

УДК 539.3

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦІЙ

В.В. Валер¹,
аспірант

С.О. Пискунов,
д-р техн. наук, професор

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

У роботі розглянуто вплив режимів нагріву на розвиток температурних напружень, що є важливим для об'єктів, які знаходяться під впливом високих температур (ротори, лопатки турбін та їх хвостовики). Представлені вихідні співвідношення нестационарної задачі теплопровідності та задачі термопружності. Проведено кількісну оцінку впливу вибору режиму нагріву на температурну складову напружено-деформованого стану з'єднання хвостовика лопатки із застосуванням спрощеної геометричної схеми.

Ключові слова: режим нагріву, криві запуску, нестационарна теплопровідність, термопружності, плоска задача, хвостовик лопатки.

Вступ. Деталі турбомашин вступають в безпосередній контакт з газами, які знаходяться на піку їх температури. Внаслідок зміни температури та зовнішніх силових впливів виникає неоднорідне розподілення температури в об'ємі деталі. Ці фактори сприяють розвитку температурних напружень. Як відомо, температурні напруження в матеріалах зумовлені температурними градієнтами та граничними умовами. Однак при проектуванні і визначенні несучої здатності елементів конструкцій турбомашинобудування також необхідно враховувати інші фактори, зокрема режим нагріву.

Під час циклів нагріву і охолодження розвиваються найбільші температурні напруження. При цьому найбільші значення температурних градієнтів і напружень виникають у досить короткий проміжок часу, який відповідає зокрема пусковим режимам турбомашин, що може в свою чергу викликати температурну втому матеріалу. Одним із факторів, що визначає виникнення температурних напружень є характер змінення температури в процесі запуску, що визначається так званою кривою запуску турбомашини. Крива запуску (стартова крива) – це залежність швидкості обертання ротора турбомашини або температури газів від часу. Роботи [1, 2, 3] показують, що стартові криві впливають на розподілення температурних напружень та довговічність деталей турбіни. Особливо важливо це для таких деталей як лопатки та хвостовики лопаток. Зважаючи, що деталі турбомашин мають витримувати значну кількість циклів запуску стає необхідним проведення як температурного, так і механічного аналізу.

Традиційно виділяють три види кривих запуску: гарячий запуск, теплий запуск та холодний запуск. Модифікацією кривих запуску можна досягнути зменшення температурних напружень та збільшення довговічності деталі при експлуатації у середовищі газів ідентичної температури.

Метою даної роботи є дослідження впливу характеру зміни зовнішньої температури (кривих запуску) на зміну параметрів напружено-деформованого стану хвостовика лопатки газової турбіни при термопружному деформуванні із урахуванням нестационарного розподілення температур. Для проведення чисельного аналізу використані спрощені двовимірні моделі хвостовика лопатки.

Вихідні співвідношення задачі теплопровідності. Температурне поле неоднорідного тіла при відсутності внутрішніх джерел тепла описується диференціальним рівнянням [4]:

$$\operatorname{div}(\lambda \nabla T) = C \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1)$$

В криволінійній системі координат x^α [5] покомпонентна форма диференціального рівняння (1) приймає вигляд [6]:

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left(\lambda g^{\alpha\beta} \sqrt{g} \frac{\partial T}{\partial x^\beta} \right) = C \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2)$$

Для забезпечення однозначності розв'язання рівняння (2) вводяться відповідні початкові та граничні умови. За початкові умови приймається відоме розподілення температур по тілу у фіксований момент часу t_0 , що являє собою початкову часову координату:

$$T(x^\alpha, t_0) = T_0(x^\alpha), \quad x^\alpha \in L, \quad (3)$$

де $T_0(x^\alpha)$ - задана функція координат.

Диференціальне рівняння (2) з початковими умовами (3) та граничними умовами першого та третього роду є еквівалентним варіаційному рівнянню двовимірної задачі нестационарної теплопровідності [7]:

$$\delta\chi = \int_S \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x^\alpha} \frac{\partial \delta T}{\partial x^\beta} g^{\alpha\beta} \right) \sqrt{g} dL + \int_L \alpha (T - \theta) \delta T dL - \int_S C \frac{\partial T}{\partial t} \delta T \sqrt{g} dL. \quad (4)$$

Методика розв'язання задачі і її апробація наведені у [8].

Вихідні співвідношення задачі термовязкопружнопластичності. В загальному випадку при наявності незворотних деформацій зв'язок між напруженнями і деформаціями визначається на основі співвідношень теорії пластичного течіння [9]. В цьому випадку прирощення повних деформацій $d\varepsilon_{ij}$ може бути подане сумою прирощень пружних $d\varepsilon_{ij}^e$ і температурних $d\varepsilon_{ij}^t$ деформацій та прирощень деформацій пластичності $d\varepsilon_{ij}^p$:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^t. \quad (5)$$

Передбачається, що пружні деформації є малими. Повні напруження σ^{ij} визначаються через компоненти тензора пружних деформацій відповідно до узагальненого закону Гука:

$$\sigma^{ij} = C^{ijkl} \varepsilon_{kl}^e = [\mu(g^{jl} g^{ik} + g^{il} g^{jk}) + \lambda \cdot g^{ij} g^{kl}], \quad (6)$$

де коефіцієнти Ляме λ та μ визначаються через коефіцієнт Пуассона $\nu = \nu(z^i, T)$ і модуль пружності матеріалу (модуль Юнга) $E = E(z^i, T)$, що залежать від температури T :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

Температурні деформації малі і визначаються формулою:

$$\varepsilon_{ij}^t = \beta^t g^{ij}, \quad (8)$$

де $\beta^t = \beta^t(T)$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення.

Прирошення пластичних деформацій визначається згідно з асоційованим законом:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda_p \frac{\partial f_p}{\partial s_{ij}} = \lambda_p s_{ij}, \quad (9)$$

де $f_p = \frac{1}{2} s_{ij} s^{ij} - [\tau_s(\vartheta_p, T)]^2 = 0$ – функція текучості; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_0 \delta_{ij}$ – компоненти девіатора напружень; $\sigma_0 = \sigma_{ii}$, $\tau_s(\vartheta_p, T)$ – межа текучості при чистому зсуві; $\vartheta_p = \int_{\varepsilon_{ij}^p} \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon^{ij p}}$ – параметр зміцнення Одквіста.

Розв'язувальні співвідношення і алгоритми для задач термопружнопластичності наведені у роботі [11].

Дослідження впливу кривої запуску на характер розподілення температурних напружень. Розглянемо ялинкове з'єднання хвостовика лопатки турбіни під впливом температури (рис. 1). Для попереднього аналізу розподілення температурних напружень під час нагріву, який описується типовими кривими запуску (гарячий T1, теплий T2 та холодний T3 режими нагріву), наведеними на рис. 2, в першому наближенні з'єднання можна апроксимувати суцільним паралелепіпедом. Для аналізу розглянемо поперечний та повздовжній перерізи такого паралелепіпеда у осях $z^1 O z^2$ та $z^2 O z^3$ (рис. 2), які при чисельному аналізі розглядатимуться окремо в межах плоскої задачі термопружнопластичності. Матеріал хвостовика – титановий сплав, фізико-механічні характеристики якого: $E = 9,6 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu = 0,36$, $\sigma_T = 9,3 \cdot 10^8$ Па.

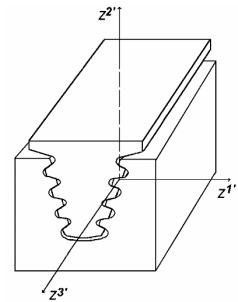


Рис. 1. Хвостовик лопатки

Граничні умови для поперечного перерізу в площині $z^1 O z^2$ імітують закріплення хвостовика у тілі обода ротора. Вважається, що поперечний переріз контактує із зовнішнім середовищем із змінним згідно кривої запуску температурою вздовж ребра $z^2 = 30$. Для повздовжнього перерізу в площині $z^2 O z^3$ обмеження переміщення по осі z^3 імітує закріплення

хвостовика на ободі ротора від зміщень в напрямку вісі ротора. У даному випадку нагрів відбувається на ребрі $z^2 = 30$ та на ребрі $z^3 = 0$.

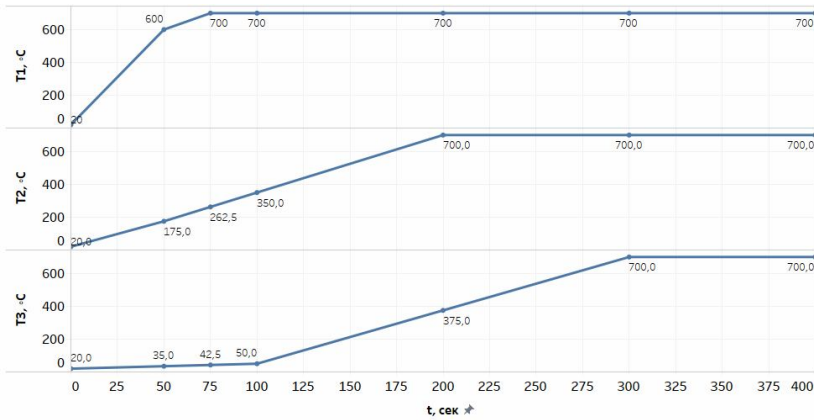


Рис. 2. Криві запуску

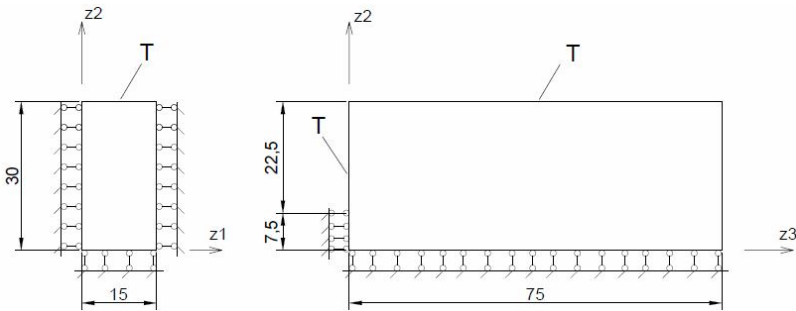


Рис. 3. Розрахункові схеми перерізів хвостовика

Результати визначення напружено-деформованого стану при дії температурного навантаження в площині z^1Oz^2 не представляють значного інтересу. Очевидно, що завдяки доволі грубій апроксимації геометрії та граничних умов, характер розподілення напружень схожий і відрізняється лише швидкістю виходу на пікове напруження. Також варто відзначити, що середнє напруження для холодного нагріву на 1% менше, ніж середні напруження для гарячого і теплого нагріву.

На рис. 4 і 5 показано отримані зміни розподілення напружень для повздовжнього перерізу тіла (в площині z^2Oz^3) з часом при використанні різних режимів нагріву. Проаналізовані зміни величин максимального в досліджуваній області та усередненої величин інтенсивності нормальних напружень. Цифрами 1, 2 та 3 позначено графіки, отримані відповідно для кривих запуску T1, T2 та T3. У даному випадку спостерігаємо значну різницю в напруженнях для різних кривих. Так, максимальні значення напружень, отримані в початковий момента часу для гарячого режиму (T1) більше ніж в півтора рази перевищують значення, отримані для двох інших

режимів. Різниця в максимальних значеннях для другої і третьої кривих сягає 7,6%. В той же час значення максимальних напружень для всіх трьох режимів нагріву у кінцевий момент нагріву досить близькі і лежать в межах 10 МПа.

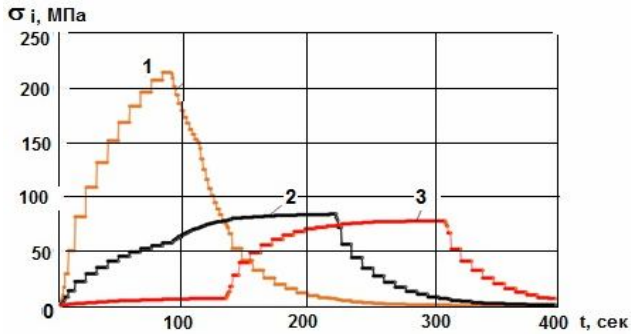


Рис. 4. Максимальні напруження у повздовжньому перерізі

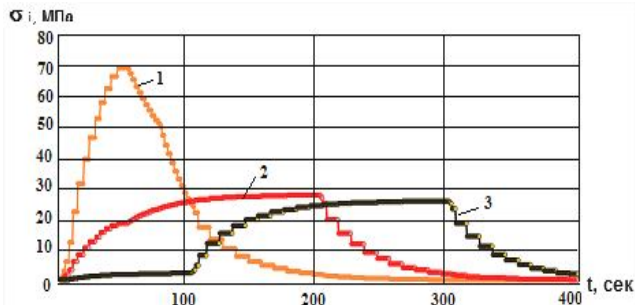


Рис. 5. Середні напруження у повздовжньому перерізі

Абсолютна величина максимальної інтенсивності напружень, викликаних температурним навантаженням в гарячому режимі, становить біля 210 МПа, не перевищує межі текучості, зникає після прикладання температурного навантаження і не впливає на подальшу еволюцію напружено-деформованого стану. В той же час у випадку одночасної дії цього температурного навантаження і силового навантаження сумарні напруження можуть перевищити межу текучості, що призведе до перерозподілення напружень в об'ємі деталі і може вплинути на подальший напружено-деформований стан.

Висновок. У роботі наведено результати розрахунку температурних напружень для спрощеної моделі хвостовика лопатки турбіни по трьом кривим запуску. У поперечному перерізі не спостерігається значна різниці між напруженнями, отриманими для різних режимів нагріву. У повздовжньому перерізі наявні значні відмінності для пікових напружень під час нагріву, що має враховуватись для точної оцінки напружено-деформованого стану і визначення ресурсу деталі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Oscar Tenango-Pirin, J.C. García, L. Castro-Gómez, J.A. Rodríguez, F. Sierra, O. De Santiago, J. M. Rodríguez-Lelis.* Effect of the modification of the start-up sequence on the thermal stresses for a microgas turbine / International journal of rotating machinery – Volume 2016 – Article ID 5834172.
2. *G. Nowak, A. Rusin.* Lifetime deterioration of turbine components during start-ups / Operation Maintenance and Materials Issues, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2004.
3. *T. S. Kim, D. K. Lee, S. T. Ro.* Analysis of thermal stress evolution in the steam drum during start-up of a heat recovery steam generator / Applied Thermal Engineering, vol. 20, no. 11, pp. 977–992, 2000.
4. *Коваленко А.Д.* Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. – К. : Наук. думка, 1970. – 204 с.
5. *Гуляр О.І.* Алгоритм розв'язання вісесиметричних задач нестационарної теплопровідності / О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, Ю.В. Максим'юк, В.П. Андрієвський // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2015. – Вип. 95. – С. 64-72.
6. *Блох В.І.* Теория упругости / В. И. Блох. – Х. : Изд. Харьковск. Гос. Университета, 1964. – 484 с.
7. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М., Мир, 1975.
8. *Пискунов С.О., Валер В.В.* Постановка задач деформування плоских та вісесиметричних тіл в умовах нестационарної теплопровідності // Математичні проблеми технічної механіки – 2017. Тези, частина 2. Дніпро, Кам'янське.
9. *Качанов Л.М.* Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 456 с.
10. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 732 с.
11. *Пискунов С.О., Валер В.В.* Постановка двовимірних задач деформування і континуального руйнування в неоднорідному температурному полі // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2016. – Вип. 97. – С. 194 – 205.

REFERENCES

1. *Oscar Tenango-Pirin, J. C. García, L. Castro-Gómez, J. A. Rodríguez, F. Sierra, O. De Santiago, J. M. Rodríguez-Lelis.* Effect of the modification of the start-up sequence on the thermal stresses for a microgas turbine / International journal of rotating machinery – Volume 2016 – Article ID 5834172.
2. *G. Nowak, A. Rusin.* Lifetime deterioration of turbine components during start-ups / Operation Maintenance and Materials Issues, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2004.
3. *T.S. Kim, D.K. Lee, S.T.Ro.* Analysis of thermal stress evolution in the steam drum during start-up of a heat recovery steam generator / Applied Thermal Engineering. - Vol. 20. No. 11, 2000. - PP. 977–992.
4. *Kovalenko A.D.* Osnovy termouprugosti (The foundations of thermal conductivity) / A.D. Kovalenko. – K. : Nauk. dumka, 1970. – 204 p.
5. *Hulyar O.I.* Algoritm rozvyazannya visesymetrichnyh zadach nestatzionarnoi teploprovodnosti (An algorithm for solving the axisymmetric problem of transient heat transfer) / O.I. Hulyar, S.O. Pyskunov, Yu.V. Maksymyuk, V.P. Andriyevskyy // Opir materialiv i teoriya sporud. – 2015. – Volume 95. – pp. 64-72.
6. *Blokh V.I.* Teoriya uprugosti (Theory of elasticity) / V.I. Blokh. – Kh. : Izd. Khar'kovsk. Gos. Universiteta, 1964. – 484 p.
7. *Zenkevich O.* Metod konechnykh elementov v tekhnike (Finite element method in technique) . M., Mir, 1975.
8. *Pyskunov S.O., Valer V.V.* Postanovka zadach deformuvannya ploskikh s visesymetrichnykh til v umovah nestatzionarnoi teploprovodnosti (Formulation of problems of deformation of planar and axisymmetric bodies under transient thermal conditions) // Matematicheskie problem tehnikeskoy mekhaniki. – 2017. Abstracts, Part 2. Dnipro, Kamyanske.
9. *Kachanov L.M.* Teoriya polzuchesti (Theory of creep) – M.: Fizmatgiz, 1960. – 456 p.
10. *Rabotnov Yu.N.* Polzuchest' elementov konstruksiy (Creep of elements of structure). – M.: Nauka, 1966. – 732 p.
11. *Pyskunov S.O., Valer V.V.* Postanovka dvovymirnykh zadach deformuvannya i kontynualnogo ruynuvannya v nestatzionarnomu temperaturnomu poli (Formulation of twodimensional problems of deformation and continual fracture in nonhomogenous temperature field) // Opir materialiv i teoriya sporud. – 2016. – Volume 97. – pp 194 – 205.

Valer V.V., Pyskunov S.O.

INFLUENCE OF TEMPERATURE REGIMES ON STRESS-STRAIN STATE OF DESIGN DETAILS

Details of turbomachines come in direct contact with gases, which are at the peak of their temperature. There is a heterogeneous temperature distribution across the detail as a result of changes in temperature and external influences. As is known, the temperature stresses in materials are due to temperature gradients and boundary conditions. However, when designing and determining the bearing capacity of turbomachinery structural elements, other factors, including the heating regime, must be taken into account. The greatest temperature stresses develop during the cycles of heating and cooling. At the same time, the greatest values of temperature gradients and stresses arise in a fairly short period of time, which in turn can cause a temperature fatigue of the material. In addition, high temperatures contribute to the development of creep deformations, which reduce the length of the life cycle of the detail. One of the factors that determines the occurrence of thermal stresses is the nature of the temperature change during the start-up process, which is determined by the start-up curve of the turbine or machine. Start-up curve is the dependence between rotor speed or gas temperature and time. It is especially important for such parts as turbine blades and roots of the blades. Considering that turbomachinery parts must withstand a significant number of start-up cycles, both temperature and mechanical analysis is required. The purpose of this work is to study the effect of the nature of the change of external temperature (start-up curves) on the change in the parameters of the stress-strain state of the fir-tree root of the gas turbine blade under thermoelastoplastic deformation, taking into account the nonhomogenous temperature distribution. The effect of heating regimes on the development of temperature stresses is considered in the paper. The initial relations of the problem of transient thermal conductivity and the problem of thermoelastoplasticity are given. An analysis of the effect of the selection of the start-up curve on the approximated geometry of fir-tree root of the blade was carried out.

Key words: start-up curve, transient thermal conductivity, thermoelastoplasticity, plane body, fir-tree root, blade.

Валер В.В., Пискунов С.О.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИЙ

В работе рассматривается влияние режимов нагрева на развитие температурных напряжений, что является важным для объектов, которые находятся под воздействием высоких температур (роторы, лопатки турбин и их хвостовики). Приведены исходные соотношения задачи нестационарной теплопроводности и задачи термоупругопластичности. Проведен количественный анализ влияния выбора режима нагрева хвостовика лопатки с использованием упрощенной геометрической схемы.

Ключевые слова: режим нагрева, кривые запуска, нестационарная теплопроводность, термоупругопластичность, плоская задача, хвостовик лопатки.

УДК 539.3

Валер В.В., Пискунов С.О. **Вплив температурних режимів на напружено-деформований стан деталей конструкцій** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2018. – Вип. 101. – С. 103-110.

Розглядається вплив режимів нагріву на розвиток температурних напружень у деталях конструкцій, що перебувають під впливом нестационарного температурного поля.

Ил. 5. Библиогр. 12 назв.

Valer V.V., Pyskunov S.O. **Influence of temperature regimes on stress-strain state of design details** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2018. – Issue 101. – P. 103-110.

The influence of the heating mode on the evolution of temperature stresses in the details of structures under the influence of a nonhomogenous temperature field is considered.

Fig. 5. Ref. 12.

Валер В.В., Пискунов С.О. **Влияние температурных режимов на напряжённо-деформированное состояние деталей конструкций** // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2018. - Вып. 101. - С. 103-110.

Рассматривается влияние режимов нагрева на развитие температурных напряжений в деталях конструкций, находящихся под воздействием нестационарного температурного поля.

Ил. 5. Библиогр. 12 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): *аспірант кафедри будівельної механіки КНУБА Валер Владислав Володимирович*

Адреса робоча: *03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Валер Владислав Володимирович*

Робочий тел.: *+38(044) 241-55-55*

Мобільний тел.: *+38(066) 023-52-55*

E-mail: *valer.vladislav@gmail.com*

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): *професор, доктор технічних наук, професор Пискунов Сергій Олегович.*

Мобільний тел.: *+38(050) 962-66-14*

E-mail: *s_piskunov@ua.fm*

ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0003-3987-0583>*