

Є. О. НЕМАНЕЖИН

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ УМОВ РОБОТИ СУЧАСНИХ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН ТА ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЇХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ МІЦНОСТІ

Предметом дослідження є сучасні методи та матеріали для виготовлення лопаток газових турбін, а також підходи та методи оцінки показників їх динамічної та статичної міцності в умовах високотемпературного навантаження. **Першою метою** статті постає опис основних способів виготовлення лопаток турбін, наведення прикладів використовуваних матеріалів та особливостей їх кристалічної структури. **Другою метою** матеріалу є огляд підходів для забезпечення параметрів динамічної та статичної міцності монокристалічних лопаток турбін, зокрема, відстроювання від небезпечних резонансних режимів, дослідження параметрів анізотропної повзучості, високотемпературної втомної довговічності та довготривалої міцності. **Задачею** статті є виділення основних переваг та недоліків існуючих способів, підходів та методів оцінки та забезпечення параметрів високотемпературної міцності лопаток турбін в умовах статичних та динамічних навантажень, з метою обрання цілей подальших досліджень. **Методи**, що використовувалися про створенні публікації: методи аналізу та порівняння, що застосовувалися при пошуку та співставленні відкритих літературних джерел інформації згідно мети статті, а також метод дедукції, що використовувався при виділенні основних недоліків існуючих методів оцінки високотемпературної міцності лопаток газових турбін в умовах статичних та динамічних навантажень для намічання цілей подальших досліджень. Отримано наступні **результати**. Проаналізовані літературні джерела, що стосуються методів виготовлення лопаток турбін, а саме спрямованої кристалізації та монокристалічного лиття. Підкреслені переваги монокристалічних сплавів для виготовлення лопаток турбін, а саме підвищені жароміцність, жаростійкість, втомна міцність, довговічність та тріщиностійкість. Проаналізовані та описані основні сучасні методи оцінки високотемпературної міцності лопаток газових турбін з урахуванням анізотропних характеристик монокристалічних сплавів. **Висновки**. У наведеній публікації представлено відомості про лопатки газових турбін, зокрема, надано змістовну інформацію про методи їх виготовлення, а також матеріали, що використовуються для їх отримання. У дослідженні проаналізовано та визначено основні пошкоджуючі впливи, що діють на лопатки газових турбін в процесі їх експлуатації. У матеріалі зазначені досягнення науковців, які розробили чисельні та експериментальні методи для оцінювання впливу анізотропних характеристик монокристалічних нікелевих жароміцних сплавів на показники втомної міцності, довговічності та повзучості лопаток турбін.

Ключові слова: ресурс, чисельні методи, напружено-деформований стан, термонапружений стан, міцність, відстроювання від небезпечних резонансних режимів, руйнування від повзучості, втомне руйнування, довговічність, математична модель, ортотропія властивостей, лопатки турбіни, авіаційний газотурбінний двигун.

Ye. O. NEMANEZHYN

ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE OPERATING CONDITIONS OF MODERN GAS TURBINE BLADES AND REVIEW OF METHODS FOR DETERMINING THEIR HIGH-TEMPERATURE STRENGTH PARAMETERS

The subject of the study is modern methods and materials for the manufacture of gas turbine blades, as well as approaches and methods for assessing their dynamic and static strength under high-temperature loading. **The first purpose** of the article is to describe the main methods of manufacturing turbine blades, provide examples of the materials used and the features of their crystal structure. **The second purpose** of the article is to review approaches to ensuring the dynamic and static strength parameters of single-crystal turbine blades, in particular, to avoid dangerous resonance modes, to study the parameters of anisotropic creep, high-temperature fatigue life, and long-term strength. **The goal** of the article is to highlight the main advantages and disadvantages of existing methods, approaches and techniques for assessing and ensuring high-temperature strength parameters of turbine blades under static and dynamic loading, in order to select the objectives of further research. **Methods** used to create the publication: methods of analysis and comparison, which were used to search and compare open literature sources of information in accordance with the purpose of the article, as well as the method of deduction, which was used to identify the main shortcomings of existing methods for assessing the high-temperature strength of gas turbine blades under static and dynamic loading to outline the goals of further research. The following **results** have been obtained. Literature sources related to the methods of manufacturing turbine blades, namely, directional crystallization and single-crystal casting, were analyzed. The advantages of single-crystal alloys for the manufacture of turbine blades, namely increased heat strength, heat resistance, fatigue strength, durability and crack resistance, are emphasized. The main modern methods for assessing the high-temperature strength of gas turbine blades with regard to the anisotropic characteristics of single-crystal alloys are analyzed and described. **Conclusions**. This publication presents information about gas turbine blades, in particular, provides meaningful information about the methods of their manufacture, as well as the materials used to produce them. The study analyses and identifies the main damaging effects on gas turbine blades during their operation. The material describes the achievements of scientists who have developed numerical and experimental methods for assessing the impact of the anisotropic characteristics of single-crystal nickel heat-resistant alloys on the fatigue strength, durability and creep of turbine blades.

Keywords: resource, numerical methods, stress-strain state, thermal stress state, strength, detuning from dangerous resonant modes, creep rupture, fatigue rupture, durability, mathematical model, orthotropy of characteristics, turbine blades, aircraft gas turbine engine.

Вступ. Охолоджувані та не охолоджувані лопатки турбіни є одними з найважливіших деталей авіаційних газотурбінних двигунів, які працюють при високих навантаженнях від відцентрових сил і теплових напруженнях від високих температур [1; 2].

На етапі проектування лопаток газових турбін розглядаються та вводяться в їх конструкцію різні системи охолодження, теплозахисні та зносостійкі покриття, демпферні елементи. Також можуть відбуватися зміни у технології виготовлення лопаток турбін, а саме удосконалюються способи лиття,

зміцнюються хвостові частини, закладаються різні ремонтні технології. Всі ці конструктивні та технологічні особливості мають значний вплив на характеристики міцності лопаток газових турбін. На рис. 1 представлена схема створення та доводки типової сучасної охолоджуваної монокристалічної лопатки турбіни.

Розвиток авіаційних двигунів постійно пов'язаний з підвищенням температури паливо-повітряної суміші на вході в турбіну. Як наслідок, робоче середовище лопаток турбін стає все більш жорстким. Факторами,

що обмежують термін служби лопаток турбін є малоциклова втома, тепла втома, повзучість/втомні напруження, тепла корозія, ерозія та інше. Зокрема, комбінація малоциклової та теплової втоми, повзучості може призвести до термомеханічної втоми, яка є одною з головних причин виходу з ладу лопаток турбін [3; 4]. Лопатки газової турбіни охолоджуються всередині шляхом пропускання охолоджуючого повітря через ребра змієподібних проходів для відведення тепла, проведеного зовнішньою поверхнею. Зовнішнє охолодження лопаток турбін досягається шляхом нагнітання відносно більш холодного повітря з внутрішнього проходу на поверхню лопатки з метою утворення захисного шару між поверхнею лопатки і потоком гарячого газу [5].

Градієнт температур у товщі стінок деталі, фазові перетворення, які можуть виникати при різних

швидкостях нагрівання і охолодження, також критично впливають на стійкість матеріалу при термомеханічному впливі. Розглянемо, зокрема, більш детально ті негативні фактори, які впливають на робочі лопатки турбіни. Газові турбіни використовують різноманітне паливо, включаючи важке та легке, яке містить хімічні елементи, такі як сірка, натрій, кальцій, ванадій, свинець та молібден. Паливо може бути причиною виникнення серйозних проблем, якщо воно забруднене соляною водою, або коли паливо переміщується в турбіну із забруднювачами повітря. Забруднене паливо, що містить сірку та натрій, призводить до утворення шкідливих домішок, які осідають на лопатках. Ці домішки можуть спричинити відкладення лужного сульфату металу на поверхні лопатки, що призводить до теплової корозії [6].

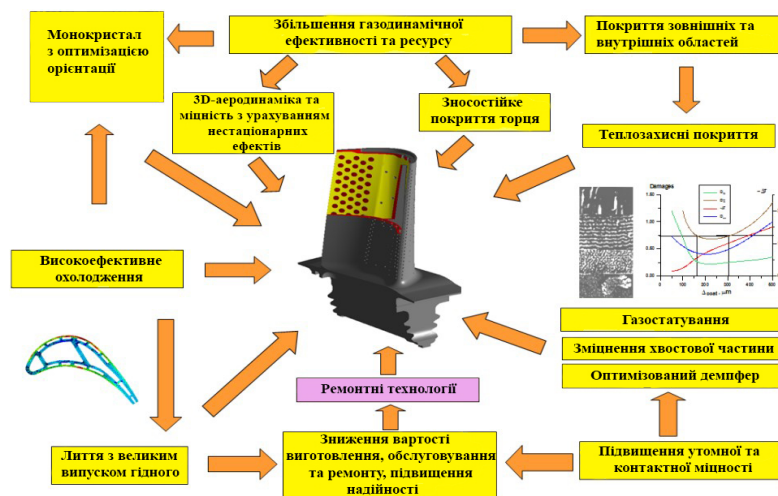


Рис. 1 – Схема створення і модернізації конструкції і технології виготовлення лопатки турбіни [1]

Турбінні лопатки підпадають під дію корозійного впливу. Гаряча корозія в турбінах поділяється на дві частини, а саме високотемпературну і низькотемпературну. Високотемпературна корозія виникає в діапазоні температур 800°C – 900°C, що характеризується морфологічно у вигляді товстих і пористих оксидів з матрицями сплавів, які по суті дренуються в хромі [7]. Гаряча корозія відбувається у два етапи, а саме в інкубаційному періоді, починаючи з низької швидкості корозії і потім швидкої корозійної атаки, що викликає пошкодження оксидного захисного шару лопатки [8].

Ще одним серйозним руйнівним фактором є ерозійний знос. Ерозія виникає через знос матеріалу лопатки твердими частинками абразивного матеріалу, які потрапляють до потоку. Частинки повинні мати діаметр більше 20 мкм, щоб викликати ударну ерозію. Великі частинки потрапляють в турбіну через різні середовища, такі як повітря, потік газу або шматки зламаних компонентів двигуна, які атакують поверхню лопатки і призводять до руйнування [9].

Для більш повної оцінки цілісності конструкції необхідне врахування комбінації впливів різних видів навантажень, яким піддаються лопатки турбіни в процесі своєї роботи, а саме:

– комбінація навантажень «втома – повзучість»: зазвичай вважається, що величина втоми за рахунок повзучості або релаксації збільшується, коли матеріал має низьку міцність при повзучості. Повзучість та пластичність також можна розглядати як обмежувальний параметр «втоми – повзучості»;

– вплив на втомну міцність навколишнього середовища: виникнення тріщин, особливо в разі впливу термічної втоми, має місце на поверхні матеріалу. На розвиток тріщини може впливати середовище на поверхні матеріалу [10].

Способи виготовлення лопаток газових турбін та проблематика вивчення їх характеристик міцності. На сьогоднішній день, у сучасних високотемпературних газових турбінах лопатки виготовляються методами спрямованої кристалізації (Directionally Solidified) та монокристалічного лиття (Single-Crystal Casting). Основними перевагами одержуваних способом монокристалічного лиття сплавів є збільшена міцність при повзучості за рахунок виключення границь між зернами і зменшена, в порівнянні зі матеріалами з полікристалічною структурою, величина модуля пружності в кристалографічному напрямку <001>, що значно

знижує термічні напруження і підвищує довговічність [11] (рис. 2).

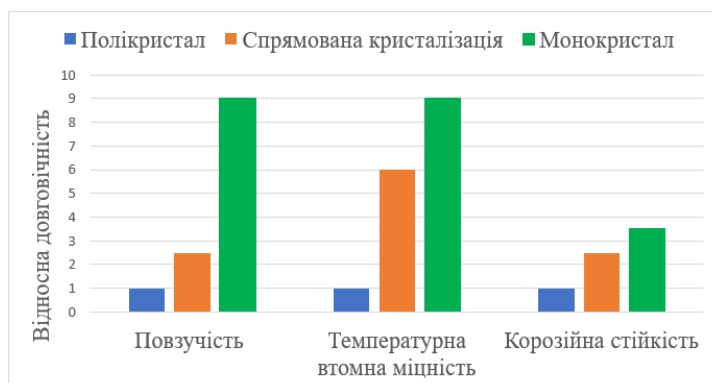


Рис. 2 – Порівняльні властивості полікристалічних, монокристалічних та сплавів спрямованої кристалізації за показником відносної довговічності [11]

Газові турбіни в основному експлуатуються за принципом «безпечного життєвого циклу», згідно якого двигун вилучається з експлуатації для технічного обслуговування задовго до того, як з'явиться імовірна поломка. Опис експериментів для лопаток турбін під дією механічного навантаження та повзучості на даний момент обмежений. Зростаюча суворість умов експлуатації газових турбін для досягнення більш високої ефективності викликала потребу в кращому розумінні характеристик матеріалу в більш реалістичних умовах [12].

Як зазначалося раніше, одним із методів виготовлення лопаток турбін є метод спрямованої кристалізації, або метод Стокбаргера-Бріджмена (Stockbarger-Bridgman method). Цей метод технічно простий і дозволяє вирощувати кристали заданого діаметра підбором відповідного тигля. Кристалізація може здійснюватися переміщенням контейнера через зону плавлення або плавним зниженням температури в умовах постійного градієнта температурного поля (кристалізація у вертикальному напрямку та горизонтальна спрямована кристалізація відповідно). У методі Стокбаргера-Бріджмена (Stockbarger-Bridgman method) найчастіше застосовується кристалізація при вертикальному переміщенні (згори донизу) контейнера з речовиною через зону плавлення. У цьому випадку тигель з шихтою повільно опускається з високотемпературної частини печі T_1 у низькотемпературну T_2 через діафрагму (рис. 3). Цей метод дозволяє вирощувати кристали як внаслідок спонтанного утворення зародків, так і з використанням затравок [13].

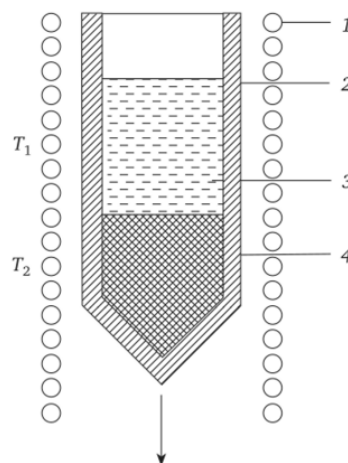


Рис. 3 – Схема методу спрямованої кристалізації: 1 – нагрівач; 2 – тигель; 3 – розплав; 4 – кристал [13]

До прикладів сплавів, виготовлених методом спрямованої кристалізації (СК) можна віднести: MAR-M247, CM 186LC, CM 247LC (США); Rene142 (Франція); ЖС-32ВНК (ЖС-32ВСНК) (Україна).

Більш прогресивним методом виготовлення лопаток турбін є монокристалічне лиття [14]. Завдяки такому способу отримуються лопатки, які містять у своїй структурі один макрокристал. Перевагою такої структури деталі, у порівнянні із полікристалічною, є відсутність границь зерен матеріалу, які являють собою осередок накопичення пошкоджень при динамічних навантаженнях. Також, організована макроструктура має підвищену жароміцність і жаростійкість, більш високу міцність до руйнування при повзучості, меншу чутливість до зародження тріщин (тріщиностійкість). Всі монокристалічні нікелеві жароміцні сплави на макрорівні є анізотропними (ортотропними), а точніше володіють властивостями кубічної симетрії.

При розробці феноменологічних моделей деформування, критеріїв міцності та довговічності матеріалів, монокристали можна умовно розглядати як матеріал з ідеальною гранецентрованою кубічною ґраткою. Прикладами таких матеріалів є сплави різних

поколінь, зокрема, із вітчизняних – матеріали ЖС-26ВІ, ЖС-32ВІ; із зарубіжних – матеріали виробництва американської компанії Canon Muskegon (філіал компанії S.N.E.C.M.A.) CMSX -2, CMSX-10, а також матеріал, розроблений підприємством Pratt & Whitney – PWA-1484 та матеріали японського виробництва TMS-75, TMS-82+.

Поряд із складнощами адекватного опису напружено-деформованого стану лопаток турбін виникають проблеми з експериментальним визначенням необхідних для використання в розрахунках міцності властивостей матеріалів. До них відносяться характеристики, які залежать від температури та кристалографічної орієнтації (КГО):

- 1) Параметри анізотропної пружності.
- 2) Втомна міцність та термічна міцність при змінних навантаженнях.
- 3) Повзучість на різних стадіях.
- 4) Залежності швидкості зростання тріщин від інтенсивності напружень.
- 5) Довготривала міцність та міцність при підвищених температурах.

Лопатки турбін працюють в умовах агресивних середовищ та навантаження відцентровими та газовими силами при високих температурах на стаціонарних та нестаціонарних режимах. Розрахунки напружено-деформованого стану та міцності таких лопаток необхідно проводити з урахуванням деформацій пружності, пластичності, повзучості та температурних деформацій, а також враховуючи зміни властивостей жароміцних сплавів, з яких виготовлені лопатки, у нерівномірному полі температур.

Дослідження питань оцінки динамічної міцності монокристалічних лопаток газових турбін. Динамічна міцність безпосередньо впливає на надійність та термін експлуатації двигуна, тому що більшість дефектів викликані дією динамічних напружень від стрибкоподібних навантажень, які різко зростають в умовах резонансу. Через високу навантаженість лопаток газових турбін існує актуальна необхідність оцінки та пошуку шляхів запобігання небезпечних резонансних режимів їх роботи у складі газотурбінної установки або двигуна [15].

При роботі двигуна на лопатки газових турбін діють сили, які періодично змінюються у часі. Якщо частота збуджуючих коливань співпадає із власною частотою коливань лопатки, то виникає явище, яке називається резонансом. В результаті появи резонансних коливань на будь-якому режимі роботи двигуна, напруження у лопаток різко збільшуються. Як наслідок, дуже важливою характеристикою лопаток є спектр їх власних частот коливань [16].

Проблематика дослідження впливу анізотропних властивостей монокристалічних лопаток (зокрема, різних КГО) на їх характеристики динамічної міцності підіймається у значній кількості публікацій.

Зокрема, можна виділити статті, які присвячені вивченню особливостей пружних характеристик залізо-нікелевих сплавів [17-19]. Авторський колектив у дослідженні [17] привів комплексну добірку пружних

властивостей сплавів на залізо-нікелевій основі. У матеріалі проведено дослідження модуля пружності Юнга, модуля зсуву, об'ємного модуля, коефіцієнту Пуассона монокристалу на залізо-нікелевій основі. Підібрано інформацію щодо зміни пружних констант залежно від вмісту різних хімічних складових матеріалу, температури робочого тіла, тиску, який діє на систему, магнітного поля системи, механічної деформації, термообробки та кристалографічних переходів. Інформація у статті розглядається з точки зору кристалографічної теорії та теорії пружності.

Дуже змістовна інформація надана у джерелах [18; 19]. Мова там йде про сплави на основі Ni_3Al , які мають відмінні механічні властивості і широко використовуються в військових і цивільних сферах. У цих дослідженнях приводяться дані, щодо конкретних механічних властивостей гранецентрованої кубічної структури Ni_3Al , які були отримані за допомогою вивчення принципів, заснованих на теорії функціоналу густини, а в якості обмінно-кореляційної функції використовувалася узагальнена градієнтна апроксимація. Об'ємний модуль, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга розраховано за допомогою використання методу апроксимації Фойгта-Ройса (Voight-Reuss).

Колектив авторів у статті [20] представив метод отримання пружних констант монокристалів на основі розрахунку із застосуванням лінійно-незалежних деформацій зв'язку у кристалі та одночасному виділенні повного набору констант пружності. За допомогою даного методу обчислювальні зусилля для отримання повного набору пружних констант (21 компонента для анізотропного тіла) кристала в заданому деформованому стані подібні до обчислювальних затрат на визначення об'ємного модуля. В якості прикладу апробації методики наведено обчислення монокристалічних пружних констант гексагонального осмію, кубічного алмазу, моноклінного сполучення Mg_2Si_6 та орторомбічного сполучення TiSi_2 .

У відкритих джерелах інформації містяться певні відомості про чисельні та експериментальні методи щодо відмежування від небезпечних резонансних частот та форм коливань, наприклад, як у джерелі [21]. В таких дослідженнях описується використання різноманітних способів відстроювання від резонансів для пом'якшення їх можливих шкідливих наслідків. Хоча ці публікації досить актуальні, у цілому вони не містять пропозицій щодо вирішення проблеми резонансу. Теоретично існує кілька варіантів запобігання резонансних коливань з великою амплітудою. Насамперед, зміна робочої швидкості обертання роторів двигуна може сприяти запобіганню небажаних форм коливань, але цей метод є дуже обмежувальним. Альтернативним шляхом виступає використання демпфера, який можна прикріпити до лопатки турбіни, щоб знизити загальний рівень напружень і амплітуду коливань [22]. У промисловому виробництві широко використовуються різні типи демпферів. Однак їх ефективність на високих частотах

сильно знижується. Ще одним способом уникнення резонансу є зміна конструкції самої лопатки, як запропоновано авторами публікації [23]. Цей метод досить ефективний і часто використовується на виробництві. Зворотною стороною його ефективності є те, що специфіка процесів модернізації лопаток майже повністю відсутня у відкритих джерелах у зв'язку з тим, що ці технології є комерційною таємницею спеціалізованих підприємств та виробництв. Методика керованого настроювання лопаток, описана у публікаціях [24; 25], використовує загальні відомі результати розв'язку проблеми небезпечних частот та форм коливань, і пропонує власну стратегію процесу модернізації конструкції лопатки. Але застосування цього методу обмежене для лопаток компресорів та вхідних пристроїв (вентиляторів) з ізотропними властивостями й тому не може бути застосоване до складних охолоджуваних жаростійких турбінних лопаток з анізотропними механічними характеристиками. Аналіз публікацій показав, що існує значний пробіл у застосуванні сучасних методів скінченно-елементного аналізу для визначення власних частот турбінних лопаток, виготовлених з монокристалічних сплавів. Зокрема, майже відсутні публікації по дослідженню впливу орієнтації кристалографічних осей на спектр власних частот охолоджуваних лопаток турбін [26].

Враховуючи, що використання скінченно-елементних програмних комплексів стає основним напрямком у практиці провідних виробників газових турбін, виникає нагальна потреба у розробці методів дослідження залежності впливу пружних властивостей монокристалічних лопаток турбін на їх власні частоти та форми коливань, а також розробка чисельних методів відмежування від небезпечних резонансів.

Основні підходи до аналізу анізотропної повзучості монокристалічних сплавів. Базовими характеристиками під час ресурсного проектування робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД) і енергетичних газотурбінних установок (ГТУ) є межі тривалої міцності та повзучості. Саме тому, безсумнівний інтерес представляє вивчення закономірностей зміни анізотропії механічних характеристик, які залежать від часу. Враховуючи умови експлуатації, що включають дуже високі температури та температурні градієнти, руйнування внаслідок накопичення деформацій повзучості стає однією з найважливіших проблем для турбінних лопаток [27].

Високотемпературні характеристики монокристалічних жароміцних матеріалів є результатом комбінованого впливу низки факторів, серед яких можна відмітити відсутність меж зерен та матрицю, яка складається з великої об'ємної частки кубічної γ' -фази у твердому розчині та зміщеної γ -матриці. Таке поєднання двофазної структури в межах одного кристала призводить до складних анізотропних властивостей повзучості. Моделювання анізотропії повзучості монокристалічних жароміцних матеріалів має велике значення для прогнозування перерозподілу

напружень та терміну служби деталей з цих матеріалів [28].

Численні роботи в областях повзучості анізотропних матеріалів, а також оцінки напружено-деформованого стану матеріалів можна знайти у багатьох публікаціях сучасних дослідників.

У наступних наукових трудах [29-33] наведено змістовні підходи до оцінки деформування матеріалу при повзучості:

1) У публікаціях [29-31] описуються математичні формулювання мікромеханічної моделі деформування анізотропних матеріалів при повзучості. Сформульовані для цієї моделі рівняння стосуються циклічних багатовісьових навантажень. У статтях особлива увага приділяється дослідженню металів та металічних сплавів. Процес формулювання моделі включає процес локалізації, який складається із оцінки напружень та деформацій у кожній октаедричній системі ковзання в процесі повзучості. Співвідношення між напруженнями і деформаціями досліджуються на мікрмасштабі для кожної системи ковзання. Усі чисельні значення, отримані на мікрорівні, підсумовуються для отримання швидкості деформації матеріалу на макрорівні. Мікромеханічна модель деформування, описана авторами, може враховувати ефект накопичення деформацій у матеріалі, а також додаткове зміцнення, пов'язане з циклічністю та непропорційністю навантаження.

2) У публікації [32] авторами запропонована уніфікована феноменологічна модель циклічної в'язкопластичної деформації для анізотропних матеріалів. Стаття складається з двох частин. У першій частині обговорюються термодинамічні процеси при навантаженні, внаслідок яких проходять зміни внутрішнього стану матеріалу. Дослідники запропонували спеціальну форму представлення функції вільної енергії, отримали визначальні рівняння для загального класу пружних/пластичних матеріалів. Теорія анізотропної в'язкопластичності впливає з визначення рівнянь еволюції для непружної деформації та внутрішнього стану матеріалу. У другій частині статті автори запропонували в'язкопластичну модель кубічної кристалічної анізотропії, на прикладі жароміцного нікелевого сплаву. Пропонована модель застосована для розрахунків монокристалічного сплаву CMSX-2 при циклічному навантаженні в умовах повзучості.

3) У дослідженні [33] авторів французької школи механіки та матеріалів наведено інформацію про поведінку матеріалу при нелінійному одновісьовому навантаженні. Також науковцями запропоновано моделі пластичності та в'язкопластичності для невеликих деформацій. У публікації наведено відомості про елементи механіки пошкоджуваності. Окрема увага приділяється обговоренню парного впливу пластичності та пошкоджуваності, і феномену «активації-деактивації».

Одна із перших феноменологічних моделей пружно-пластичного деформування, застосованих до матеріалів із властивостями кубічної симетрії, була

запропонована Хіллом (Hill R.) [34]. Він ввів модифікацію плинності по Мізесу (von Mises R.) у вигляді квадратичної форми довільного вигляду у просторі напружень, яку можна застосувати до матеріалів з трьома ортогональними площинами симетрії. Зазначена функція початку плинності з використанням асоційованого закону плинності описують деформацію ортотропного матеріалу з ізотропним зміцненням. Згідно моделі Хілла (Hill R.), еквівалентні напруження та еквівалентне приращення пластичних деформацій, для матеріалів із властивостями кубічної симетрії, можуть бути виражені у системі координат, пов'язаній з кристалографічними осями [001], [010], [100] [35].

При аналізі літературних джерел можна зазначити, що для моделювання повзучості монокристалічних сплавів при високих температурах на сучасному етапі розроблено різноманітні конститутивні моделі, що використовують мікроструктурні або феноменологічні підходи. Феноменологічні моделі описують повзучість з макроскопічної точки зору, тобто за допомогою аналізу та обробки різноманітних кривих повзучості. Одним із прикладів феноменологічних підходів є модель матеріалу, яка заснована на моделі Кайлето (Cailletaud) з ізотропним гартуванням [36]. Це феноменологічна мікро-макроскопічна модель, що базується на пластичності монокристалів [36; 37].

Мікроструктурні підходи, в свою чергу, базуються на тому, що під час повзучості механізми деформації в матеріалах тісно пов'язані з рухом дислокацій. Мікроструктурні підходи враховують дислокаційні механізми і використовують рівняння еволюції для визначення густини дислокацій на системах ковзання (наприклад, [27; 37; 38]). Істотною проблемою у використанні мікроструктурних моделей систем ковзання для прогнозування анізотропної повзучості при високих температурах є також їх нездатність пояснення більш низького спротиву повзучості монокристалічної орієнтації [111] порівняно з орієнтацією [001] [28].

Слід зазначити, що багато сучасних колективів авторів зробили свій внесок у питання дослідження процесів повзучості монокристалічних нікелевих сплавів, зокрема лопаток газових турбін, виготовлених із цих матеріалів. Так, у дослідженнях [39; 40] зроблено огляд основних причин руйнування лопаток турбін та наведено прикладі таких явищ із експлуатації. Особлива увага приділена вивченню особливостей пошкоджуваності лопаток при повзучості.

У статті [41] науковці проводили дослідження із використанням пластинчастих зразків з отворами (в якості натурних моделей охолоджуваних монокристалічних лопаток турбін), і без отворів. В процесі випробувань, використовувалися зразки, відлиті в двох різних кристалографічних орієнтаціях [001] і [111]. Також авторами у роботі була використана модифікована форма закону пошкоджуваності Качанова–Работнова (Kachanov-Rabotnov). В результаті скінченно-елементного аналізу

з'ясовано, що наявність охолоджуючих отворів сприяє появі концентрації деформацій в районі цих отворів і має значний вплив на параметри повзучості.

Авторами у джерелі [42] розглядаються сучасні розробки в моделюванні конститутивної поведінки монокристалічних сплавів з пам'яттю форми (Smart Memory Alloys). Основними властивостями таких сплавів є ефект «пам'яті» форми, а також високі показники довговічності та втомної міцності. Публікація зосереджена на розгляді хімічного складу цих матеріалів і їх термомеханічних властивостей. Окремо розглядається моделювання поведінки монокристалічної повзучості на основі різних підходів.

Автори публікації [43] зазначають, що властивості повзучості нікелевих жароміцних монокристалічних сплавів сильно залежать від швидкості деградації γ/γ' мікроструктури з початком руху дислокацій у цих мікроструктурах. У дослідженні описано, що прикладені напруження та температура сильно впливають на рух дислокацій та починають виділятися різні механізми повзучості при низькій ($\sim 750^\circ\text{C}$), середній ($\sim 950^\circ\text{C}$) та високій ($\sim 1100^\circ\text{C}$) температурах.

Тобто, можна зробити висновок, що існуючі підходи до оцінки анізотропної повзучості монокристалічних жароміцних сплавів є неуніверсальними. Багато підходів потребують значного доопрацювання та мають суттєві обмеження у сфері свого використання. Тому, актуальною задачею є моделювання повзучості монокристалічних сплавів для подальшого прогнозування працездатності деталей, які виготовляються з цих сплавів, зокрема, лопаток турбін авіаційних двигунів.

Основні підходи та критерії оцінки довготривалої міцності монокристалічних лопаток газових турбін. При оцінюванні «ефективного життєвого циклу» монокристалічних лопаток газових турбін особлива увага, зазвичай, приділяється дослідженню особливостей довготривалої міцності нікелевих жароміцних сплавів з різними КГО при змінах температурних навантажень в широкому діапазоні, оскільки ці фактори є найбільш впливовими при ресурсному проектуванні авіаційних газотурбінних двигунів.

Відомі підходи до оцінки довговічності лопаток газових турбін, що виготовляються з нікелевих жароміцних сплавів, описані у публікаціях [35; 44]:

1) Перший підхід базується на застосуванні коефіцієнту запасу циклічної довготривалої міцності. При цьому, для наближеної оцінки циклічної довговічності при нестационарному циклічному навантаженні приймається наступне припущення: розмахи напружень і деформацій у кожному циклі навантаження однакові, а середнє напруження в кожному наступному циклі навантаження змінюється внаслідок накопичення деформацій повзучості на стаціонарних ділянках кожного циклу. Розмах еквівалентних напружень і пластичних деформацій стабільного циклу визначається вирішенням задачі циклічної пластичності для монокристалічних сплавів на основі використання теорії Хілла (Hill R.).

Зміна середнього еквівалентного напруження після кожного циклу навантаження дорівнює зміні еквівалентного напруження на стаціонарній ділянці з максимальною температурою газу в конкретному циклі. Також робиться припущення, що на перехідних режимах у кожному циклі, а також на ділянках зупинки між циклами, додаткові деформації не накопичуються.

Для чисельного моделювання малоциклової втомної міцності монокристалічної лопатки при нестационарному навантаженні необхідно володіти деякими експериментальними даними. Зокрема, потрібна інформація про характеристики малоциклової втоми монокристалічного сплаву за різної асиметрії циклу навантаження зразків в умовах одноосового напруженого стану для різних кристалографічних орієнтацій монокристалу [35].

2) Наступний підхід спирається на застосування деформаційного критерію руйнування в основу якого покладено лінійне підсумовування пошкоджень, що обумовлюються наступними чинниками [44; 45]:

- зміною пластичної деформації у рамках циклу;
- зміною деформації повзучості в межах циклу;
- однобічним накопиченням пластичної деформації;
- однобічним накопиченням деформацій повзучості.

У якості еквівалентної деформації, за цим підходом, для монокристалічних матеріалів можуть розглядатися різноманітні інваріанти тензору деформації:

- максимальна деформація на зсув у системі ковзання з нормаллю $n_{\{111\}}$ до площини ковзання і напрямком ковзання $I_{<011>}$;
- головна деформація;
- інтенсивність деформацій за Хіллом (Hill R.);
- максимальна деформація зсуву.

Показники розмаху в межах одного циклу та односторонні накопиченні деформації отримують на основі аналізу кривих циклічного деформування.

3) В основу наступного підходу покладено застосування відношення максимальної довготривалої міцності сплаву при розтягуванні у напрямку $<001>$ до еквівалентних напружень при повзучості [26, 45].

Відомою математичною моделлю оцінки довговічності монокристалічних сплавів виступає модель Мізеса (Von Mises R.) [46], де еквівалентні напруження при повзучості для матеріалів з кубічною симетрією можуть бути виражені через компоненти тензора напружень, пов'язані з кристалографічними напрямками $<100>$, $<010>$, $<001>$. Зокрема, у цьому підході враховується коефіцієнт анізотропії довготривалої міцності, який залежить від максимальних меж довготривалої міцності при розтягуванні зразків у площинах різних кристалографічних напрямків [44].

Сучасні дослідники також пропонують свої підходи до оцінки впливу анізотропії монокристалів на їх довготривалу міцність. У публікаціях [47–50] описується процес дослідження довговічності лопаток турбіни високого тиску при комбінованому впливі

повзучості та втомного навантаження. В цих публікаціях запропоновано багатоосову модель прогнозування довговічності з використанням нового критичного параметра пошкоджуваності по площині. На основі аналізу зв'язку термічних та конструкційних параметрів лопаток турбін високого тиску отримано закон розподілу напружень і деформацій при комплексному навантаженні (відцентровий, температурний та аеродинамічний впливи).

Зважаючи на проаналізовані літературні джерела, можна прийти до висновку, що питання оцінки впливу анізотропних характеристик монокристалічних сплавів на довговічність лопаток турбін, що виготовляються з них, є досить суттєвою та актуальною задачею.

Висновки. У цьому дослідженні представлено основні відомості про лопатки газових турбін. Зокрема, наведено змістовну інформацію про основні методи виготовлення лопаток турбін, такі як метод спрямованої кристалізації та метод монокристалічного лиття, а також матеріали, які прийнято застосовувати для виготовлення лопаток газових турбін. Зазначено, що на сучасному етапі найбільше застосування отримали монокристалічні лопатки турбін, через те, що вони володіють високими показниками міцності, зокрема, спротивом повзучості, мають значну тріщиностійкість і демонструють високі показники жароміцності та жаростійкості.

Також у наведеному матеріалі проаналізовано та визначено основні впливи, що пошкоджують, а саме комбіновані високотемпературні, статичні та динамічні навантаження. Серед зазначених шкідливих впливів можна виділити руйнівний вплив комбінованого статичного навантаження та руйнування в умовах резонансу; повзучість, яка викликається механічним та високотемпературним механізми навантаження на перехідних режимах роботи двигуна (при еволюціях польоту). У приведеному матеріалі за наявними літературними джерелами проаналізовано стан вивчення питань оцінки динамічної та статичної міцності лопаток газових турбін. Наведені основні досягнення науковців, які відзначилися теоретичними та експериментальними роботами при дослідженні проблеми оцінки впливу анізотропної повзучості матеріалів на довговічність деталей двигунів.

Загалом можна зазначити, що існує чисельна кількість підходів до оцінки міцності лопаток турбін при високотемпературному, статичному та динамічному навантаженні. Аналіз літературних джерел показав, що існуючі методи, зокрема, по відстроюванню від небезпечних резонансних частот коливаль, по вивченню залежностей анізотропної повзучості, встановленню закономірностей довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбін, не можуть розцінюватися в якості універсальних. Зазвичай, всі ці методи мають обмежене певними рамками застосування і потребують великої кількості даних експериментальних досліджень. Враховуючи вищеперераховане, дуже актуальною є задача створення методів оцінки

характеристик високотемпературної міцності лопаток турбін із монокристалічних жароміцних сплавів в умовах статичних та динамічних навантажень, які б враховували анізотропію їх властивостей та їх складні конструкційні особливості.

Список літератури

1. Неманежін 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. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.13
2. Lepeshkin A., Remchukov S., Yaroslavtsev N., Guanghua Z., Meng Z., Fetisov M., Ilinskaya O., Fedin M., Kuleshov A. Test technique for turbine cooled blades of gas turbine engines. *Journal of physics: conference series*, 2021, vol. 1925, pp. 1-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012086
3. Beghini M., Bertini L., Santus C., Monelli B. D., Scrinzi E., Pieroni N., Giovannetti I. High temperature fatigue testing of gas turbine blades. *Procedia structural integrity*, 2017, vol. 7, pp. 206-213. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.079
4. Rongqiao W., Fulei J., Dianyin H. In-phase thermal-mechanical fatigue investigation on hollow single-crystal turbine blades. *Chinese journal of aeronautics*, 2013, vol. 26, no. 6, pp. 1409-1414. DOI: 10.1016/j.cja.2013.07.026
5. Han J.-C. Recent studies in turbine blade cooling. *International journal of rotating machinery*, 2004, vol. 10, no. 6, pp. 443-457. DOI: 10.1155/S1023621X04000442
6. Puspitasari P., Andoko A., Kurniawan P. Failure analysis of a gas turbine blade: a review. *IOP Conference series: materials science and engineering*, 2021, vol. 1034, pp. 1-9. DOI: 10.1088/1757-899X/1034/1/012156
7. Swain B., Mallick P., Patel S., Roshan R., Mohapatra S. S., Bhuyan S., et al. Failure analysis and materials development of gas turbine blades. *Materials today: proceedings*, 2020, vol. 33, no. 8, pp. 5143-5146. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.859
8. Ali R., Shehbaz T., Bemporad E. Investigation on failure in thermal barrier coatings on gas turbine first-stage rotor blade. *Journal of failure analysis and prevention*, 2018, vol. 18, pp. 1062-1072. DOI: 10.1007/s11668-018-0530-5
9. Asadikouhanjani S., Torfeh M., Ghorbanf R. Failure analysis of a heavy duty gas turbine blade. *Strength of materials*, 2014, vol. 46, pp. 608-612. DOI: 10.1007/s11223-014-9589-8
10. Couturier R., Escaravage C. High temperature alloys for the HTGR gas turbine: required properties and development needs. *International Atomic Energy Agency. Technical committee meeting on gas turbine power conversion systems for modular HTGRs*, 2001, pp. 163-176.
11. Gell M., Duhal D. N., Gupta D. K., et al. Advanced superalloy airfoils. *Journal of metals*, 1987, vol. 39, pp. 11-15. DOI: 10.1007/BF03258033
12. Shi D., Yang X., Li Z. Accelerated LCF-creep experimental methodology for durability life evaluation of turbine blade. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2018, vol. 41, no. 5, P. 1196-1207. DOI: 10.1111/ffe.12763
13. Cormier J., Gandin C.-A. Chapter 7 - Processing of directionally cast nickel-base superalloys: solidification and heat treatments. In (eds): Caillaud G., Cormier J., Eggeler G., Maurel V., Nazé L. *Nickel base single crystals across length scales*. Elsevier, 2022, pp. 193-222. DOI: 10.1016/B978-0-12-819357-0.00015-9
14. Kim E.-H., Park H. Ye., Lee C.-L., Park J. B., Yang S. C., Jung Y.-G. Single crystal casting of gas turbine blades using superior ceramic core. *Journal of materials research and technology*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 3348-3356. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.029
15. Ibrahim T. K., Mohammed M. K., Al-Door W. H. A., Al-Sammarraye A. T., Basrawi F. Study of the performance of the gas turbine power plants from the simple to complex cycle: a technical review. *Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences*, 2019, vol. 57, pp. 228-250.
16. Madhavan S., Jain R., Sujatha C., Sekhar A. S. Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine. *Engineering failure analysis*. 2014. Vol. 46. P. 26-39. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.07.021
17. Ledbetter, H. M., Reed, R. P. Elastic properties of metals and alloys. I. Iron, nickel, and iron-nickel alloys. *Journal of physical and chemical reference data*, 1973, vol. 2, no. 3, pp. 531-618. DOI: 10.1063/1.325341
18. Luan, X., Qin, H., Liu, F., Dai, Z., Yiand, Y., Li, Q. The mechanical properties and elastic anisotropies of cubic Ni₃Al from first principles calculations. *Crystals*, 2018, vol. 8, no. 8, pp. 307-317. DOI: 10.3390/cryst8080307
19. Fatmi, M., Ghebouli, M. A., Ghebouli, B., Chihi, T., Boucetta, S., Heiba, Z. K. Study of structural, elastic, electronic, optical and thermal properties of Ni₃Al. *Romanian journal of physics*, 2011, vol. 56, pp. 935-951.
20. Yu, R., Zhu, J., Ye, H. Q. Calculations of single-crystal elastic constants made simple. *Computer physics communications*, 2010, vol. 181, no. 3, pp. 671-675. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.017
21. Hemberger, D., Filsinger, D., Bauer, H.-J. Investigations on maximum amplitude amplification factor of real mistuned bladed structures. *Proceedings of the ASME turbo expo 2012: turbine technical conference and exposition*, 2012, vol. 7, pp. 1041-1052. DOI: 10.1115/GT2012-68084
22. Sanliturk, K. Y., Ewins, D. J., Stanbridge, A. B. Underplatform dampers for turbine blades: theoretical modeling, analysis, and comparison with experimental data. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 919-929. DOI: 10.1115/1.1385830
23. Ewins, D. J. Control of vibration and resonance in aero engines and rotating machinery - an overview. *International journal of pressure vessels and piping*, 2010, vol. 87, no. 9, pp. 504-510. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.07.001
24. Duong, L., Murphy, K. D., Kazerounian, K. Guided tuning of turbine blades: a practical method to avoid operating at resonance. *Journal of vibration and acoustics*, 2013, vol. 135, no. 5, pp. 1-5. DOI: 10.1115/1.4024761
25. Зінковський, А. П., Меркулов, В. М., Деркач, О. Л., Токар, І. Г., Савченко, К. В. Дослідження напруженого стану міжпазових виступів диска робочого колеса компресора з урахуванням впливу відцентрових сил та розладу частот коливань лопаток. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2021, №4 спец випуск 1(173), с. 47-54. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.07
26. Nemanzhyn, Y., Lvov, G., Torba, Y. 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). *Advanced manufacturing processes V. InterPartner 2023. Lecture notes in mechanical engineering*. Springer. Cham, 2024, pp. 485-497. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_45
27. Xu, R., Li, Y., Yu, H. Creep behavior and deformation mechanism of a third-generation single crystal Ni-based superalloy at 980 °C. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 9, pp. 1-14. DOI: 10.3390/met13091541
28. Knowles, D. M., MacLachlan, D. W. Anisotropic creep of single crystal superalloys. In: Murakami, S., Ohno, N. (eds). *IUTAM symposium on creep in structures. Solid mechanics and its applications*. Springer. Dordrecht, 2001, vol. 86, pp. 31-40. DOI: 10.1007/978-94-015-9628-2_4
29. 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.
30. 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
31. Caillaud 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
32. 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
33. Besson J., Caillaud G., Chaboche J.-L., Forest S. Non-linear mechanics of materials. Springer. Verlag. Dordrecht, 2010, no. 1, 433 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3356-7
34. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of royal society of London. Series A*, 1948, vol. 193, p. 281-297. DOI: 10.1098/rspa.1948.0045
35. Nissley D. M., Meyer T. G., Walker K. P. Life prediction and constitutive models for engine hot section anisotropic materials program. *NASA technical reports server*, 1992, 316 p.

36. Meric, L., Poubanne, P., Cailletaud, G. Single crystal modeling for structural calculations: part I – model presentation. *Transactions of the ASME. Journal of engineering materials and technology*, 1991, vol. 113, no.1, pp. 162-170. DOI: 10.1115/1.2903374
37. Vladimirov, I. N., Reese, S., Eggeler, G. Constitutive modelling of the anisotropic creep behaviour of nickel-base single crystal superalloys. *International journal of mechanical sciences*, 2009, vol. 51, no. 4, pp. 305-313. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.02.004
38. Fedelich, B. A microstructural model for the monotonic and the cyclic behaviour of single crystals of superalloys at high temperatures. *International journal of plasticity*, 2002, vol. 18, no. 1, pp. 1-49. DOI: 10.1016/S0749-6419(00)00045-0
39. Liu, D., Li, H., Liu, Y. Numerical simulation of creep damage and life prediction of superalloy turbine blade. *Mathematical problems in engineering*, 2015, vol. 2015, pp. 1-10. DOI: 10.1155/2015/732502
40. Zhang, G., Zhao, Y., Xue, F., et al. Creep-fatigue interaction damage model and its application in modified 9Cr-1Mo steel. *Nuclear engineering and design*, 2011, vol. 241, no. 12, pp. 4856-4861. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.08.076
41. Yu, Q. M., Yue, Z. F., Wen, Z. X. Creep damage evolution in a modeling specimen of nickel-based single crystal superalloys air-cooled blades. *Materials science and engineering: A*, 2008, vol. 477, no. 1-2, pp. 319-327. DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.080
42. Patoor, E., Lagoudas, D. C., Entchev, P. B., Brinson, L. C., Gao, Xi. Shape memory alloys. Part I: general properties and modeling of single crystals. *Mechanics of materials*, 2006, vol. 38, no. 5-6, pp. 391-429. DOI: 10.1016/j.mechmat.2005.05.027
43. Xia, W., Zhao, X., Yue, L., Zhang, Z. Microstructural evolution and creep mechanisms in Ni-based single crystal superalloys: a review. *Journal of alloys and compounds*, 2020, vol. 819, pp. 2-32. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152954
44. 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
45. Немаєжін С. 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 (198), с. 39-51. DOI: 10.32620/aktt.2024.4sup2.06
46. Von Mises, R. Mechanics of plastic shape change of crystals. *ZAMM - Journal of applied mathematics and mechanics*, 1928, vol. 8, no. 3, pp. 161-185. DOI: 10.1002/zamm.19280080302 (in German).
47. Kolagar, A. M., Tabrizi, N., Cheraghzadeh, M., Shahriari, M. S. Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy. *Case studies in engine failure analysis*, 2017, vol. 8, pp. 61-68. DOI: 10.1016/j.csefa.2017.04.002
48. 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
49. Huo J., Sun D., Wu H., Wang W., Xue L. Multi-axis low-cycle creep/fatigue life prediction of high-pressure turbine blades based on a new critical plane damage parameter. *Engineering failure analysis*, 2019, vol. 106. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104159
50. Bychkov N. G., Lukash V. P., Nozhnitsky Y. A., Perchin A. V., Rekin A. D. Investigations of thermomechanical fatigue for optimization of design and production process solutions for gas-turbine engine parts. *International journal of fatigue*, 2008, vol. 30, no. 2, pp. 305-312. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.01.046
3. Beghini M., Bertini L., Santus C., Monelli B. D., Scrinzi E., Pieroni N., Giovannetti I. High temperature fatigue testing of gas turbine blades. *Procedia structural integrity*, 2017, vol. 7, pp. 206-213. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.079
4. Rongqiao W., Fulei J., Dianyin H. In-phase thermal-mechanical fatigue investigation on hollow single-crystal turbine blades. *Chinese journal of aeronautics*, 2013, vol. 26, no. 6, pp. 1409-1414. DOI: 10.1016/j.cja.2013.07.026
5. Han J.-C. Recent studies in turbine blade cooling. *International journal of rotating machinery*, 2004, vol. 10, no. 6, pp. 443-457. DOI: 10.1155/S1023621X04000442
6. Puspitasari P., Andoko A., Kurniawan P. Failure analysis of a gas turbine blade: a review. *IOP Conference series: materials science and engineering*, 2021, vol. 1034, pp. 1-9. DOI: 10.1088/1757-899X/1034/1/012156
7. Swain B., Mallick P., Patel S., Roshan R., Mohapatra S. S., Bhuyan S., et al. Failure analysis and materials development of gas turbine blades. *Materials today: proceedings*, 2020, vol. 33, no. 8, pp. 5143-5146. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.859
8. Ali R., Shehbaz T., Bemporad E. Investigation on failure in thermal barrier coatings on gas turbine first-stage rotor blade. *Journal of failure analysis and prevention*, 2018, vol. 18, pp. 1062-1072. DOI: 10.1007/s11668-018-0530-5
9. Asadikouhanjani S., Torfeh M., Ghorbanfar R. Failure analysis of a heavy duty gas turbine blade. *Strength of materials*, 2014, vol. 46, pp. 608-612. DOI: 10.1007/s11223-014-9589-8
10. Couturier R., Escaravage C. High temperature alloys for the HTGR gas turbine: required properties and development needs. *International Atomic Energy Agency. Technical committee meeting on gas turbine power conversion systems for modular HTGRs*, 2001, pp. 163-176.
11. Gell M., Duhal D. N., Gupta D. K., et al. Advanced superalloy airfoils. *Journal of metals*, 1987, vol. 39, pp. 11-15. DOI: 10.1007/BF03258033
12. Shi D., Yang X., Li Z. Accelerated LCF-creep experimental methodology for durability life evaluation of turbine blade. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2018, vol. 41, no. 5, P. 1196-1207. DOI: 10.1111/ffe.12763
13. Cormier J., Gandin C.-A. Chapter 7 - Processing of directionally cast nickel-base superalloys: solidification and heat treatments. In (eds): Cailletaud G., Cormier J., Eggeler G., Maurel V., Nazé L. *Nickel base single crystals across length scales. Elsevier*, 2022, pp. 193-222. DOI: 10.1016/B978-0-12-819357-0.00015-9
14. Kim E.-H., Park H. Ye., Lee C.-L., Par J. B., Yang S. C., Jung Y.-G. Single crystal casting of gas turbine blades using superior ceramic core. *Journal of materials research and technology*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 3348-3356. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.029
15. Ibrahim T. K., Mohammed M. K., Al-Door W. H. A., Al-Sammarraie A. T., Basrawi F. Study of the performance of the gas turbine power plants from the simple to complex cycle: a technical review. *Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences*, 2019, vol. 57, pp. 228-250.
16. Madhavan S., Jain R., Sujatha C., Sekhar A. S. Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine. *Engineering failure analysis*. 2014. Vol. 46. P. 26-39. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.07.021
17. Ledbetter H. M., Reed R. P. Elastic properties of metals and alloys. I. Iron, nickel, and iron-nickel alloys. *Journal of physical and chemical reference data*, 1973, vol. 2, no. 3, pp. 531-618. DOI: 10.1063/1.325341
18. Luan X., Qin H., Liu F., Dai Z., Yiand Y., Li Q. The mechanical properties and elastic anisotropies of cubic Ni₃Al from first principles calculations. *Crystals*, 2018, vol. 8, no. 8, pp. 307-317. DOI: 10.3390/cryst8080307
19. Fatmi M., Ghebouli M. A., Ghebouli B., Chihi T., Boucetta S., Heiba Z. K. Study of structural, elastic, electronic, optical and thermal properties of Ni₃Al. *Romanian journal of physics*, 2011, vol. 56, pp. 935-951.
20. Yu R., Zhu J., Ye H. Q. Calculations of single-crystal elastic constants made simple. *Computer physics communications*, 2010, vol. 181, no. 3, pp. 671-675. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.017
21. Hemberger D., Filsinger D., Bauer H.-J. Investigations on maximum amplitude amplification factor of real mistuned bladed structures. *Proceedings of the ASME turbo expo 2012: turbine technical conference and exposition*, 2012, vol. 7, pp. 1041-1052. DOI: 10.1115/GT2012-68084

References(transliterated)

1. Nemaneshyn Y. O., Ivko V. M., Torba Yu. I. Teoretychni ta eksperymental'ni metody vyznachennya kharakterystyk mitnosti 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), pp. 93-101. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup1.13 (In Ukrainian).
2. Lepeshkin A., Remchukov S., Yaroslavtsev N., Guanghua Z., Meng Z., Fetisov M., Ilinskaya O., Fedin M., Kuleshov A. Test technique for turbine cooled blades of gas turbine engines. *Journal of physics: conference series*, 2021, vol. 1925, pp. 1-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012086

22. Sanliturk K. Y., Ewins D. J., Stanbridge A. B. Underplatform dampers for turbine blades: theoretical modeling, analysis, and comparison with experimental data. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 919-929. DOI: 10.1115/1.1385830
23. Ewins D. J. Control of vibration and resonance in aero engines and rotating machinery - an overview. *International journal of pressure vessels and piping*, 2010, vol. 87, no. 9, pp. 504-510. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.07.001
24. Duong L., Murphy K. D., Kazerounian K. Guided tuning of turbine blades: a practical method to avoid operating at resonance. *Journal of vibration and acoustics*, 2013, vol. 135, no. 5, pp. 1-5. DOI: 10.1115/1.4024761
25. Zinkovskii A. P., Merkulov V. M., Derkach O. L., Tokar I. G., Savchenko K. V. Doslidzhennya napruzhenoho stanu mizhpazovykh vystupiv dyska robochoho kola kompresora z urakhuvannyam vplyvu vidtsentrovnykh syl ta rozladu chastot kolyvan lopatok [Stress state analysis of compressor blade-disk joint with the influence of centrifugal forces and blade mistuning]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4 special issue 1(173), pp. 47-54. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.07 (In Ukrainian)
26. Nemanezhyn Y., Lvov G., Torba Y. 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). *Advanced manufacturing processes V. InterPartner 2023. Lecture notes in mechanical engineering*. Springer. Cham, 2024, pp. 485-497. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_45
27. Xu R., Li Y., Yu H. Creep behavior and deformation mechanism of a third-generation single crystal Ni-based superalloy at 980 °C. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 9, pp. 1-14. DOI: 10.3390/met13091541
28. Knowles D. M., MacLachlan D. W. Anisotropic creep of single crystal superalloys. In: Murakami, S., Ohno, N. (eds). *IUTAM symposium on creep in structures. Solid mechanics and its applications*. Springer. Dordrecht, 2001, vol. 86, pp. 31-40. DOI: 10.1007/978-94-015-9628-2_4
29. 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.
30. 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
31. 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
32. 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
33. Besson J., Cailletaud G., Chaboche J.-L., Forest S. Non-linear mechanics of materials. *Springer. Verlag. Dordrecht*, 2010, no. 1, 433 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3356-7
34. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of royal society of London. Series A*, 1948, vol. 193, p. 281-297. DOI: 10.1098/rspa.1948.0045
35. Nissley D. M., Meyer T. G., Walker K. P. Life prediction and constitutive models for engine hot section anisotropic materials program. *NASA technical reports server*, 1992, 316 p.
36. Meric L., Poubanne P., Cailletaud G. Single crystal modeling for structural calculations: part I – model presentation. *Transactions of the ASME. Journal of engineering materials and technology*, 1991, vol. 113, no.1, pp. 162-170. DOI: 10.1115/1.2903374
37. Vladimirov I. N., Reese, S., Eggeler G. Constitutive modelling of the anisotropic creep behaviour of nickel-base single crystal superalloys. *International journal of mechanical sciences*, 2009, vol. 51, no. 4, pp. 305-313. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.02.004
38. Fedelich B. A microstructural model for the monotonic and the cyclic behaviour of single crystals of superalloys at high temperatures. *International journal of plasticity*, 2002, vol. 18, no. 1, pp. 1-49. DOI: 10.1016/S0749-6419(00)00045-0
39. Liu., Li H., Liu Y. Numerical simulation of creep damage and life prediction of superalloy turbine blade. *Mathematical problems in engineering*, 2015, vol. 2015, pp. 1-10. DOI: 10.1155/2015/732502
40. Zhang G., Zhao Y., Xue F., et al. Creep-fatigue interaction damage model and its application in modified 9Cr-1Mo steel. *Nuclear engineering and design*, 2011, vol. 241, no. 12, pp. 4856-4861. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.08.076
41. Yu Q. M., Yue Z. F., Wen Z. X. Creep damage evolution in a modeling specimen of nickel-based single crystal superalloys air-cooled blades. *Materials science and engineering: A*, 2008, vol. 477, no. 1-2, pp. 319-327. DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.080
42. Patoor E., Lagoudas D. C., Entchev P. B., Brinson L. C., Gao Xi. Shape memory alloys. Part I: general properties and modeling of single crystals. *Mechanics of materials*, 2006, vol. 38, no. 5-6, pp. 391-429. DOI: 10.1016/j.mechmat.2005.05.027
43. Xia W., Zhao X., Yue L., Zhang Z. Microstructural evolution and creep mechanisms in Ni-based single crystal superalloys: a review. *Journal of alloys and compounds*, 2020, vol. 819, pp. 2-32. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152954
44. 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
45. Nemanezhyn Y. O., Lvov G. I., Torba Yu. I. Otsinka vplyvu anizotropnykh vlastyvostey monokrystalichnykh lopatok turbin aviatsiynykh hazoturbinnnykh dvyhuniv na yikh dovyhotryvalu 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(198), pp. 39-51. DOI: 10.32620/akt.2024.4sup.2.06 (In Ukrainian).
46. Von Mises R. Mechanics of plastic shape change of crystals. *ZAMM - Journal of applied mathematics and mechanics*, 1928, vol. 8, no. 3, pp. 161-185. DOI: 10.1002/zamm.19280080302 (in German).
47. Kolagar A. M., Tabrizi N., Cheraghzadeh M., Shahriari M. S. Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy. *Case studies in engine failure analysis*, 2017, vol. 8, pp. 61-68. DOI: 10.1016/j.csefa.2017.04.002
48. 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
49. Huo J., Sun D., Wu H., Wang W., Xue L. Multi-axis low-cycle creep/fatigue life prediction of high-pressure turbine blades based on a new critical plane damage parameter. *Engineering failure analysis*, 2019, vol. 106. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104159
50. Bychkov N. G., Lukash V. P., Nozhnitsky Y. A., Perchin A. V., Rekin, A. D. Investigations of thermomechanical fatigue for optimization of design and production process solutions for gas-turbine engine parts. *International journal of fatigue*, 2008, vol. 30, no. 2, pp. 305-312. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.01.046

Надійшло (received) 24.09.2024

Відомості про авторів / About authors

Неманежин Євген Олександрович (Nemanezhyn Yevhen) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії»; м. Харків, Україна; інженер-дослідник ДП «Івченко-Прогрес»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5855-508X>; Scopus Author ID: 58598957200; e-mail: Yevhen.Nemanezhyn@infiz.khpi.edu.ua