

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ДЕГРАДАЦІЄЮ
МАТЕРІАЛУ ТА КІНЕТИКОЮ ТЕРМОВТОМНИХ ТРІЩИН ЗА
УМОВ ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**Є.О. Задворний, К.П. Буйських, Л.В. Кравчук, С.Г. Киселевська,
М.М. Феофентов**

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

The paper presents the results of the investigation of the effect of the degraded surface layer of the structural element on the stress state at the tip of the thermal fatigue crack. To reveal the influence of the mechanisms of the material degradation on the stress state and propagation of the thermal fatigue cracks, several calculation models of the wedge-type specimen in the dimensional statement have been developed. Here the thermal fatigue crack is modeled using the mathematical cut and section with a curved crack.

У проблемі оцінки рівня пошкоженості та реального ресурсу елементів конструкцій, що працюють в умовах високих температур та корозійно активних середовищ, зокрема газотурбінних двигунів, чільне місце займають дослідження процесів пошкодження (деградації) матеріалу поверхневих шарів. Кількість літературних джерел, присвячених результатам аналізу деградаційних процесів стосовно жароміцних сплавів в процесі експлуатації зростає з кожним роком. Вивчаються різні аспекти деградації матеріалів і їх вплив на функціональні характеристики елементів конструкцій, які працюють в зонах високих температур і термічних напружень. В роботах розглядається вплив деградації мікроструктури на характеристики втоми [1; 2], повзучості [3; 4], довговічність елементів конструкцій [5; 6], фізико-механічні характеристики матеріалів [7-9]. Розглядається взаємозв'язок деградації мікроструктури, кінетики тріщин термовтоми, високотемпературної корозії і напружено-деформованого стану елемента конструкції [10-13]. Автори [10] досліджували вплив напруженого стану і високотемпературної корозії на кінетику тріщин і довговічність монокристалічного сплаву CMSX-4. Розглядається механізм виникнення і поширення тріщин при термічній втомі в наведено-кристалізованому сплаві DZ125 [11]. Зазначено, що швидкість росту тріщин визначається полем напружень в вершині тріщини і ступенем окислення. Досліджується кінетика тріщин в монокристалічному сплаві в залежності від температури і орієнтації кристалу [12], а також від температури, орієнтації, мікроструктури, тривалості циклу [13].

Результати термовтомних випробувань елементів конструкцій за умов нестационарного впливу високотемпературного газового потоку та проведені металографічні дослідження [14] показують, що на поверхні матеріалу внаслідок окислення та дифузії легуючих елементів з часом відбувається зміна складу матеріалу, а саме, збіднення одними елементами та підвищення концентрації інших. Це вимагає при проведенні розрахунків враховувати зміну властивостей матеріалу.

Наведені результати отримані з використанням скінчено-елементного пакету прикладних програм «SPACE» [15] та стосуються клиновидного зразка [16] зі сплаву ЖС6У з розмірами: $r = 0,7$ мм, $\varphi = 15^\circ$, $L = 43$ мм, $H = 80$ мм і режимом навантаження: 60 с нагрів і 60 с охолодження (рис. 1).

Для деградованого шару (ДШ) характерна нерівномірність окислення по його глибині, яке залежить, перш за все, від напрацювання. Цей шар поділяється на зовнішній, з більш щільною структурою, та внутрішній несущільний підшар, який межує з матрицею сплаву. Металографічні дослідження матеріалу в зоні тріщин, що виникають під впливом термоциклічного навантаження, показують наявність

деградованого шару на її берегах (рис. 2). Наявність деградованого шару в вершині тріщини ставить під сумнів можливість використання звичайних розрахункових методів, що базуються на традиційних підходах механіки руйнування.

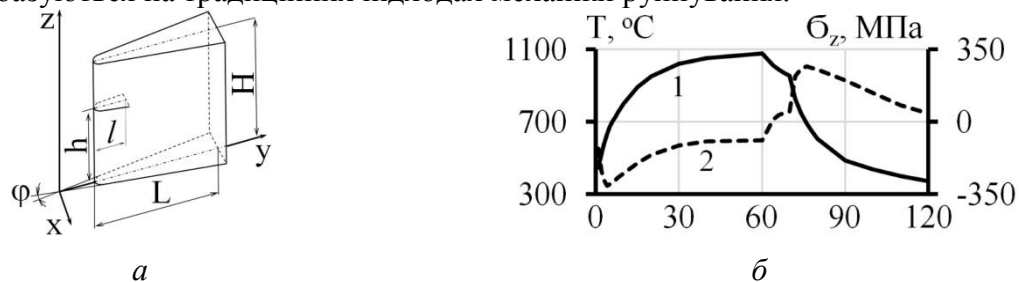


Рис. 1. Схема клиновидного зразка (а) та тепловий і напружений стан кромки непошкодженого зразка (б): 1 – температура; 2 – напруження.

Аналіз оригінальних результатів та літературних даних свідчать, що напрямок та швидкість розвитку тріщин залежить від напруженого стану зразка і структури матеріалу. Під час дослідження тріщини умовно розбивали на три зони: устя, центральну частину і вершину. Завдяки такому підходу можна оцінити стан деградованого шару при різних напрацюваннях, оскільки в зоні устя тріщини напрацювання буде відповідати загальному напрацюванню зразка. Так, на зразку, випробуваному при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2\sigma_a = 680\text{ МПа}$, загальне напрацювання становило 4700 циклів теплозмін. Знаючи довжину тріщини і її кінетику, можна визначити, що поверхня тріщини в середній частині зазнавала впливу газового потоку протягом 2300 циклів, а в вершині тріщини кількість циклів відповідає напрацюванню 350 циклів.



Рис. 2. Тріщина у зразку зі сплаву ЖС6Ф довжиною $l = 5,4\text{ мм}$ після 4700 циклів при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2\sigma_a = 680\text{ МПа}$: а – загальний вигляд; б – вершина тріщини.

Одним із інформативних об'єктів для оцінки пошкоджуваності матеріалу є вершина тріщини з деградованим шаром. Наявність або відсутність збідненої області в вершині тріщини можуть впливати (уповільнювати або прискорювати) на процеси деградації при поширенні тріщини.

Для обробки отриманих результатів та виявлення впливу механізмів деградації матеріалу на розповсюдження термовтомних тріщин було побудовано декілька розрахункових моделей клиновидного зразка в просторовій постановці. Тріщину термічної втоми моделювали за допомогою математичного розрізу та розрізу з закругленою вершиною, яка була використана для моделювання виникнення деградованого шару матеріалу вздовж берегів тріщини та на її вершині. Представлені результати відповідають зразку з розмірами, наведеними раніше, довжиною тріщини $l = 5\text{ мм}$ та висотою її розташування $h = 50\text{ мм}$.

При відпрацюванні методів врахування геометричних та фізичних особливостей структурно змінених поверхневих шарів матеріалів в якості вихідних даних було прийнято ряд узагальнених результатів дослідження мікроструктури ДШ. Зокрема, середня глибина шару складає 40-45 мкм, при цьому глибина зовнішнього шару приблизно у два рази більша за глибину внутрішнього підшару. Пошкоджений матеріал з деградованим шаром розглядався у якості нового матеріалу. Для розрахунку ТНДС клиновидного зразка [16] використовувалися механічні характеристики шарів, які

складають ДШ, до яких відносяться окисні шари та шар, збіднений γ' -фазою. Характеристики зовнішнього окисного шару на усьому діапазоні температур вважалися постійними: модуль пружності – $2,3 \times 10^5$ МПа, а коефіцієнт лінійного термічного розширення – $17,15 \times 10^6$ K^{-1} . Для внутрішнього шару, збідненого γ' -фазою, використовувався сплав-аналог, характеристики якого змінюються в діапазоні температур 20-1100 °С: модуль пружності – від 19×10^4 до $1,8 \times 10^4$ МПа, а коефіцієнт лінійного термічного розширення – від $12,45 \times 10^6$ до $17,15 \times 10^6$ K^{-1} .

Відповідно до металографічних досліджень товщина деградованого шару на поверхні зразка та вздовж берегів розрізу з закругленою вершиною біля кромки приймалась 30 мкм (20 мкм – зовнішній шар, 10 мкм – шар, збіднений γ' -фазою). Товщина деградованого шару вздовж берегів розрізу від кромки зразка до вершини тріщини зменшувалась та в області вершини приймалась 3 мкм (2 мкм – зовнішній шар, 1 мкм – шар, збіднений γ' -фазою). Радіус закруглення вершини – 0,5 мкм.

Результати розрахунків НДС, наведені на рис. 4 показали, що наявність деградованого шару та дефекту типу тріщини суттєво впливає на напружений стан матеріалу клиновидного зразка, при цьому результати отримані на моделі з математичним розрізом та розрізом з закругленою вершиною мають досить близькі значення, що обумовлено розмірами деградованих шарів в вершині розрізу та малим радіусом закруглення вершини.

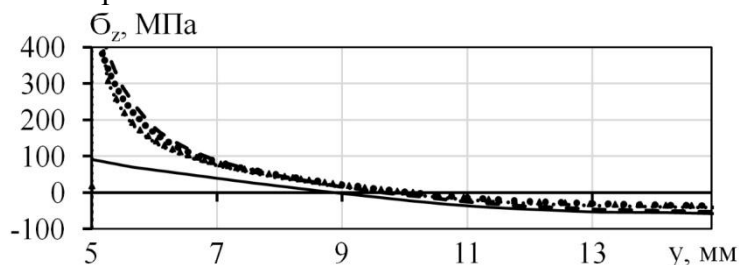


Рис. 3. Розподіл напружень вздовж лінії розповсюдження тріщини:
 — зразок без пошкоджень, - - - зразок з математичним розрізом без деградованих шарів, • – зразок з математичним розрізом з деградованим шаром, – зразок з розрізом з закругленою вершиною без деградованих шарів, ▲ – зразок з розрізом з закругленою вершиною та деградованими шарами на поверхні зразка та вздовж берегів розрізу.

На зразках з розрізом (рис. 4), що моделюють термовтомну тріщину, на відміну від бездефектного зразка з'являються напруження крім σ_z , що значною мірою впливають на механізм розповсюдження тріщини. Так напруження σ_y в околі вершини розрізу та на кромці зразка біля деградованого шару практично співпадають з напруженнями σ_z .

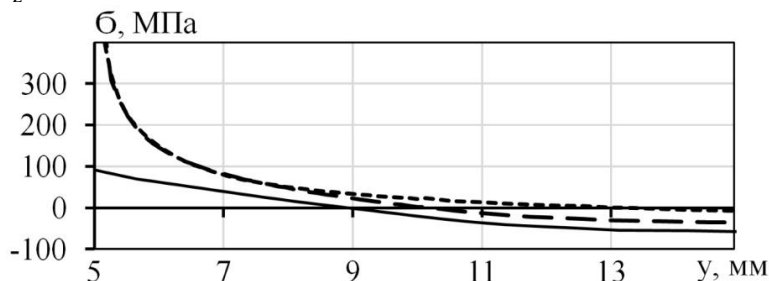


Рис. 4. Розподіл напружень вздовж лінії розповсюдження тріщини:
 суцільна – зразок без пошкоджень, пунктир – зразок з розрізом з закругленою вершиною без деградованих шарів (— — - σ_z , - - - - σ_y).

Отримані результати свідчать про необхідність подальших досліджень процесів деградації матеріалу під час термоциклічного навантаження. Особливо актуальними є питання визначення фізико-механічних властивостей матеріалу деградованого шару, що суттєво як для визначення реального НДС так і для оцінки впливу цих процесів на довговічність і залишковий ресурс елементів конструкцій.

1. A. Cervellon, J. Cormier, F. Mauget, Z. Hervier. VHCF life evolution after microstructure degradation of a Ni-based single crystal superalloy. *International Journal of Fatigue*, 2017, V. 104, P. 251-262.
2. K. Isawa, Y. Igarashi, M. Hayashi, F. Sato, K. Miyaguchi. Detecting degradation in Ni-based superalloy Udimet520 with scanning SQUID microscopy. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2010, V. 470, I. 20, P. 1529-1533.
3. Tongjin Zhou, Hongsheng Ding, Xiuping Ma, Wei Feng, Yongmin Lv. Microstructure and stress-rupture life of high W-content cast Ni-based superalloy after 1000–1100 °C thermal exposures. *Materials Science and Engineering*. 2018, V. 725, P. 299-308.
4. D. Leidermark, J.J. Moverare, S. Johansson, K. Simonsson, S. Sjöström. Tension/compression asymmetry of a single-crystal superalloy in virgin and degraded condition. *Acta Materialia*, 2010, V. 58, I. 15, P. 4986-4997.
5. P. Auerkari. Creep, fatigue and microstructural degradation in gas turbine superalloys. Book chapter *Power Plant Life Management and Performance Improvement*, 2011, P. 307-329.
6. Jinyan Tong, Xianfei Ding, Meiling Wang, Koichi Yagi, Qiang Feng. Assessment of service induced degradation of microstructure and properties in turbine blades made of GH4037 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, V. 657, P. 777-786.
7. J.Y. Tong, K. Yagi, Y.R. Zheng, Q. Feng. Microstructural degradation and its corresponding mechanical property of wrought superalloy GH4037 caused by very high temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, V. 690, P. 542-552.
8. X.F. Yuan, J.X. Song, Y.R. Zheng, Q. Huang, Q. Feng. Abnormal stress rupture property in K465 superalloy caused by microstructural degradation at 975 °C/225 MPa. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, V. 662, P. 583-592.
9. D. Leidermark, J.J. Moverare, S. Johansson, K. Simonsson, S. Sjöström. Tension/compression asymmetry of a single-crystal superalloy in virgin and degraded condition. *Acta Materialia*, 2010, V. 58, I. 15, P. 4986-4997.
10. L. Brooking, S. Gray, J. Sumner, J.R. Nicholls, N.J. Simms. Effect of stress state and simultaneous hot corrosion on the crack propagation and fatigue life of single crystal superalloy CMSX-4. *International Journal of Fatigue*, In press, accepted manuscript, Available online 3 May 2018.
11. Jianglong Zhang, Zihua Zhao, Yuanhang Kong, Zheng Zhang, Qunpeng Zhong. Crack initiation and propagation mechanisms during thermal fatigue in directionally solidified superalloy DZ125. *International Journal of Fatigue*, 2019, V. 119, P. 355-366.
12. Shi Yi, Yang Xiaoguang, Yang Didi, Miao Guolei, Qi Hongyu, Shi Duoqi, Li Shaolin. The influence of temperature and orientation on fatigue crack growth behavior of a directional solidification nickel-based superalloy: Experimental investigation and modelling. *International Journal of Fatigue*, 2019, V. 125, P. 505-519.
13. Richard W. Neu. Crack paths in single-crystal Ni-base superalloys under isothermal and thermomechanical fatigue. *International Journal of Fatigue*. 2019, V. 123, P. 268-278.
14. Буйских К.П., Кравчук Л.В., Киселевская С.Г., Задворный Е.А., Феофентов Н.Н. Кинетика и механизмы деградации поверхностного слоя элементов конструкций ГТД при термоциклическом нагружении в процессе зарождения и роста трещин термической усталости // Пробл. прочности. – 2016. – № 6. – С.64-72.
15. Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)” / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0084261-02.– 2002.
16. 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.