 1 точок, система рівнянь (3) з трьома невідомими константами C_1, C_2, C_3 була розв'язана з використанням формул Крамера (Kramer) [18].

В результаті проведення обчислень за формулами Крамера було отримано параболічне рівняння параметру Ларсона-Міллера для КГО монокристалів <001>, яке виглядає наступним чином:

$$P_{LM} = 8,362 \cdot 10^{-6} \sigma^2 - 0,017856 \sigma + 32,928349 \quad (4)$$

Додатково, отримане за допомогою параболічної інтерполяції рівняння параметру Ларсона-Міллера зображено графічно на рис. 2.

Аналогічна за послідовністю процедура, як описано вище, була проведена також і для кривих параметра Ларсона-Міллера для двох інших КГО матеріалів, приведених у джерелі [9].

Нижче наведені параметри точок, обраних для розрахунку рівняння параметра Ларсона-Міллера для КГО монокристалів <011>:

- координати точки № 1 на графіку:
 $\sigma_1 = 400$ МПа; $P_{LM1} = 25950$;
- координати точки № 2 на графіку:
 $\sigma_2 = 259$ МПа; $P_{LM2} = 28150$;
- координати точки № 3 на графіку:
 $\sigma_3 = 168$ МПа; $P_{LM3} = 30000$.

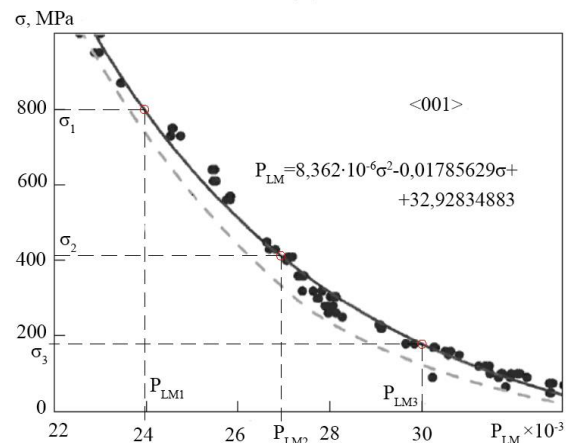


Рис. 2. Крива параметру Ларсона-Міллера та її параболічне рівняння для кристаліграфічної орієнтації монокристалів <001>

Зазначені точки зображено на рис. 3, де представлена крива Ларсона-Міллера для КГО монокристалічного сплаву <011>.

В результаті вирішення системи рівнянь (3) з трьома невідомими характеристиками, було отримано параболічне рівняння параметру Ларсона-Міллера для КГО монокристалічного сплаву <011>, яке має наступний вигляд:

$$P_{LM} = 2,03743 \cdot 10^{-5} \sigma^2 - 0,02902949 \sigma + 34,30191038 \quad (5)$$

На рис. 3 приведена експериментальна крива параметру Ларсона-Міллера, з координатами обраних точок для розрахунків, для типового монокристалічного сплаву четвертого покоління з КГО <011>.

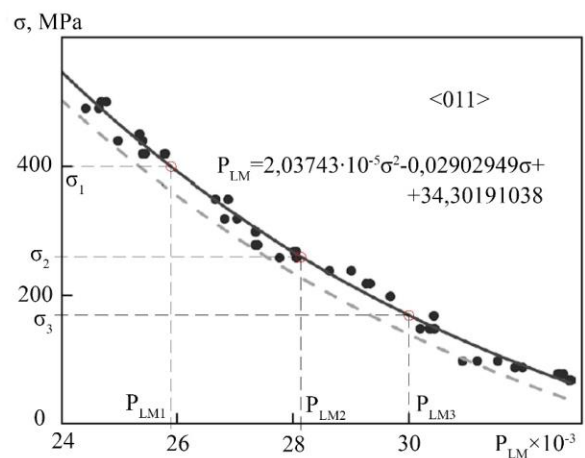


Рис. 3. Крива параметру Ларсона-Міллера та її параболічне рівняння для кристаліграфічної орієнтації монокристалів <011>

Далі приведені параметри точок, які було обрано для обчислення рівняння параметра Ларсона-Міллера для КГО монокристалічного сплаву $\langle 111 \rangle$. Зазначені точки мають наступні значення:

- координати першої точки на графіку:
 $\sigma_1 = 800 \text{ МПа}$; $P_{LM1} = 24135$;
- координати другої точки на графіку:
 $\sigma_2 = 457 \text{ МПа}$; $P_{LM2} = 27094$;
- координати третьої точки на графіку:
 $\sigma_3 = 214 \text{ МПа}$; $P_{LM3} = 30000$.

Обрані для проведення обчислень точки зображено на рис. 4, де представлена крива Ларсона-Міллера для КГО монокристалічного сплаву $\langle 011 \rangle$.

Внаслідок вирішення системи рівнянь (3) з трьома невідомими характеристиками за допомогою формул Крамера, отримуємо також і параболічне рівняння параметру Ларсона-Міллера для КГО монокристалічного сплаву $\langle 111 \rangle$. Отримане рівняння має наступний вигляд:

$$P_{LM} = 5,68605 \cdot 10^{-6} \sigma^2 - 0,01577419 \sigma + 33,11527778 \quad (6)$$

На рис. 4 приведена експериментальна крива параметру Ларсона-Міллера, з координатами обраних точок для розрахунків, для типового монокристалічного сплаву четвертого покоління з КГО $\langle 011 \rangle$.

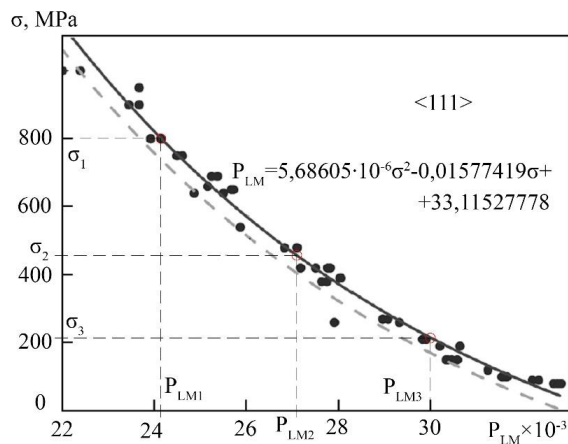


Рис. 4. Крива параметру Ларсона-Міллера та її параболічне рівняння для кристалічної орієнтації монокристала $\langle 011 \rangle$

Таким чином, можна зазначити, що методологія дослідження впливу анізотропних характеристик монокристалічних турбінних лопаток на показники їх довговічності складається з наступних основних елементів, а саме:

- процедури апроксимації кривих Ларсона-Міллера для різних орієнтацій жароміцного нікелевого монокристалічного сплаву;
- вибір лопатки турбіни для проведення обчислень, а також створення твердотільної та скінчено-елементної моделі цієї лопатки для проведення обчислень;
- розрахунок повзучості лопатки турбіни згідно обраного закону повзучості;
- моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера по об'єму монокристалічної лопатки турбіни;
- обчислення та порівняння часу до руйнування лопатки турбіни з різними КГО та при різних температурах.

Загальний вигляд методології описаного у цій публікації дослідження представлено на рис. 5.

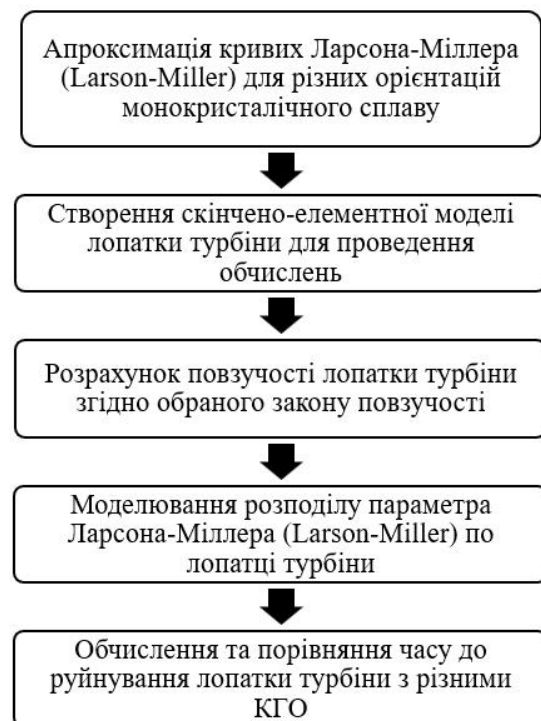


Рис. 5. Схематичне зображення методології дослідження впливу анізотропії монокристалічних лопаток турбін на їх довговічність

3. Скінчено-елементне моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера по лопатці турбіни

В результаті проведення апроксимації експериментальних кривих були отримані рівняння параметра Ларсона-Міллера для КГО монокристалу $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ та $\langle 111 \rangle$. Рівняння (4), (5) та (6) для різної монокристалічної КГО були використані при скінчено-елементному моделюванні розподілу параметра Ларсона-Міллера по об'єму лопатки турбіни.

Розрахунки проводилися у програмному комплексі ANSYS Workbench 19.2. В основу моделювання покладена твердотільна 3D-модель охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску турбовального авіаційного двигуна. Безпосередньо, модель, методологія отримання пружних характеристик матеріалу (модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та модуля зсуву) для різних температур, а також метод та параметри побудови скінчено-елементної моделі описано у публікаціях [19, 20].

Основою для проведення моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера по об'єму лопатки турбіни виступав розрахунок повзучості за законом Нортон. Модель повзучості монокристалічного сплаву, методологія отримання констант повзучості та вибір закону повзучості змістовно подано у публікаціях [21, 22]. У публікації [23] описано процес проведення моделювання повзучості, а саме: граничні умови, застосовані до лопатки турбіни; навантаження від відцентрових сил та температури; задання часу дії повзучості.

Як видно з рівнянь (4), (5) та (6) параметра Ларсона-Міллера, одним із їх компонентів є напруження. В нашому випадку, в якості напружень для вищенаведених рівнянь виступають еквівалентні напруження при розрахунку повзучості.

На рис. 6 зображено результати розрахунку розподілу еквівалентних напружень на стадії стаціонарної повзучості при часу дії повзучості 20000 секунд (~5,55 годин). Моделювання проведено для навантаження від дії відцентрової сили. Обчислення проведено у модулі Static Structural.

Для моделювання розподілу параметру Ларсона-Міллера по лопатці турбіни було використано інструмент для виводу результатів, які визначає користувач (User Defined Results). Це один із інстру-

ментів розділу результатів (Solutions) у програмі ANSYS Workbench, який дає можливість розраховувати параметри, які задає користувач, на базі попередньо проведених обчислень. Інструмент User Defined Results має графі виразів (Expression) та ідентифікаторів (Identifier). Ці графі використовувалися при проведенні моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера по лопатці турбіни.

Отримані за допомогою параболічної інтерполяції рівняння для різних КГО монокристалічного сплаву, які описано у пункті 2, по чергово вводилися у інструменті User Defined Results, а саме у графі виразів (Expression). В якості напружень σ з рівнянь (4), (5) та (6), виступають еквівалентні напруження, отримані при попередньому розрахунку повзучості та зображені на рис. 6. Еквівалентні напруження при обчисленнях у ANSYS автоматично отримують свій ідентифікатор, який для них виглядає як «seqv». При введенні формулювань рівнянь параметра Ларсона-Міллера для різних КГО монокристала у графі виразу (Expression) інструмента User Defined Results в якості напруження вказувався ідентифікатор «seqv».

У графі Identifier задавалися ідентифікатори, які відповідають кожному з рівнянь (4), (5) та (6). Для рівняння (4), яке відповідає параметру Ларсона-Міллера для орієнтації монокристала <001>, значення ідентифікатора було задано у вигляді «p_lm_blade<001>». Для рівняння (5), яке відповідає параметру Ларсона-Міллера для орієнтації кристала <011>, значення ідентифікатора було прийнято у вигляді «p_lm_blade<011>». Для рівняння (6), яке містить у собі параметр Ларсона-Міллера для кристалографічної орієнтації монокристалічного сплаву <111>, ідентифікатор прийняв значення, яке виглядає як «p_lm_blade<111>».

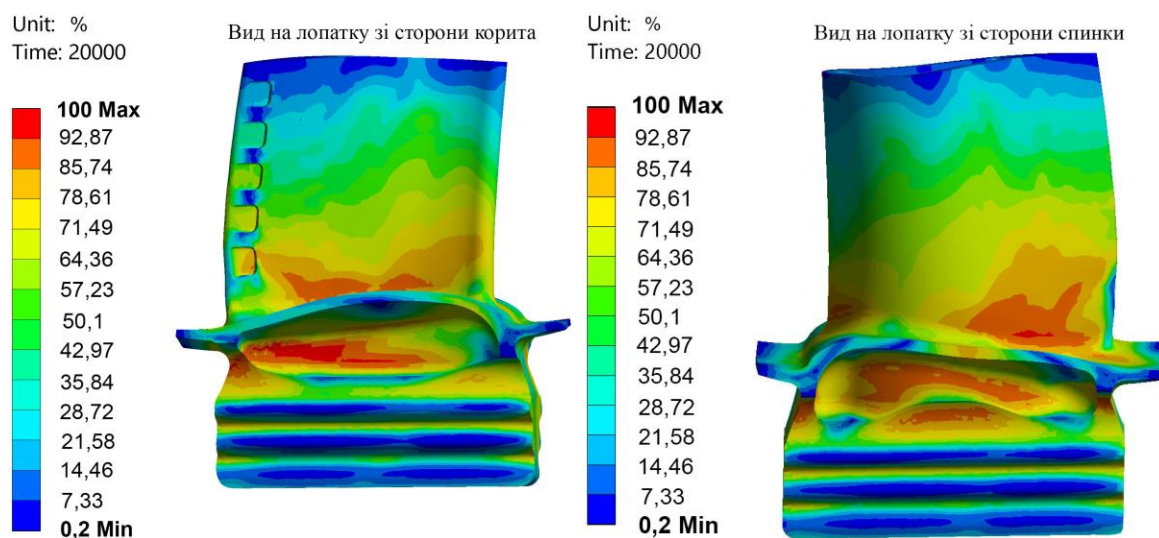


Рис. 6. Еквівалентні напруження на лопатці при розрахунку повзучості

Таким чином, при призначенні ідентифікаторів, до них автоматично прикріплюються результати відповідних розрахунків інструмента User Defined Results. Всі зазначені ідентифікатори, асоційовані із розподілами параметра Ларсона-Міллера по об'єму лопатки турбіни з різними КГО кристала, потрібні для проведення подальших порівняльних калькуляцій часу до руйнування лопатки турбіни з різними КГО кристалу та при різних температурних впливах.

У таблиці 1 представлено результати обчислень розподілу параметру Ларсона-Міллера для КГО монокристалу <001>, <011> та <111> відповідно.

З результатів розрахунків розподілу параметра Ларсона-Міллера по лопатці турбіни з різними КГО,

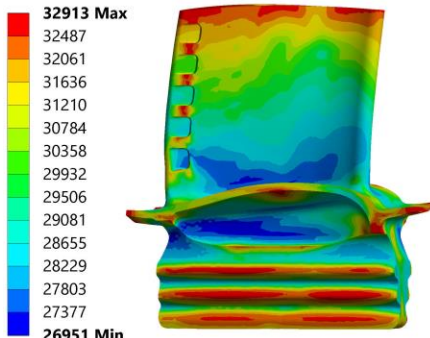
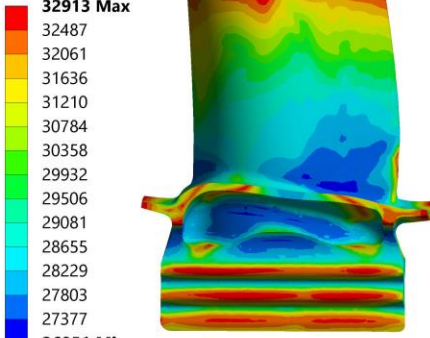
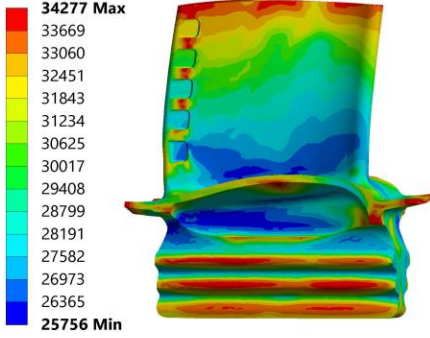
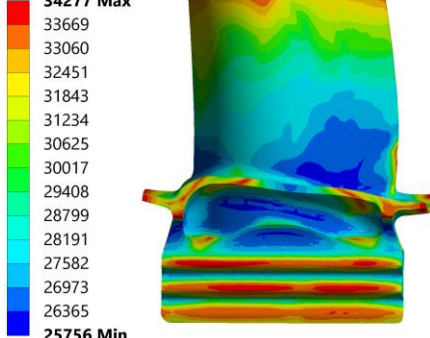
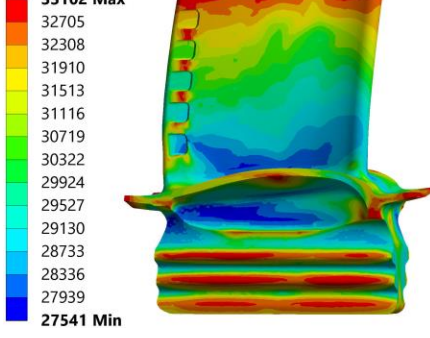
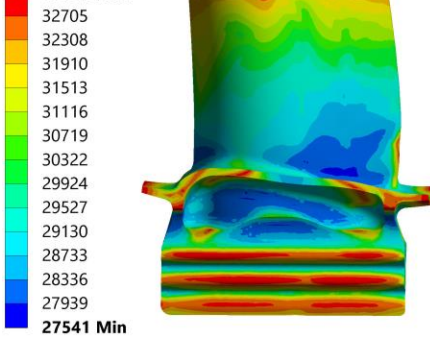
позначених у таблиці 1, видно, що найнижче значення P_{LM} , яке дорівнює 25756, відповідає лопаткам з орієнтацією кристала <011>. Найбільший мінімальний показник розподілу P_{LM} , із значенням 27541, мають лопатки з КГО <111>.

4. Порівняльний аналіз довговічності лопаток турбін з різними КГО

Після проведення обчислень для з'ясування розподілу параметра Ларсона-Міллера по лопатці турбіни, можна переходити до оцінки часу до руйнування (time-to-failure) лопатки. При оцінці довготри-

Таблиця 1

Розподіл параметру Ларсона-Міллера (P_{LM}) по лопатці з різними орієнтаціями кристалу

Кристаліграфічна орієнтація моно-кристалу	Розподіл P_{LM} по лопатці турбіни	
	Вид зі сторони корита	Вид зі сторони спинки
<001>		
<011>		
<111>		

валої міцності монокристалічних лопаток турбін безпосередній показник параметру часу до руйнування має найбільш вагоме практичне значення. З рівняння (1) температурно-часової залежності параметру Ларсона-Міллера отримуємо співвідношення, яке дозволяє обчислити час до руйнування. Таке рівняння представляється у наступному вигляді:

$$\tau_{fail} = 10^{\left(\frac{P_{LM}}{T} - 20\right)} \quad (7)$$

Співвідношення (7) почергово вводилося у інструменті User Defined Results, а саме у графі виразів (Expression). Процедура введення рівнянь подібна до тої, яка була реалізована при розрахунку розподілу параметра Ларсона-Міллера по лопатці турбіни. В якості P_{LM} з рівняння (7), виступали обчислені раніше значення для різних КГО монокристалу. Як зазначалося раніше значенням розподілу P_{LM} з різними орієнтаціями кристалу призначалися ідентифікатори (Identifier). Зазначені ідентифікатори («p_lm_blade<001>» для орієнтації кристала <001>; «p_lm_blade<011>» для орієнтації кристала <011>; «p_lm_blade<111>» для орієнтації кристала <111>) почергово вводилися при записі співвідношення (7) у графі виразу (Expression), після чого проводився розрахунок. Отримання розподілу параметра Ларсона-Міллера по об'єму лопатки турбіни дозволяє проводити обчислення часу до руйнування для різних температур. Для проведення розрахунків довготривалої міцності були обрані два температурних стани лопатки, а саме $T = \text{const} = 975^\circ\text{C}$ та $T = \text{const} = 900^\circ\text{C}$. При цьому, при температурі 975°C пружні властивості нікелевого сплаву знижуються в порівнянні з властивостями при температурі 900°C .

У таблиці 2 приведені результати обчислення часу до руйнування для різних КГО повнорозмірної монокристалічної лопатки турбіни при двох температурних режимах.

Як видно з результатів проведеного чисельного моделювання, довготривала міцність монокристалічних лопаток турбіни з різними орієнтаціями кристала при $T = \text{const} = 975^\circ\text{C}$ дорівнює:

- для КГО монокристала <001>, час до руйнування $\tau_{fail} = 39,417$ годин;
- для КГО монокристала <011>, час до руйнування $\tau_{fail} = 4,3447$ годин;
- для КГО монокристала <111>, час до руйнування $\tau_{fail} = 117,08$ годин.

Аналізуючи результати проведеного чисельного моделювання, можна зазначити, що довготривала міцність монокристалічних лопаток турбіни з різ-

ними орієнтаціями кристала при постійній температурі $T = \text{const} = 900^\circ\text{C}$ дорівнює:

- для КГО монокристала <001>, час до руйнування $\tau_{fail} = 947,28$ годин;
- для КГО монокристала <011>, час до руйнування $\tau_{fail} = 90,683$ годин;
- для КГО монокристала <111>, час до руйнування $\tau_{fail} = 3016,5$ годин.

Тобто, з отриманих результатів обчислень видно, що найменший час до руйнування, як і у випадку $T = \text{const} = 975^\circ\text{C}$, показали лопатки, відлиті з орієнтацією кристала <011>. При цьому так само, як для випадку більшої температури по лопатці 975°C , найбільший показник довготривалої міцності демонструють лопатки з КГО <111>.

Для випадку $T = \text{const} = 900^\circ\text{C}$ можна спостерігати значне підвищення довготривалої міцності порівняно з результатами, отриманими для температури $T = \text{const} = 975^\circ\text{C}$, а саме:

- для орієнтації кристала <001>, зростання часу до руйнування (τ_{fail}) склало 907,863 години;
- для орієнтації кристала <011>, зростання часу до руйнування (τ_{fail}) склало 86,3383 години;
- для орієнтації кристала <111>, зростання часу до руйнування (τ_{fail}) склало 2899,42 години.

Висновки

У статті описано метод, який був розроблений для обчислення довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбіни, які знаходяться під навантаженням від відцентрових сил. Зазначений метод дозволяє враховувати анізотропію властивостей довготривалої міцності у розрахунках, які базуються на обмеженій кількості експериментальних даних.

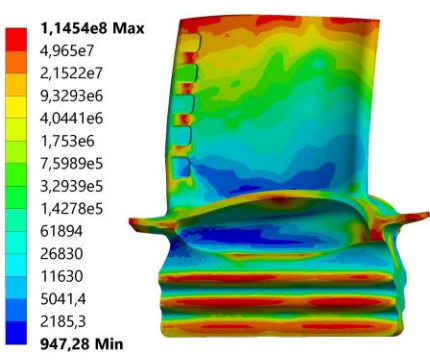
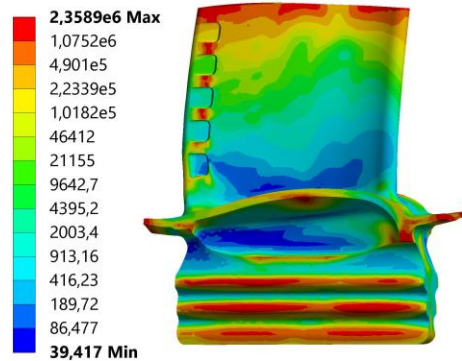
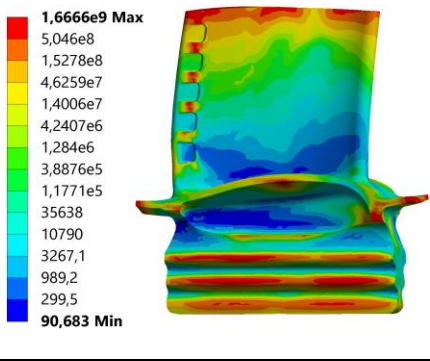
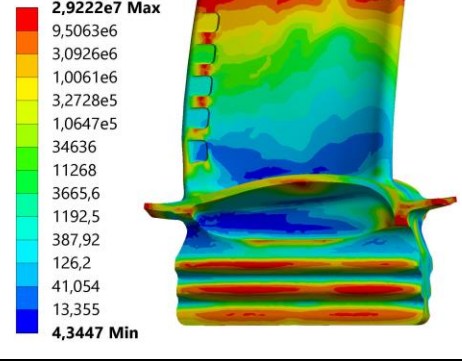
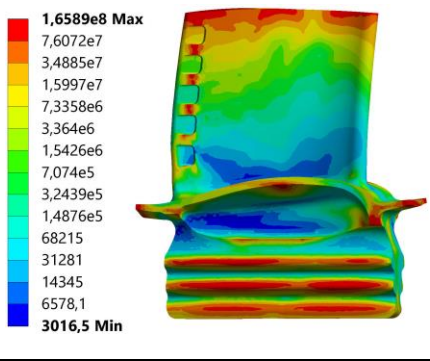
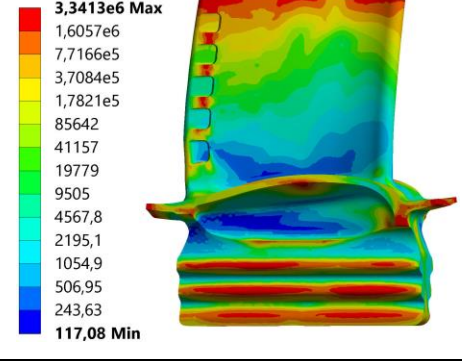
Використання скінчено-елементного моделювання дозволило отримати деталізовану картину розподілу напружень в охолоджуваній монокристалічній лопатці складної геометричної структури.

З використанням літературних експериментальних даних довготривалої міцності, було проведено моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера на прикладі скінчено-елементної моделі охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску турбовального авіаційного двигуна. Таке дослідження проводилося з урахуванням перерозподілу напружень при повзучості. З отриманих результатів обчислень видно, що найменший показник параметра Ларсона-Міллера, який дорівнює 25756, зафіксовано для лопатки з орієнтацією кристалу <011>.

На базі розрахунків розподілу параметра Ларсона-Міллера виконано оцінку часу до руйнування лопатки, виготовленої з монокристалічного жаромі-

Таблиця 2

Час до руйнування монокристалічної лопатки турбіни з різними КГО та температурами

Кристалграфічна орієнтація моно-кристалу	Результат розрахунку часу до руйнування	
	Для $T = \text{const} = 900^{\circ}\text{C}$	Для $T = \text{const} = 975^{\circ}\text{C}$
$\langle 001 \rangle$		
$\langle 011 \rangle$		
$\langle 111 \rangle$		

цного нікелевого сплаву з різними кристалграфічними орієнтаціями та при різних температурах. Спираючись на результати обчислень, можна підкреслити важливість врахування кристалграфічних орієнтацій сплаву при обчисленні довготривалої міцності лопаток турбін. Аналіз орієнтаційної залежності часу до руйнування дозволив зробити висновок, що для охолоджуваних лопаток турбін орієнтація монокристала $\langle 111 \rangle$ є найбільш переважною. Значення часу до руйнування для кристалграфічної орієнтації $\langle 111 \rangle$ при постійній температурі на лопатці 975°C дорівнює 117,08 годин, а для постійної температури 900°C – 3016,5 годин. Найменший показник довготривалої міцності, по результатам моделювання, мають лопатки з орієнтацією $\langle 011 \rangle$.

При цьому, для температури 975°C значення часу до руйнування складає 4,3447 години, а при температурі 900°C – 90,683 годин.

Практична імплементація розробленого методу потребує подальшого систематичного накопичення експериментальних даних довготривалої міцності монокристалічних сплавів у широкому діапазоні температурних навантажень.

Внесок авторів: формулювання проблеми – Є.О. Неманежин, Г.І. Львов, Ю.І. Торба; огляд та аналіз інформаційних джерел – Є.О. Неманежин; вибір вихідних даних для проведення дослідження – Є.О. Неманежин, Г.І. Львов; розробка методики дослідження – Є.О. Неманежин, Г.І. Львов; прове-

дення чисельного експерименту – Є.О. Неманежин; аналіз результатів дослідження та формулювання висновків – Є.О. Неманежин, Г.І. Львов, Ю.І. Торба.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Semenov, A. S. Thermal fatigue fracture criteria of single crystal heat-resistant alloys and methods for identification of their parameters [Text] / A. S. Semenov, & L. B. Getsov // *Strength of materials*. – 2014. – Vol. 46. – P. 38-48. DOI: 10.1007/s11223-014-9513-2.
2. Cailletaud, G. A micromechanical approach to inelastic behavior of metals [Text] / G. Cailletaud // *International journal of plasticity*. – 1992. – Vol. 8, № 1. – P. 55-73. DOI: 10.1016/0749-6419(92)90038-E.
3. Busso, E. P. Gradient-dependent deformation of two-phase single crystals [Text] / E. P. Busso, F. T. Meissonnier, & N. P. O'Dowd // *Journal of mechanics and physics of solids*. – 2000. – Vol. 48 № 11. – P. 2333-2361. DOI: 10.1016/S0022-5096(00)00006-5.
4. Nouailhas, D. A viscoplastic theory for anisotropic materials [Text] / D. Nouailhas, & A. D. Freed // *Journal of engineering materials and technology – transactions of the ASME*. – 1992. – Vol. 114. – P. 97-104. DOI: 10.1115/1.2904149.
5. Non-linear mechanics of materials [Text] / J. Besson, G. Cailletaud, J.-L. Chaboche, & S. Forest // Springer, Verlag, Dordrecht. – 2010. – № 1. – Article No. 433. DOI: 10.1007/978-90-481-3356-7.
6. Computational analysis of a gas turbine blade with different materials [Text] / H. P. Singh, A. Rawat, A. R. Manral, & P. Kumar // *Materials today: proceedings*. – 2020. – vol. 44, iss. 2. – P. 1-7. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.486.
7. Choi, S. H. Viscoplasticity theory based on overstress applied to the modeling of cubic single crystals [Text] / S. H. Choi, & E. Krempl // *European journal of mechanics A-solids*. – 1989. – Vol. 8. – P. 219-233.
8. Grishchenko, A. I. Modeling inelastic deformation of single crystal superalloys with account of γ/γ' phases evolution [Text] / A. I. Grishchenko, A. S. Semenov, & L. B. Getsov // *Materials physics and mechanics*. – 2015. – Vol. 24, iss. 4. – P. 325-330.
9. Long-term strength determination for cooled blades made of monocrystalline superalloys [Text] / L. B. Getsov, A. S. Semenov, V. A. Besschetnov [et al] // *Thermal engineering*. – 2017. – Vol. 64. – P. 280-287. DOI: 10.1134/S0040601517040048.
10. Vibration problems of foundations, seismic resistance and strength of turbomachinery. Part 2 [Text] / Yu. S. Vorobiov, L. B. Getsov, B. E. Melnikov, & A. S. Semenov // *Nauchno-technicheskie vedomosti SPGPU*. – 2013. – Vol. 4, iss. 1. – P. 302-319.
11. Reliability-based low-cycle fatigue damage analysis for turbine blade with thermo-structural interaction [Text] / H. F. Gao, C. W. Fei, G. C. Bai, & L. Ding // *Aerospace science and technology*. – 2016. – Vol. 49. – P. 289-300. DOI: 10.1016/j.ast.2015.12.017.
12. Getsov, L. A failure criterion for single-crystal superalloys during thermocyclic loading [Text] / L. Getsov, A. Semenov, & A. Staroselsky // *Materials and technology*. – 2008. – Vol. 42, iss. 1. – P. 3-12.
13. Microstructure and mechanical properties of a new nickel based single crystal superalloy [Text] / Z. Shang, X. Wei, D. Song [et al.] // *Journal of materials research and technology*. – 2020. – Vol. 9, iss. 5. – P. 11641-11649. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.08.032.
14. Haq, A. U. Isothermal fatigue and creep-fatigue interaction behavior of nickel-base directionally solidified superalloy [Text] / A. U. Haq, X. G. Yang, & D. Q. Shi // *Strength of materials*. – 2018. – Vol. 50. – P. 98-106. DOI: 10.1007/s11223-018-9947-z.
15. Numerical investigation of crack initiation in high-pressure gas turbine blade subjected to thermal-fluid-mechanical low-cycle fatigue [Text] / D.-T. Vo, T.-D. Mai, B. Kim [et al.] // *International journal of heat and mass transfer*. – 2023. – Vol. 202. – Article no. 092017. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123748.
16. Vasilyev, B. Numerical method of single-crystal turbine blade static strength estimation taking into account plasticity and creep effects [Text] / B. Vasilyev, & A. Selivanov // *Materials physics and mechanics*.

ics. – 2019. – Vol. 42, № 3. – P. 311-322. DOI: 42.311-322.10.18720/MPM.4232019_6.

17. Експериментальна оцінка кристалографічної анізотропії термічної втоми монокристалів сплаву на основі Ni_3Al для високотемпературних деталей АГТД [Текст] / Є. Р. Голубовський, Н. Г. Бичков, А. Ш. Хамідуллін, & О. А. Базилева // Вісник двигунобудування. – 2011. – № 2. – С. 244-248.

18. Habgood, K. Revisiting Kramer's rule for solving dense linear systems [Text] / K. Habgood, & I. Arel // SpringSim 2010. Proceedings of the 2010 spring simulation multiconference. – 2010. – № 82. – P. 1-8. DOI:10.1145/1878537.1878623.

19. Nemaneyzhyn, Ye. Numerical simulation of the natural frequencies dependence of turbine blade vibrations on single-crystal anisotropy [Text] / Ye. Nemaneyzhyn, G. Lvov, & Yu. Torba // InterPartner 2023, Advanced Manufacturing Processes V, LNME, Springer, Cham. – 2023. – P. 485-497. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_45.

20. Неманежин, Є. О. Методика оцінки залежності власних частот коливань лопаток газових турбін від анізотропії монокристалу [Текст] / Є. О. Неманежин, Г. І. Львов, & Ю. І. Торба // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2023. – № 4 спецвипуск 2(190). – С. 50-58. DOI: 10.32620/aktt.2023.4sup2.06

21. Nemaneyzhyn, Ye. Numerical simulation of the steady creep of single-crystal alloys [Text] / Ye. Nemaneyzhyn, G. Lvov, Yu. Torba // ICTM 2022, LNNS, Springer, Cham. – 2023. – Vol. 657. – P. 421-429. DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_36.

22. Неманежин, Є. О. Методика визначення характеристик сталої повзучості монокристалічного сплаву [Текст] / Є. О. Неманежин, Г. І. Львов, & Ю. І. Торба // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 4 спецвипуск 2(182). – С. 42-49. DOI: 10.32620/aktt.2022.4sup2.07.

23. Неманежин, Є. О. Чисельне моделювання повзучості лопатки турбіни з монокристалічного сплаву [Текст] / Є. О. Неманежин, Г. І. Львов, & Ю. І. Торба // Вісник ХПІ. Серія: Динаміка та міцність машин. – 2023. – № 2. – С. 88-94. DOI: 10.20998/2078-9130.2023.2.276861.

References

1. Semenov, A. S., & Getsov, L. B. Thermal fatigue fracture criteria of single crystal heat-resistant alloys and methods for identification of their parameters. *Strength of materials*, 2014, vol. 46, pp. 38-48. DOI: 10.1007/s11223-014-9513-2.

2. Cailletaud, G. A micromechanical approach to inelastic behavior of metals. *International journal of*

plasticity, 1992, vol. 8, no. 1, pp. 55-73. DOI: 10.1016/0749-6419(92)90038-E.

3. Busso, E. P., Meissonnier, F. T., & O'Dowd, N. P. Gradient-dependent deformation of two-phase single crystals. *Journal of mechanics and physics of solids*, 2000, vol. 48, no. 11, pp. 2333-2361. DOI: 10.1016/S0022-5096(00)00006-5.

4. Nouailhas, D., & Freed, A. D. A viscoplastic theory for anisotropic materials. *Journal of engineering materials and technology – transactions of the ASME*, 1992, vol. 114, pp. 97-104. DOI: 10.1115/1.2904149.

5. Besson, J., Cailletaud, G., Chaboche, J.-L., & Forest, S. Non-linear mechanics of materials. *Springer. Verlag. Dordrecht*, 2010, no. 1, article no. 433 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3356-7.

6. Singh, H. P., Rawat, A., Manral, A. R., & Kumar, P. Computational analysis of a gas turbine blade with different materials. *Materials today: proceedings*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.486.

7. Choi, S. H., & Krempl, E. Viscoplasticity theory based on overstress applied to the modeling of cubic single crystals. *European journal of mechanics A-solids*, 1989, vol. 8, pp. 219-233.

8. Grishchenko, A. I., Semenov, A. S., & Getsov, L. B. Modeling inelastic deformation of single crystal superalloys with account of γ/γ' phases evolution. *Materials physics and mechanics*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 325-330.

9. Getsov, L. B., Semenov, A. S., Besschetnov, V. A., et al. Long-term strength determination for cooled blades made of monocrystalline superalloys, *Thermal engineering*, 2017, vol. 64, pp. 280-287. DOI: 10.1134/S0040601517040048.

10. Vorobiov, Yu. S., Getsov, L. B., Melnikov, B. E., & Semenov, A. S. Vibration problems of foundations, seismic resistance and strength of turbomachinery. Part 2, *Nauchno-technicheskie vedomosti SPGPU*, 2013, vol. 4, no. 1, pp. 302-319.

11. Gao, H. F., Fei, C. W., Bai, G. C., & Ding, L. Reliability-based low-cycle fatigue damage analysis for turbine blade with thermo-structural interaction. *Aerospace science and technology*, 2016, vol. 49, pp. 289-300. DOI: 10.1016/j.ast.2015.12.017.

12. Getsov, L., Semenov, A., & Staroselsky, A. A failure criterion for single-crystal superalloys during thermocyclic loading, *Materials and technology*, 2008, vol. 42, no. 1, p. 3-12.

13. Shang, Z., Wei, X., Song, D., Zou, J., Liang, S., Liu, G., Nie, L., & Gong, X. Microstructure and mechanical properties of a new nickel based single crystal superalloy. *Journal of materials research and technology*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 11641-11649. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.08.032.

14. Haq, A. U., Yang, X. G., & Shi, D. Q. Isothermal fatigue and creep-fatigue interaction behavior of nickel-base directionally solidified superalloy. *Strength of materials*, 2018, vol. 50, pp. 98-106. DOI: 10.1007/s11223-018-9947-z.
15. Vo, D.-T., Mai, T.-D., Kim, B., Jung, J.-S., & Ryu, J. Numerical investigation of crack initiation in high-pressure gas turbine blade subjected to thermal-fluid-mechanical low-cycle fatigue. *International journal of heat and mass transfer*, 2023, vol. 202, article no. 092017. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123748.
16. Vasilyev, B., & Selivanov, A. Numerical method of single-crystal turbine blade static strength estimation taking into account plasticity and creep effects. *Materials physics and mechanics*, 2019, vol. 42, no. 3, pp. 311-322. DOI: 42.311-322.10.18720/MPM.4232019_6.
17. Holubovs'kyi, Ye. R., Bychkov, N. H., Khamidullin, A. Sh., & Bazyleva, O. A. *Eksperymental'na otsinka krystalohrafichnoyi anizotropiyi termichnoyi vtomy monokrystaliv splavu na osnovi Ni3Al dlya vysokotemperatu-rnykh detaley AHTD* [Experimental evaluation of crystallographic anisotropy of thermal fatigue of single crystals of Ni₃Al alloy for high-temperature AGTD parts]. *Herald of aeroenginebuilding*, 2011, no. 2, pp. 244-248.
18. Habgood, K., & Arel, I. Revisiting Kramer's rule for solving dense linear systems. *SpringSim 2010. Proceedings of the 2010 spring simulation multiconference*, 2010, no. 82, pp. 1-8. DOI: 10.1145/1878537.1878623.
19. Nemanzhyn, Ye., Lvov, G., & Torba, Yu. Numerical simulation of the natural frequencies dependence of turbine blade vibrations on single-crystal anisotropy. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds). *InterPartner 2023, Advanced Manufacturing Processes V, LNME, Springer, Cham*, 2023, pp. 485-497. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_45.
20. Nemanzhyn, Ye., Lvov, G., & Torba, Yu. *Metody`ka ocinky`zalezhnosti vlasny`x chastot koly`van` lopatok gazovy`xturbin vid anizotropiyi monokry`stalu* [A method for evaluation of the dependence of gas turbine blade vibrations on monocrystalline anisotropy]. *Aviacijno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya - Aerospace technic and technology*, 2023, vol. 4sup2 (190), pp. 50-58. DOI: 10.32620/aktt.2023.4sup2.06.
21. Nemanzhyn, Ye., Lvov, G., & Torba, Yu. Numerical simulation of the steady creep of single-crystal alloys. In: Nechiporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D., (eds). *ICTM 2022, LNNS, Springer, Cham*, 2023, vol. 657, pp. 421-429. DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_36.
22. Nemanzhyn, Ye., Lvov, G., & Torba, Yu. *Metody`ka vy`znachennya xaraktery`sty`k staloyi povzuchosti monokry`stalichnogo splavu* [A method for determining the characteristics of the steady creep of a single crystal alloy]. *Aviacijno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya - Aerospace technic and technology*, 2022, vol. 4sup2 (182), pp. 42-49. DOI: 10.32620/aktt.2022.4sup2.07.
23. Nemanzhyn Ye. O., Lvov H. I., & Torba, Yu. I., *Chysel'ne modelyuvannya povzuchosti lopatky turbiny z monokrystalichnoho splavu* [Numerical modeling of creep of a single-crystal alloy turbine blade]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines*, 2023, no.2, pp. 88-94. DOI: 10.20998/2078-9130.2023.2.276861.

Надійшла до редакції 21.06.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ANISOTROPIC PROPERTIES OF SINGLE-CRYSTAL TURBINE BLADES OF AIRCRAFT TURBOFAN ENGINES ON THEIR LONG-TERM STRENGTH

Yevhen Nemanzhyn, Gennadiy Lvov,
Yuriy Torba

Long-term static strength is one of the most important parameters to be calculated at the life-time design stage of aircraft engine turbine blades. The importance of studying and modeling this parameter is based on many factors. In particular, it should be noted that one of these factors is the peculiarities of the anisotropic characteristics of single-crystal turbine blades made of nickel heat-resistant alloys for a wide temperature and power load range. Another important factor is the different crystallographic orientations of the single crystals. The analysis of the literature has shown that to date, there are no general unified approaches for assessing the long-term strength of single-crystal turbine blades. The main approaches described in scientific literature include micromechanical (physical, crystallographic) and phenomenological models for assessing the durability of structures made of single-crystal heat-resistant nickel alloys. Many proprietary methods have also been developed in the scientific community. The majority of existing approaches, which are described in several literature sources, have many advantages and disadvantages. In this study, we propose a comprehensive approach for calculating and evaluating the long-term strength of single-

crystal gas turbine blades. The proposed algorithm is based on obtaining the equations of the Larson-Miller parameter distribution by approximating the literature experimental data for different crystallographic orientations of turbine blades. The basis for numerical modeling of the distribution of the Larson-Miller parameter over the volume of the turbine blade was the calculation of creep according to Norton's law. The equations of the Larson-Miller parameter for different crystal orientations obtained during the approximation were used in the finite element modeling of its distribution on the example of a cooled high-pressure turbine blade. Calculations were performed using the capabilities of the ANSYS Workbench software package. Based on the computation results, the time-to-failure was modeled for different crystallographic orientations and temperature states of the blade.

Keywords: finite-element modeling; anisotropy; single-crystal alloy; crystallographic orientation; creep; long-term strength; Larson-Miller parameter; turbine blades; aircraft engine.

Неманежин Євген Олександрович – асп. каф. «Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; інженер-дослідник ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Львов Геннадій Іванович – д-р техн. наук, проф. каф. «Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії», академік Академії наук вищої школи України, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Торба Юрій Іванович – канд. техн. наук, Заступник директора підприємства з наукової роботи – Начальник Експериментально-випробувального комплексу, ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Yevhen Nemanezhyn – PhD Student of the Department Mathematical Modeling & Intelligent Computing at NTU “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; Research Engineer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: biondestroy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5855-508X, Scopus AuthorID: 58598957200.

Gennadiy Lvov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department Mathematical Modeling & Intelligent Computing, Academician of the Academy of Sciences of the Higher School of Ukraine, NTU “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: Lvovdpm@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0297-9227, Scopus AuthorID: 6506190655.

Yuriy Torba – PhD, Deputy Director of the Enterprise for Scientific Work – Head of the Experimental Research Complex, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049, Scopus AuthorID: 57196032226.