

Є. О. НЕМАНЕЖИН, Г. І. ЛЬВОВ, Ю. І. ТОРБА

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЗУЧОСТІ ЛОПАТКИ ТУРБИНИ З МОНОКРИСТАЛІЧНОГО СПЛАВУ

Статтю присвячено моделі повзучості монокристалічного сплаву та розробці методики ідентифікації матеріальних параметрів по результатам фізичних експериментів. Виконано скінчено-елементний аналіз повзучості лопатки газотурбінного двигуна. Повзучість є одним із найнебезпечніших видів деформування в умовах експлуатації лопаток турбін. В процесі вивчення проблематики оцінки міцності турбінних лопаток авіаційних двигунів та енергетичних установ, особливу увагу слід приділити дослідженню перерозподілу напружень при повзучості. Характеристики кристаліграфічних структур сучасних лопаток турбін мають дуже значний вплив на проходження процесу розвитку тріщин на деталі в процесі роботи двигуна. На сьогоднішній день, турбінні лопатки виготовляються методом монокристалічного лиття. Такий тип структури матеріалу лопаток характеризує ортотропні механічні властивості. У цьому дослідженні розглядається модель стаціонарної повзучості для анізотропного жароміцного монокристалічного сплаву з кубічною симетрією. Авторами проведено чисельне моделювання параметрів матеріалу з використанням відомих літературних властивостей повзучості монокристалів. Описано алгоритм, який дозволяє визначити деякі характеристики повзучості монокристалів. Параметри наведених співвідношень можна отримати після проведення прямих експериментів, або базуючись на мікротехнічному аналізі, на прикладі композиційних матеріалів. Авторами проведено розрахунок констант повзучості типового жароміцного монокристалічного сплаву в результаті апроксимації його кривих повзучості, які були отримані в результаті проведення експерименту. На основі рівняння Нортон-Бейлі та використовуючи розрахунковий комплекс Maple Release 2021.0, було побудовано графік залежності швидкості деформації повзучості від рівня прикладеного до матеріалу навантаження, а також визначено мінімальну швидкість деформації та константи повзучості. Результати обчислень були застосовані для скінчено-елементного моделювання повзучості на прикладі твердотільної моделі лопатки турбіни високого тиску. На базі комплексу ANSYS Workbench проведено декілька серій розрахунків, зокрема, обчислення пружної задачі при навантаженні деталі відцентровими силами, а також накопиченню деформацій повзучості при різному часі дії впливу. Побудовано графіки зміни еквівалентних напружень та деформацій повзучості в залежності від часу.

Ключові слова: стаціонарна повзучість, лопатки турбін, анізотропія, монокристалічний сплав, закон Нортон, скінчено-елементний аналіз.

The article is devoted to the creep model of a monocrystalline alloy and the development of a methodology for identifying material parameters based on the results of physical experiments. A finite element analysis of the creep of a gas turbine engine blade was performed. Creep is one of the most dangerous types of deformation in the operating conditions of turbine blades. In the process of studying the problems of assessing the strength of turbine blades of aircraft engines and power plants, special attention should be paid to the study of stress redistribution during creep. The characteristics of the crystallographic structures of modern turbine blades have a very significant influence on the progress of the crack development process during engine operation. To date, turbine blades are manufactured by the method of single-crystal casting. This type of blade material structure is characterized by orthotropic mechanical properties. This study considers the steady-state creep model of an anisotropic heat-resistant single-crystal alloy with cubic symmetry. The authors carried out a numerical simulation of the material parameters using the well-known literary creep properties of single crystals. An algorithm is described that allows you to determine some creep characteristics of single crystals. The parameters of the given ratios can be obtained after conducting direct experiments, or based on micromechanical analysis, using the example of composite materials. The authors calculated the creep constants of a typical heat-resistant monocrystalline alloy as a result of the approximation of its creep curves, which were obtained experimentally. Based on the Norton-Bailey equation and using the Maple Release 2021.0 calculation complex, a graph of the dependence of the rate of creep deformation on the level of load applied to the material was plotted, and the minimum rate of deformation and creep constants were also determined. The results of the calculations were used for finite-element simulation of creep on the example of a solid-state model of a high-pressure turbine blade. Several series of calculations were carried out on the basis of the ANSYS Workbench complex, in particular, the calculation of the elastic problem when the blade is loaded by centrifugal forces, as well as the accumulation of creep deformations at different exposure times. Graphs of the change in equivalent stresses and creep deformations as a function of time are plotted.

Keywords: steady-state creep, turbine blades, anisotropy, monocrystalline alloy, Norton's law, finite-element analysis.

Вступ. Один із найнебезпечніших видів пошкодження лопаток турбін – це руйнування при повзучості. Повзучість – це прогресивна залежність від часу непружної деформації при високій температурі та механічному навантаженні. Процес повзучості супроводжується багатьма різними мікроструктурними перебудовами, включаючи рух дислокацій, кавітацію меж зерен та старіння мікроструктури [1].

Якщо до зразка, виготовленого з певного матеріалу, прикласти розтягуюче навантаження, яке створює постійне напруження, з плином часу він буде повільно деформуватися.

На початковій стадії такий зразок зазнає миттєвої деформації ϵ_0 . В подальшому він проходить через три стадії: 1-стадія нестационарної повзучості, яка проходить зі зменшенням швидкості деформації з плином часу, 2-стадія стаціонарної повзучості, коли швидкість деформації повзучості постійна, 3-стадія прискореної повзучості, яка характеризується

збільшенням швидкості деформації повзучості і завершується руйнуванням. Більшість матеріалів зазвичай мають більш виражену другу стадію повзучості, оскільки швидкість повзучості стає постійною дуже швидко і зберігає це значення протягом тривалого часу. Саме тому, у даному дослідженні особлива увага приділяється стаціонарній (другій) стадії повзучості.

Літературний огляд. Моделювання анізотропної повзучості та принципи анізотропної повзучості матеріалу обговорюються деяких книгах з механіки повзучості, представлених Хіллом [2] та Мізесом [3] і сучасними авторами [4-6]. Складність моделювання процесів повзучості обумовлена нелінійністю фізичних залежностей та значним відхиленням (в межах 20% або більше) одержуваних з випробувань на повзучість експериментальних результатів. Важливість моделювання анізотропної повзучості матеріалів та структур обговорюється у багатьох публікаціях, таких як [7-10].

У джерелах [11-13] зроблено огляд основних причин руйнування лопаток турбін та наведено прикладі таких явищ із експлуатації. Особлива увага приділена дослідженню пошкоджуваності лопаток від найнебезпечнішого впливу – процесу повзучості. У публікаціях [14,15] мова ведеться про руйнування при повзучості лопаток. Пропонується використовувати чисельний підхід до оцінки терміну служби лопатки турбіни на основі моделі пошкоджуваності від повзучості Lemaitre-Chaboche. Дослідження [16,17] висвітлюють дуже цікавий підхід виявлення впливу високотемпературної повзучості на радіальний робочий зазор між кінчиками лопаток турбін високого тиску авіаційних двигунів. Для вирішення такої задачі пропонується використання розподіленої узагальненої регресійно- екстремумальної нейронної мережі, щоб покращити аналіз надійності визначення зазору кінчика лопатки з поведінкою повзучості з точки зору точності моделювання та ефективності моделювання. У цьому методі узагальнена нейронна мережа екстремуму використовувалася для обробки перехідних процесів шляхом спрощення response-процесу та для відслідковування сильної нелінійності за допомогою її здатності нелінійного відображення. Авторами публікацій [18,19] розроблено та описано модель оцінки пошкоджень, яку можна використовувати для прогнозування терміну служби лопаток турбін під навантаженням від втоми та повзучості як в ізотермічних, так і в умовах змінної температури. Ця модель базується на ретельному визначенні основних фізичних механізмів, які беруть участь у процесі пошкодження одиничного мікроструктурного елемента.

Експериментальні результати повзучості монокристалічних матеріалів [19-21] показують значну анізотропію поведінки повзучості для зразків з різною орієнтацією з урахуванням кристалографічних осей монокристалу.

Модель повзучості монокристалічного сплаву.

Розглянемо модель повзучості монокристалічного сплаву, з механічними властивостями притаманними ортотропному матеріалу з кубічною симетрією. При побудові фізичних рівнянь на другій стадії повзучості застосовано гіпотезу про існування потенціалу для швидкостей деформацій повзучості:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial W}{\partial \sigma}, \quad (1)$$

де W – питома міцність розсіювання енергії при повзучості.

Ця міцність повинна бути інваріантною відносно поворотів системи координат, тобто має залежити від сумісних інваріантів тензора напружень та тензора властивостей матеріалу. В якості такої характеристики вводиться еквівалентне напруження, за допомогою якого задається потенціал повзучості:

$$W(\sigma) = W(\sigma_{eq}(\sigma)). \quad (2)$$

Представимо, аналогічно [4], еквівалентне напруження для повзучості анізотропних матеріалів з використанням тензора четвертого рангу:

$$\sigma_{eq}^2 = \sigma \cdot \cdot {}^{(4)}B \cdot \cdot \sigma. \quad (3)$$

Тензор четвертого рангу ${}^{(4)}B$ з фізичних міркувань повинен бути позитивно визначеним:

$$a \cdot \cdot {}^{(4)}B \cdot a \geq 0, \quad (4)$$

та задовольняти наступним умовам симетрії

$$a \cdot \cdot {}^{(4)}B = {}^{(4)}B \cdot a, \quad c \cdot \cdot {}^{(4)}B = 0. \quad (5)$$

де a та c – тензори другого рангу

$$\forall a, c \text{ with } a = a^T, \quad c = -c^T. \quad (6)$$

В залежності від виду симетрії матеріалу кількість незалежних компонент тензора ${}^{(4)}B$ зменшується. Додаткові обмеження з'являються при умові нестисливості матеріалу. Для ортотропних матеріалів з кубічною симетрією кількість незалежних компонентів тензора ${}^{(4)}B$ зменшується до трьох.

При використанні прямокутної декартової системи координат, напрямки осей якої співпадають з кристалографічними напрямками кубічного монокристалу, еквівалентне напруження (3) запишемо у компонентному вигляді:

$$\sigma_{eq}^2 = \sigma_{ij} \cdot b_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}, \quad (7)$$

де $i, j, k, l = 1, 2, 3$.

Існує багато можливостей для задання вигляду залежності потенціалу повзучості від еквівалентного напруження. Досить поширеним є використання ступеневого закону Нортона. Для зручнішої подальшої ідентифікації параметрів прийнемо потенціал повзучості в наступному вигляді:

$$W = \frac{1}{n+1} \sigma_{eq}^{n+1}. \quad (8)$$

Тоді залежність компонентів тензора швидкості деформацій повзучості від напружень набуває вигляду:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \sigma_{eq}^{n-1} \cdot b_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}. \quad (9)$$

Природним способом визначення параметрів теоретичної моделі матеріалу є проведення необхідної кількості базових експериментів. Чисельна обробка експериментів з повзучості з використанням відомих літературних характеристик повзучості монокристалічних сплавів є альтернативною можливістю отримання необхідних даних.

Методика ідентифікації параметрів матеріалу за визначеною моделлю повзучості монокристалічного сплаву. Якщо розглянути швидкість стаціонарної повзучості $\dot{\epsilon}_{11}^1, \dot{\epsilon}_{11}^2$, наприклад по кристалографічному напрямку [100], коли матеріал розтягується двома різними рівнями напружень $\sigma_{11}^1, \sigma_{11}^2$, то для визначення констант n та b_{1111} доречним є використання наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} \lg \dot{\epsilon}_{11}^1 &= \lg b_{1111} + n \lg \sigma_{11}^1, \\ \lg \dot{\epsilon}_{11}^2 &= \lg b_{1111} + n \lg \sigma_{11}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

З рівнянь (5) обчислюються константи повзучості:

$$n = \frac{\lg \frac{\dot{\epsilon}_{11}^1}{\dot{\epsilon}_{11}^2}}{\lg \frac{\sigma_{11}^1}{\sigma_{11}^2}}, b_{1111} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_{11}^1}{(\sigma_{11}^1)^n} \right) \quad (11)$$

Аналогічним способом, вираховуючи швидкість стаціонарної повзучості для двох інших напрямків можна знайти наступні параметри:

$$b_{2222} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_{22}^1}{(\sigma_{22}^1)^n} \right), b_{3333} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_{33}^1}{(\sigma_{33}^1)^n} \right) \quad (7)$$

Крім того, при зсувах в координатних площинах $x_i x_j$, з використанням розрахункових даних швидкостей стаціонарної повзучості можна визначити ще декілька констант:

$$b_{1212} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_{12}^1}{(\sigma_{12}^1)^n} \right), b_{2323} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_{23}^1}{(\sigma_{23}^1)^n} \right), b_{3131} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_{31}^1}{(\sigma_{31}^1)^n} \right) \quad (8)$$

Підводячи підсумок, можна стверджувати, що описаний вище алгоритм дозволяє визначити всі властивості повзучості монокристалу. Параметри повзучості установчих співвідношень можна знайти в результаті прямих фізичних експериментів або на основі мікромеханічного аналізу [22], наприклад, як у випадку композиційних матеріалів.

Результати апроксимації експериментальних кривих повзучості типового монокристалічного сплаву. Початковою точкою обчислень є припущення, що швидкість деформації повзучості можна представити у вигляді добутку двох окремих функцій температури та напруження [4]:

$$\dot{\epsilon}_{eq}^{cr} = f_{\sigma}(\sigma_{eq}) f_T(T) \quad (9)$$

Функція температури у співвідношенні (9) може бути представлена законом Арреніуса:

$$f_T(T) = \exp[-Q / RT] \quad (10)$$

Приймаючи температуру постійною величиною, рівняння еквівалентної швидкості деформації повзучості можна виразити рівнянням Нортона-Бейлі:

$$\dot{\epsilon}_{eq}^{cr} = k \sigma_{eq}^n \quad (11)$$

де k та n – константи повзучості матеріалу.

У випадку монокристала з кубічною симетрією при розтягненні вздовж кристалографічних осей $k = b_{1111} = b_{2222} = b_{3333}$.

Проведемо розрахунок швидкості деформації повзучості на стаціонарній стадії для експериментальних кривих повзучості [23] типового жароміцного монокристалічного сплаву (див. рис.1).

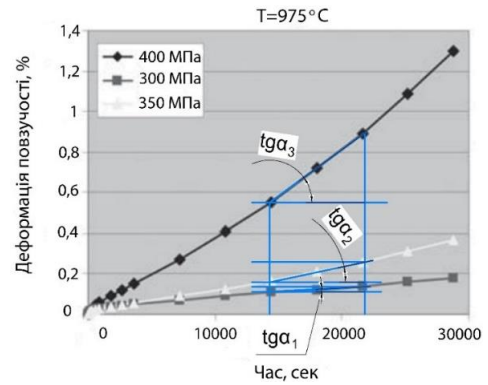


Рисунок 1 – Експериментальні криві повзучості типового жароміцного сплаву

Використовуючи наявні експериментальні відомості, для знаходження параметрів повзучості з рівняння Нортона-Бейлі, можна скористатися методом найменших квадратів. Виділяємо ділянки з постійною швидкістю деформації повзучості. Наступним кроком є обчислення мінімальних швидкостей деформації повзучості $\dot{\epsilon}_{min1}^{cr}, \dot{\epsilon}_{min2}^{cr}, \dot{\epsilon}_{min3}^{cr}$, які відповідають трьом рівням прикладеного навантаження із графіку кривих повзучості:

$$\dot{\epsilon}_{min i}^{cr} = \text{tg} \alpha_i \quad (12)$$

Отримуємо рівняння, яке є результатом логарифмування рівняння Нортона-Бейлі:

$$\dot{\epsilon}_{min}^{cr} = k \sigma^n \Rightarrow \lg \dot{\epsilon}_{min}^{cr} = \lg k + n \cdot \lg \sigma \quad (13)$$

Ступеневе співвідношення (13) можна привести до вигляду лінійного наступним чином:

$$y_i = \lg \dot{\epsilon}_{min i}^{cr}; a = \lg k; x_i = \lg \sigma_i \quad (14)$$

$$y = a + n \cdot x.$$

В результаті обчислень отримуємо шукані константи повзучості $n \approx 9$ та $k \approx 2 \cdot 10^{-30} \frac{1}{\text{сек}} (\text{МПа})^{-n}$ і будуємо графік залежності мінімальної швидкості деформації повзучості від прикладеного навантаження (див. рис. 2). Усі розрахунки та побудови виконувалися з допомогою програмного забезпечення Maple Release 2021.0.

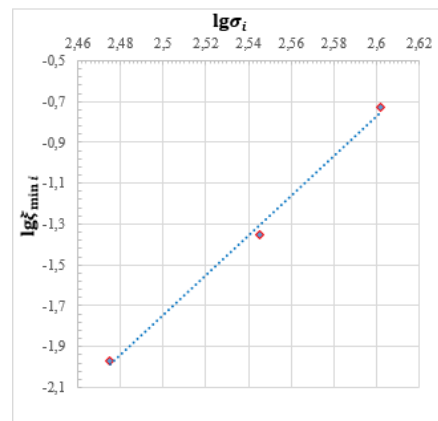


Рисунок 2 – Графік залежності мінімальної швидкості деформації повзучості на стаціонарній стадії від напруження

Моделювання процесу повзучості лопатки турбіни у ANSYS Workbench. На прикладі моделі охолоджуваної лопатки турбіни, проведено розрахунки деформації в процесі повзучості. Твердотільна 3D-модель лопатки побудована з використанням потужностей графічного комплексу NX, скінчено-елементна модель створена у ANSYS Workbench (див. рис. 3).

Скінчено-елементна сітка побудована методом Patch Conforming, для її генерації використовувався об'ємний просторовий елемент Tetrahedron (тип – SOLID187). Розмір елемента – 0,5 мм, точність та якість побудови сітки – 0,95. Кількість елементів розрахункової скінчено-елементної моделі – 217555 (333831 вузлів).

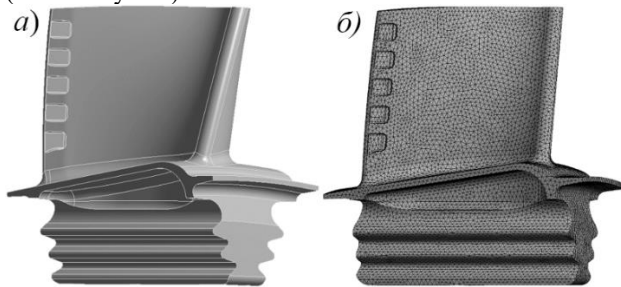


Рисунок 3 – 3D-модель лопатки турбіни:
а – твердотільна; б – скінчено-елементна

Значення густини матеріалу, яке застосовувалося при розрахунках – $8,75 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³. В зв'язку з відсутністю повних експериментальних даних по повзучості монокристалічного сплаву, розрахунки повзучості виконані по моделі ізотропного матеріалу. Початковим етапом було проведення пружного розрахунку лопатки, де в якості граничних умов виступали:

– обмеження переміщень на площинах, що контактують з диском турбіни;

– відцентрова сила, задана по X-компоненті, частота обертів – $N = \text{const} = 50000$ об/хв.

Результати розрахунку приведені на рис. 4. Наступним кроком скінчено-елементного моделювання був розрахунок повзучості. В якості вихідних даних для обчислення повзучості було прийнято використовувати, як зазначено раніше, закон Нортон. В ANSYS Workbench цей закон прийнято у вигляді наступного рівняння:

$$\dot{\epsilon}_{\text{eq}}^{\text{cr}} = C_1 \sigma_{\text{eq}}^{C_2} e^{-C_3/T}, \quad (15)$$

де C_1, C_2, C_3 – константи повзучості.

Параметри повзучості були розраховані за наявними експериментальними даними і дорівнюють $C_1 = 2 \cdot 10^{-30}$; $C_2 = 9$. Коефіцієнт $C_3 = 0$ при постійній температурі на лопатці ($T = \text{const}$). Час дії повзучості було прийнято рівним 20000 секунд. Результати обчислень можна спостерігати на рис. 5.

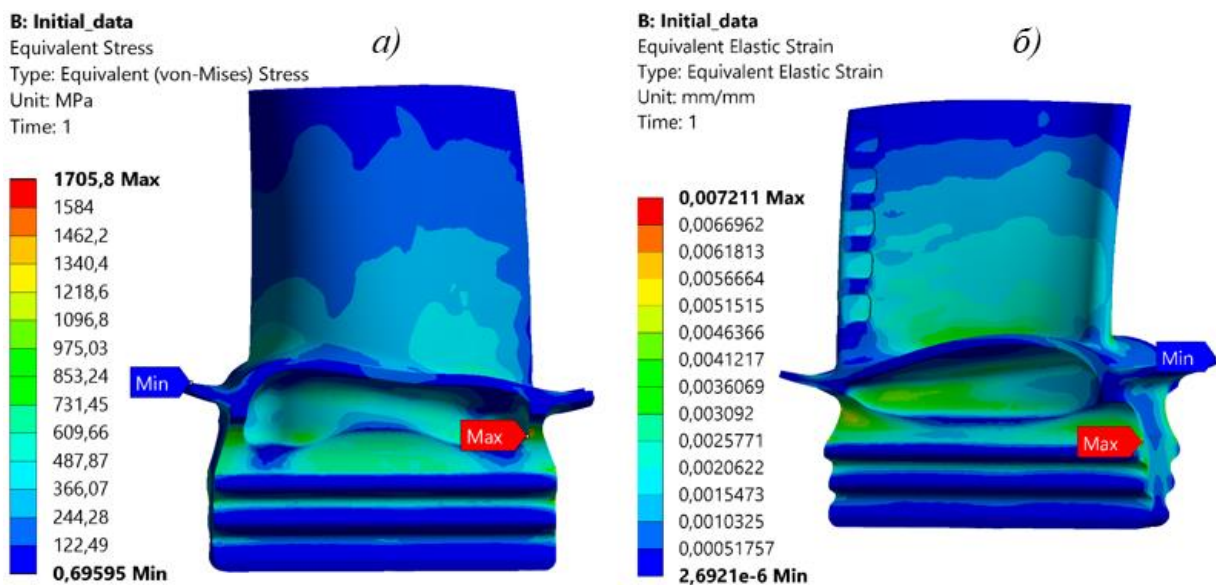


Рисунок 4 – Результати пружного розрахунку:
а – еквівалентні напруження; б – еквівалентні пружні деформації

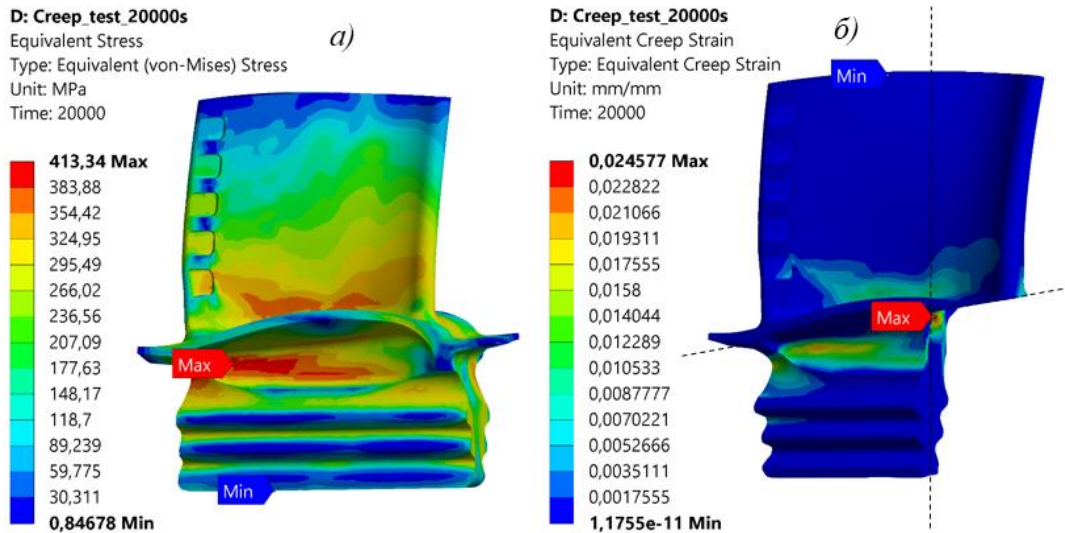


Рисунок 5 – Результати розрахунку повзучості:
а – еквівалентні напруження; б – еквівалентні деформації повзучості

З отриманих результатів видно, що при повзучості напруження у зонах їх концентрації знижуються, а у інших зонах поперечного перерізу підвищуються під дією постійної розтягуючого навантаження від відцентрових сил. Після завершення стадії перерозподілу напружень настає стан стаціонарної повзучості, при якому напруження в лопатці залишаються постійними, а деформації повзучості, при цьому, зростають пропорційно часу.

Для демонстрації залежності зміни еквівалентних напружень та деформацій повзучості з плином часу, розглянемо локальний елемент в одній з найбільш навантажених зон на лопатці, зі сторони спинки на радіусі переходу пера у трактоутворюючу полицю. Для цього було обрано місце з найбільшими локальними навантаженнями (вузол 5575), як показано на рис. 6 та рис. 7.

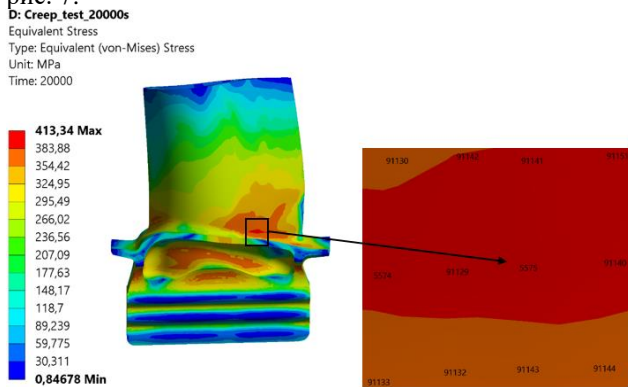


Рисунок 6 – Еквівалентні напруження у вузлі 5575

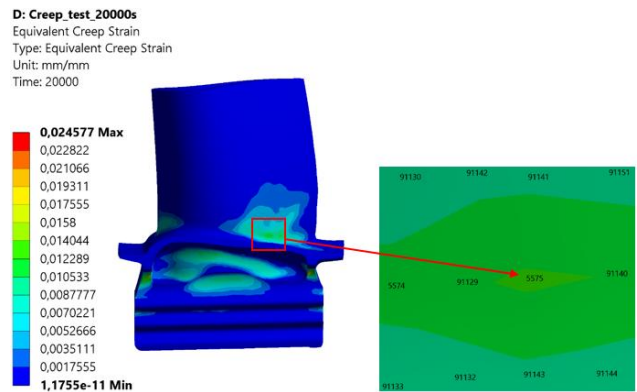


Рисунок 7 – Деформації повзучості у вузлі 5575

На рис. 8 та рис. 9 зображено графіки зміни напружень та деформацій при повзучості в залежності від часу дії навантаження.

Еквівалентні напруження (по Мізесу)
у вузлі 5575

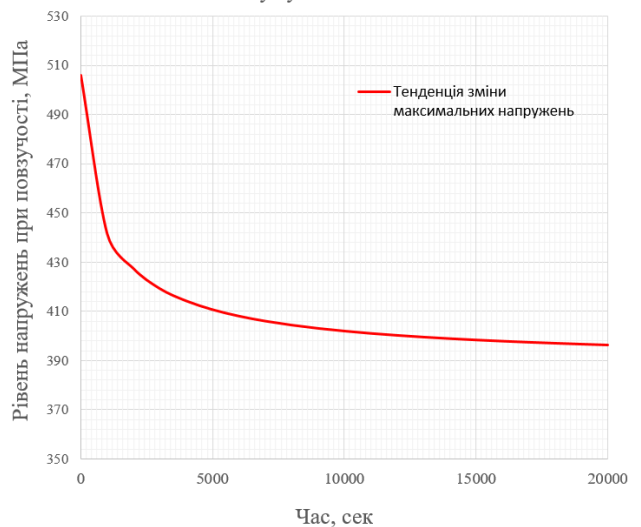


Рисунок 8 – Графік зміни еквівалентних напружень з плином часу у вузлі 5575

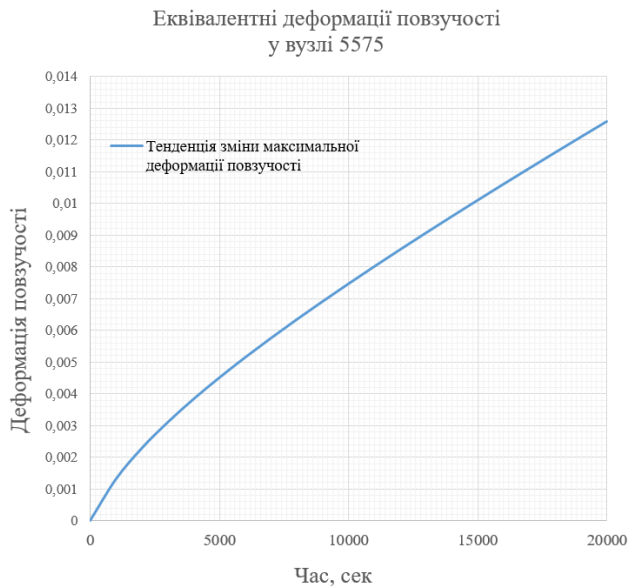


Рисунок 9 – Графік зміни еквівалентних деформацій повзучості з плином часу у вузлі 5575

Висновки. Алгоритм, описаний у цьому матеріалі, дозволяє визначити характеристики повзучості анізотропного монокристалу та виконати чисельний аналіз повзучості турбінної лопатки.

Як приклад визначення властивостей повзучості матеріалу наведено визначення характеристик типового жароміцного монокристалічного сплаву. На основі експериментальних кривих повзучості та з використанням обчислювального комплексу Maple було визначено константи повзучості закону Нортона та побудовано графік залежності швидкості деформації повзучості від рівня напружень.

З використанням визначених констант для стадії стаціонарної повзучості, у ANSYS Workbench було проведено розрахунок повзучості на прикладі моделі лопатки турбіни високого тиску. Як результат, з'ясовано, що з настанням стадії стаціонарної повзучості деформації постійно зростають, а максимальні напруження зменшуються. Розподіл напружень в стадії стаціонарної повзучості є основою для заснування критеріїв довготривалої міцності лопаток газових турбін.

Список літератури

- Liu, D., Li, H., Liu, Y. Numerical simulation of creep damage and life prediction of superalloy turbine blade. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, pp. 1-10.
- Hill, R. The Mathematical Theory of Plasticity. *Materials Research and Engineering*. Oxford University Press, London, 1950, 250 p.
- Von Mises, R. Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen. *ZAMM*, 1928, vol. 8, no. 3, pp. 161-185.
- Altenbach, H., Altenbach, J., Naumenko, K. Ebene Flächentragwerke. *Springer*, Berlin, 1998, pp. 10-25.
- Burlakov, A.V., Morachkovskii, O.K. Deformation and initial anisotropy in creep. *Strength of Materials*, 1973, vol.5, pp. 724-727.
- Breslavskii, D.V., Metelev, V.A., Morachkovskii, O.K. Anisotropic creep and damage in structural elements under cyclic loading. *Strength of Materials*, 2015, vol. 47(2), pp. 235-241.
- Kolagar, A.M., Tabrizi, N., Cheraghzadeh, M., Shahriari, M.S. Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 8, pp. 61-68.

8. 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 Technology*, 2016, vol. 49, pp. 289-300.

9. Naumenko, K., Altenbach, H. Modeling of Creep for Structural Analysis. *Springer*, Berlin, 2007, pp. 5-17.

10. Naga, V., Bhushana, R., Niranjan Kumar, I.N., Bala P.K., Madhulata N., Gurajaru N. Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine engine – an overview. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2014, vol. 10(8), pp. 48-57.

11. Donghuan, L., Haisheng, L., Yinghua, L., Numerical Simulation of Creep Damage and Life Prediction of Superalloy Turbine Blade. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 1, pp. 1-10.

12. 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.

13. Mackerle, J. Creep and creep fracture/damage finite element modelling of engineering materials and structures: an addendum. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, vol. 81, no. 5, pp. 381-392.

14. Salam, I., Tauqir, A., Khan, A.Q. Creep-fatigue failure of an aero engine turbine blades. *Engineering Failure Analysis*, 2002, vol. 9, pp. 335-347.

15. Zhang, C.-Y., Wei, J.-S., Wang, Z., Yuan Z.-S., Fei, C.-W., Lu C. Creep-Based Reliability Evaluation of Turbine Blade-Tip Clearance with Novel Neural Network Regression. *Materials*, 2019, vol. 12, pp. 3552-3573.

16. Carter, T.J. Common failures in gas turbine blades. *Engineering Failure Analysis*, 2005, vol. 12, pp. 237-247.

17. Koster, Alain & Alam, Rémy, L. A physical-base model for life prediction of single crystal turbine blades under creep-fatigue loading and thermal transient conditions. *European Structural Integrity Society*, 2002, vol. 29, pp. 203-212.

18. Remy, L., et al. Effects of microstructure in high temperature fatigue: Lifetime to crack initiation of a single crystal superalloy in high temperature low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 57, pp. 37-49.

19. Xu, K., Wang, G., Liu, J., Li, J., Liu, J., Wang, X., Yang, Y., Ye, L., Zhou, Y., Sun, X. Creep behavior and a deformation mechanism-based creep rate model under high temperature and low stress condition for single crystal superalloy DD5. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 786, pp. 1-10.

20. Неманежин, С.О., Львов, Г.І., Торба Ю.І. Методика визначення характеристик сталюї повзучості монокристалічного сплаву. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2022, №4-2 (182), стор. 42-49.

21. Shi, S., Li, Y., Yan, Z., Yang, S., Ju, Y. Crystal plasticity phase-field simulation of slip system anisotropy during creep of Co-Al-V monocrystal alloy under multidirectional strain. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, vol. 227.

22. Altenbach, H., Lvov, G., Lvov, I., Morachkovsky, O. The Use of the Homogenization Method in the Analysis of Anisotropic Creep in Metal-Matrix Composites. In: Altenbach H., Beitelshmidt M., Kästner M., Naumenko K., Wallmersperger T. (eds) *Material Modeling and Structural Mechanics. Advanced Structured Materials*. Springer, Berlin, 2022, vol. 161, pp. 1-18.

23. Магеррамова, Л.А., Васильев, В.Е. Влияние азимутальной ориентации в монокристаллических лопатках высокотемпературных газовых турбин на их напряженно-деформированное состояние и прочность. *Вестник УГАТУ*, 2011, стр. 54-58.

References(transliterated)

- Liu, D., Li, H., Liu, Y. Numerical simulation of creep damage and life prediction of superalloy turbine blade. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, pp. 1-10.
- Hill, R. The Mathematical Theory of Plasticity. *Materials Research and Engineering*. Oxford University Press, London, 1950, 250 p.
- Von Mises, R. Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen. *ZAMM*, 1928, vol. 8, no. 3, pp. 161-185.
- Altenbach, H., Altenbach, J., Naumenko, K. Ebene Flächentragwerke. *Springer*, Berlin, 1998, pp. 10-25.
- Burlakov, A.V., Morachkovskii, O.K. Deformation and initial anisotropy in creep. *Strength of Materials*, 1973, vol.5, pp. 724-727.
- Breslavskii, D.V., Metelev, V.A., Morachkovskii, O.K. Anisotropic creep and damage in structural elements under cyclic loading. *Strength of Materials*, 2015, vol. 47(2), pp. 235-241.

7. Kolagar, A.M., Tabrizi, N., Cheraghzadeh, M., Shahriari, M.S. Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 8, pp. 61-68.
8. 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 Technology*, 2016, vol. 49, pp. 289-300.
9. Naumenko, K., Altenbach, H. Modeling of Creep for Structural Analysis. *Springer*, Berlin, 2007, pp. 5-17.
10. Naga, V. Bhushana, R., Niranjana Kumar, I.N., Bala P.K., Madhulata N., Gurajara N. Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine engine – an overview. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2014, vol. 10(8), pp. 48-57.
11. Donghuan, L., Haisheng, L., Yinghua, L., Numerical Simulation of Creep Damage and Life Prediction of Superalloy Turbine Blade, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 1, pp. 1-10.
12. 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.
13. Mackerle, J. Creep and creep fracture/damage finite element modelling of engineering materials and structures: an addendum, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, vol. 81, no. 5, pp. 381-392.
14. Salam, I., Tauqir, A., Khan, A.Q. Creep-fatigue failure of an aero engine turbine blades. *Engineering Failure Analysis*, 2002, vol. 9, pp. 335-347.
15. Zhang, C.-Y., Wei, J.-S., Wang, Z., Yuan Z.-S., Fei, C.-W., Lu C. Creep-Based Reliability Evaluation of Turbine Blade-Tip Clearance with Novel Neural Network Regression. *Materials*, 2019, vol. 12, pp. 3552-3573.
16. Carter, T.J. Common failures in gas turbine blades. *Engineering Failure Analysis*, 2005, vol. 12, pp. 237-247.
17. Koster, Alain & Alam, Rémy, L. A physical-base model for life prediction of single crystal turbine blades under creep-fatigue loading and thermal transient conditions. *European Structural Integrity Society*, 2002, vol. 29, pp. 203-212.
18. Remy, L., et al. Effects of microstructure in high temperature fatigue: Lifetime to crack initiation of a single crystal superalloy in high temperature low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 57, pp. 37-49.
19. Xu, K., Wang, G., Liu, J., Li, J., Liu, J., Wang, X., Yang, Y., Ye, L., Zhou, Y., Sun, X. Creep behavior and a deformation mechanism-based creep rate model under high temperature and low stress condition for single crystal superalloy DD5. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 786, pp. 1-10.
20. Nemaneshyn, Ye.O., Lvov, G.I., Torba, Yu.I. Metodyka vyznachenja harakterystyk staloi' povzuchosti monokystalichnogo splavu [A method for determining the characteristics of the steady creep of single-crystal alloys]. *Aerospace technic and technology*, 2022, vol. 4-2, no. 182, pp. 42-49.
21. Shi, S., Li, Y., Yan, Z., Yang, S., Ju, Y. Crystal plasticity phase-field simulation of slip system anisotropy during creep of Co-Al-V monocystal alloy under multidirectional strain. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, vol. 227.
22. Altenbach, H., Lvov, G., Lvov, I., Morachkovsky, O. The Use of the Homogenization Method in the Analysis of Anisotropic Creep in Metal-Matrix Composites. In: Altenbach H., Beitelshmidt M., Kästner M., Naumenko K., Wallmersperger T. (eds) *Material Modeling and Structural Mechanics. Advanced Structured Materials*. Springer, Berlin, 2022, vol. 161, pp. 1-18.
23. Magerramova, L.A., Vasilyev, B.Ye. Vliyaniye azimutalnoy oriyentatsii v monokristallicheskih lopatkakh vysoko-temperaturnykh gazovykh turbin na ikh napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye i prochnost [Influence of azimuthal orientation in single-crystal blades of high-temperature gas turbines on their stress-strain state and strength]. *Vestnik UGATU*, 2011, pp. 54-58.

Відомості про авторів / About authors

Неманешин Євген Олександрович (Nemaneshyn Yevhen) – аспірант кафедри «Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», інженер-дослідник ДП «Івченко-Прогрес», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5855-508X>; e-mail: Yevhen.Nemaneshyn@infiz.khpi.edu.ua.

Львов Геннадій Іванович (Lvov Gennadiy) – д-р техн. наук, професор кафедри «Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії», академік Академії наук вищої школи України, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-9227>; e-mail: Lvovdpm@ukr.net.

Торба Юрій Іванович (Torba Yuriy) – канд. техн. наук, начальник Експериментально-випробувального комплексу ДП «Івченко-Прогрес», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8470-9049>; e-mail: TorbaYuI@zmdb.ua.