

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ПОШКОДЖУВАНOSTI

**Л.В. Кравчук, Є.О. Задворний, К.П. Буйських, А.Ю. Лебедин,
М.М. Феофентов**

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Україна

The kinetics of thermal and stress-strain state (SSS) of the edge of wedge-shaped specimen has been analyzed in the process of thermal fatigue loading due to the variation of the surface layer material characteristics. A considerable influence of dimensions, kinetics and localization of thermal fatigue cracks on the variation of SSS of structure is shown.

Розвиток методів і підходів з врахування кінетики пошкодження елементів конструкцій в процесі експлуатації з метою оцінки їх залишкового ресурсу і живучості є однією з актуальних задач при вирішенні питань забезпечення надійності сучасної техніки, зокрема газотурбінних двигунів.

У наукових публікаціях і монографіях широко висвітлено і узагальнено результати досліджень щодо впливу технологічних, конструкційних і експлуатаційних чинників на працездатність і вичерпання ресурсу елементів газотурбінних двигунів (ГТД), описані методи контролю з виявлення пошкоджень, що виникають [1, 2]. Досліджено вплив структурного стану матеріалу, стан поверхневого шару і, особливо, його зміни (деградації) на пошкоджуваність елементів конструкцій при термоциклічному навантаженні [3, 4], вплив покриттів на НДС і довговічність елементів конструкцій [5, 6], вивчено процеси пошкодження елементів газотурбінних двигунів та розвитку тріщин [7-9]. Проте, оцінка впливу кожного з вказаних чинників окремо на процес пошкоджуваності матеріалу як в умовах експлуатації, так і при термовтомних випробуваннях є досить складним завданням.

Основною метою досліджень з цієї теми є вивчення напружено-деформованого стану елементів конструкцій жароміцних сплавів і композиційних матеріалів при термоциклічному навантаженні з урахуванням закономірностей пошкодження матеріалу, процесів зародження і розвитку тріщин.

Як початкові дані було використано результати експериментальних досліджень з моделювання умов експлуатації лопаток газотурбінних двигунів на клиновидних зразках (Рис.1), що проводяться на газодинамічних стендах Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України [10]. Під час випробувань досліджувались процеси пошкодження матеріалу і кінетика розвитку тріщин термовтоми. Основою для аналізу теплового і НДС матеріалу в циклі були результати термометрування об'єктів дослідження при стендових випробуваннях за фіксованими режимами термоциклювання. Один з характерних режимів термоциклічного навантаження зразків показано на рисунку 2. В процесі досліджень необхідні значення температури і НДС матеріалу кромки досягаються вибором геометричних параметрів зразка : кута розхилу - φ , радіусу скруглення кромки - r , довжини хорди - L , висоти - H .

Рішення задачі з визначення теплового і НДС досліджуваних зразків, моделювання впливу пошкоджуваності матеріалу на НДС зразків, дослідження питань, пов'язаних із зародженням і розвитком термовтомних тріщин, вплив покриттів на пошкоджуваність основного матеріалу і довговічність елементів конструкцій проводилось в просторовій постановці за допомогою пакету прикладних програм "SPACE" [11]. Враховуючи просторову і часову неоднорідність теплових процесів і процесів пошкоджуваності матеріалу, характерну для лопаток ГТД, тепловий стан матеріалу клиновидного зразка визначався при вирішенні нелінійної просторової задачі нестационарної теплопровідності за змішаних граничних умов теплообміну.

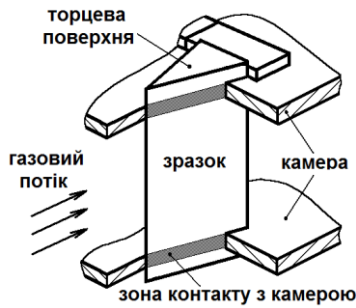


Рис. 1. Розташування досліджуваних зразків в камері.

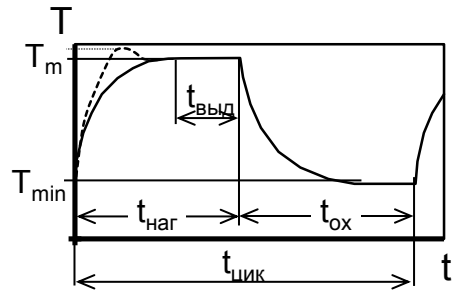


Рис. 2. Характерний режим зміни газового потоку в процесі випробувань.

Визначення НДС матеріалу зразків здійснюється в два етапи. На першому етапі вирішувалась задача з визначення теплового стану зразка (Рис.3), на другому - незв'язана задача термопружності з визначення НДС зразка (Рис.4). Результати, наведені на графіках, відповідають зразку з геометричними розмірами: $\varphi=15^\circ$, $r=0,7$ мм, $L=35$ мм, $H=80$ мм, виготовленому із сплаву ЖС6У, які досліджувалися в циклі навантаження $T_{\min}=350^\circ\text{C}$, $T_{\max}=1100^\circ\text{C}$ тривалістю 120 с, з напівциклом нагріву і напівциклом охолодження 60 с. Неоднорідність НДС матеріалу по висоті кромки, а також необхідність врахування контакту зразка з випробувальною камерою показано на рисунку 4.

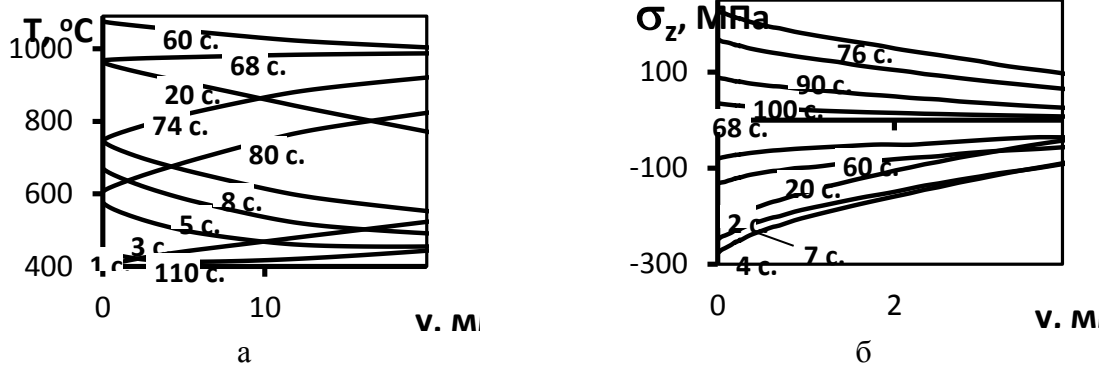


Рис.3. Зміна температури (а) і напружень (б) вздовж хорди зразка.

Результати розрахунків з визначення впливу теплозахисних покриттів на НДС матеріалу зразків показують, що властивості покриттів, їх товщина і конфігурація, технології нанесення, значною мірою впливають на рівні напружень в матеріалі основи і покриття, а відповідно на ступінь пошкоджуваності матеріалу елементів конструкцій. Так, аналіз отриманих результатів для різних типорозмірів зразків, покриттів і циклів навантаження показав, що нанесення покриттів як правило, призводить до зниження рівня напружень в основному матеріалі, проте при цьому може відбуватися стрибкоподібна зміна характеру навантажуваності матеріалу кераміки. На рисунку 5 показана зміна максимальних стискаючих і розтягуючих напружень в матеріалі основи для двох варіантів початкового стану композиції основа-покриття.

Аналіз експериментальних даних показує, що при термоциклюванні на кромці лопатки ГТД і клиновидного зразка на першому етапі виникає сітка коротких тріщин. В процесі подальшого навантаження триває зростання однієї-трьох макротріщин (Рис.6). У зв'язку з цим було досліджено взаємний вплив тріщин термічної втоми, що виникають в різних за величиною термонапружених зонах клиновидного зразка, що відрізняються різною кінетикою пошкодження деградованого шару і термонапруженого стану деталі в цілому. Були проведені чисельні розрахунки і аналіз НДС клиновидного зразка в циклі теплового навантаження в різних зонах по висоті клину з урахуванням тріщин, що знаходяться в цих зонах.

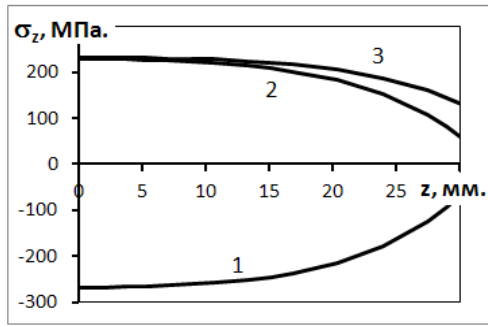


Рис. 4. Розподіл максимальних стискаючих (1) і розтягуючих (2, 3) напружень вздовж кромки клину; 3 – без врахування контакту з випробувальною камерою.

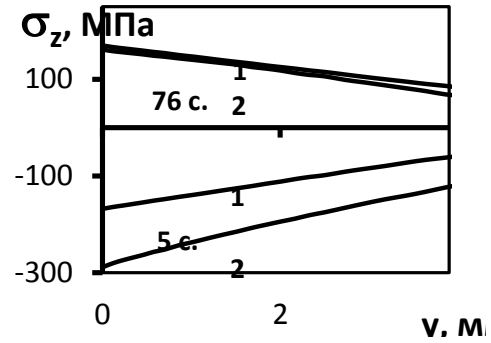


Рис. 5. Зміна максимальних стискаючих і розтягуючих напружень в матеріалі основи при різних температурах нанесення покриттів: 1 – 1020 °С; 2 – 20 °С.

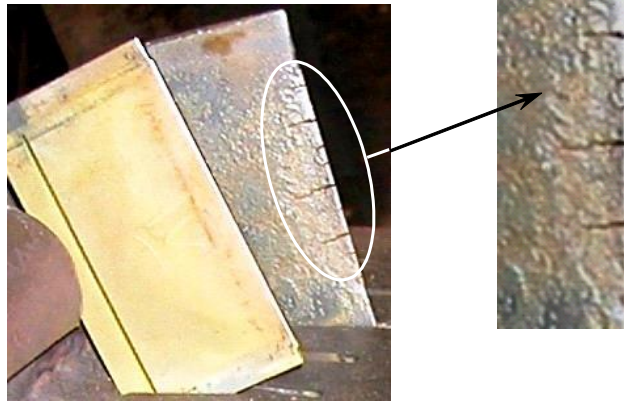
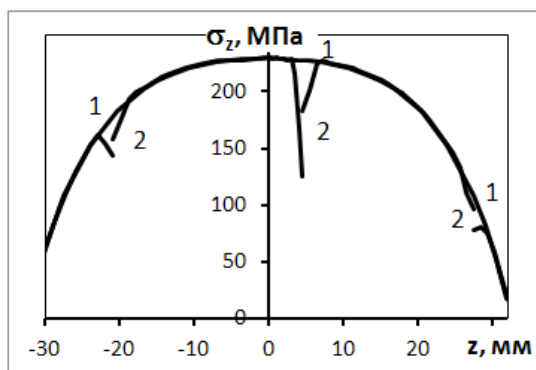
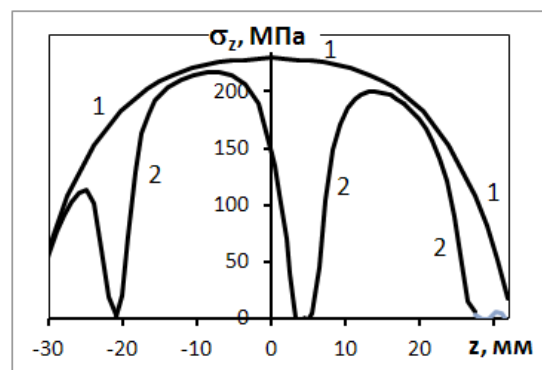


Рис.6. Характерна сітка термовтомних тріщин, що виникають на кромці зразка.

Результати розрахунків (Рис.7) показують, що зміна напруженого стану кромки залежить від довжини тріщин і зниження рівня напружень відбувається на обмеженій ділянці кромки клину. Довжина тріщин впливає наступним чином - чим вона більша, тим нижче рівень напруженості в зоні тріщини. Таким чином, виникнення двох-трьох довгих тріщин, розташованих на достатній відстані одна відносно одної, має досить локальний вплив на напружений стан зразка. У той же час сітка коротких тріщин, розташованих досить близько одна до одної призводить до зменшення навантаженості матеріалу кромки зразка.



$$l_1 = l_2 = l_3 = 250 \text{ мкм}$$



$$l_1 = l_2 = 1,71 \text{ мм}; l_3 = 2,0 \text{ мм}$$

Рис.7. Напружений стан кромки клиновидного зразка з трьома тріщинами різної довжини (l).

У результаті проведених досліджень було уточнено методику розрахункової оцінки ТНДС клиновидного зразка з деградованим шаром з урахуванням тріщин термічної втоми, що утворилися. Встановлено взаємний вплив тріщин термічної втоми, що виникають в різних за величиною термонапружених зонах клиновидного зразка і які відрізняються різною кінетикою пошкодження деградованого шару і термонапруженого стану деталі в цілому.

Література

1. Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния / Третьяченко Г.Н., Кравчук Л.В., Курият Р.И. и др. – Киев: Наук. думка, 1985. – 278 с.
2. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: “Недра”, 1996. – 591 с.
3. Study of Damage Kinetics of Heat-Resistant Alloys Subjected to Thermocyclic Loading in a Gas Flow / Kravchuk L.V., Kuriat R.I., Buiskikh K.P., Zadvornyi E.A., Kiselevskaya S.G. // Strength of Materials. – 2006. – Vol. 382 (38), N4. – p.386-391.
4. Kravchuk L.V., Kuriat R.I., Buiskikh K.P., Kiselevskaya S.G. Surface Layers' Degradation of Heat-Resistant Alloys and Thermal Fatigue Damageability of Gas Turbine Engine Structural Components // Strength of Materials. – 2008. – Vol. 395 (40), N5. – p.552-559.
5. Исследование механизмов термоусталостного повреждения материалов с покрытиями деталей ГТД / Л.В. Кравчук, Р.И. Курият, К.П. Буйских // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 1. – С. 45-49.
6. Wang Q.M., Wu Y.N., Ke P.L., Cao H.T. Hot corrosion behavior of AlP NiCoCrAlY (SiB) coatings on nickel-base superalloys // Surf. Coat. Technol. – Vol.186. – 2004. – pp. 389-397.
7. Кінетика тріщин втоми під циклічним термомеханічним навантаженням / Трощено В.Т., Кравчук Л.В., Кононученко О.В., Задворний Є.О. // Физико-химическая механика материалов. – 2001. – Том 37, № 2. – 10 с.
8. Kravchuk L.V., Zadvornyi E.A. Investigation of thermal fatigue crack propagation kinetics in heat-resistant materials under conditions of unsteady heat exchange using the methods of experimental and numerical simulation // Third International Cong. on Thermal Stresses. – Cracow (Poland). – 1999. – pp. 237-240.
9. Mazur Z., Luna-Ramirez A., Juarez-Islas J.A., Campos-Amezcuca A. Failure Analysis of a Gas Turbine Blade Made of Inconel 738LC Alloy // Engineering Failure Analysis. – vol.12. – 2005. – pp. 474 – 486.
10. ДСТУ 23.6794. Єдина система захисту від корозії та старіння. Метали, сплави, покриття жаростійкі. Метод випробувань на високотемпературну корозію та термовтому в потоці продуктів горіння палива/ Кравчук Л.В., Семенов Г.Р., Курият Р.І. та ін.: Наказ № 94 від 25.02.94. – 9 с.
11. Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)” / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0084261-02. – 2002.