

УДК 539. 434

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ДЕГРАДУЮЧОГО ЗА ТЕРМОЦИКЛІЧНОЇ ДІЇ ГАЗОВОГО ПОТОКУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

**Костянтин Буйських, Євгеній Задворний,
Леонід Кравчук, Микола Феофентов**

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

bkp@ipp.kiev.ua, eaz@bigmir.net, lvk@ipp.kiev.ua

Питання розвитку та вдосконалення методів визначення напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкцій і його залежності від умов експлуатації та ступеня деградації матеріалу, розробки методів аналізу кінетики пошкодження матеріалів в процесі експлуатації, впровадження ремонтних технологій з урахуванням зазначених чинників для подовження ресурсу залишаються особливо актуальними.

Результати досліджень щодо умов експлуатації газотурбінних двигунів (ГТД) та впливу різних чинників на НДС їх елементів показують, що в найбільш складних умовах перебувають деталі проточної частини турбіни, які зазнають значного впливу нестационарних температур, а відповідно термічних напружень. Дослідження деградації поверхневого шару матеріалу найбільш навантажених елементів конструкцій ГТД при термоциклічному навантаженні [1–3] показали суттєві зміни структури й елементного складу матеріалу цього деградованого шару, що свідчить про необхідність їх урахування під час розрахунків теплового та напружено-деформованого стану (ТНДС) високотемпературних елементів конструкцій газотурбінних двигунів.

Чисельне моделювання впливу деградуючого поверхневого шару на високонавантажені елементи ГТД ґрунтується на результатах термовтомних випробувань клиновидних зразків, які моделюють стан матеріалу кромки лопатки за реальних експлуатаційних умов. Розрахункова оцінка ТНДС ґрунтувалася на експериментальних даних про кінетику теплового стану моделей лопаток ГТД та металографічних дослідженнях кінетики структурного стану матеріалу, що забезпечило можливість проведення масштабних розрахунків з урахуванням значущості впливу деградованих шарів.

Усі розрахунки виконували з використанням методу скінченних елементів для нестационарних режимів теплового навантаження клиновидних зраз-

ків різної геометрії. Деградований шар моделювали двома шарами – зовнішнім оксидним та внутрішнім проміжним шаром. Відповідно до відпрацьованої раніше методики за модельний матеріал проміжного шару обрано сплав ХН60ВТ, який за хімічним складом наближений до складу проміжного шару. Розглядали варіанти оксидного шару з властивостями, що відповідають оксидам NiO , Al_2O_3 та Cr_2O_3 , а також їх суміші NiO (63%) + Al_2O_3 (22%) + Cr_2O_3 (15%). Вміст кожного із компонентів розраховували відповідно до результатів аналізу елементного складу в деградованих шарах.

Отримані числові результати свідчать про суттєвий вплив деградованого шару, його фізико-механічних характеристик та температурних режимів утворення на НДС основного матеріалу елементів конструкцій. Результати розрахунків моделей з різним співвідношенням товщини зовнішнього оксидного та внутрішнього шарів показали, що наявність або товщина внутрішнього шару майже не впливає на напружений стан моделі з деградованим шаром. Дослідження реальних параметрів зовнішнього оксидного шару має значний вплив на достовірність оцінки стану елементів газотурбінних двигунів, визначення їх реальної довговічності і ресурсу.

1. *Bensch M., Sato A., Warnken N., Affeldt E., Reed R.C., Glatzel U.* Modelling of high temperature oxidation of alumina-forming single-crystal nickel-base superalloys // *Acta Materialia*. – 2012. – **60**, No. 15. – P. 5468–5480.
2. *Buisikh K.P., Kiselevskaya S.G., Kravchuk L.V., Zadvorniy E.A., Feofentov N.N.* Kinetics and mechanisms of degradation of the surface layers of gas-turbine engine structural components under cyclic thermal loading during initiation and propagation of thermal fatigue crack // *Strength of Materials*. – 2016. – **48**, No. 6. – P. 64–72.
3. *Кравчук Л.В., Буйських К.П., Киселевська С.Г., Задворний Є.О., Лебедин А.Ю.* Дослідження пошкодження поверхневого шару елементів конструкцій ГТД при термоміциклічному навантаженні до і після появи тріщин термічної втоми // IV Міжнародна науково-технічна конференція "Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування та прогнозування" та XIV Польсько-українсько-німецька літня школа з механіки руйнування, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 21-24 вересня 2015. – С. 202–204.

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE SURFACE LAYER DEGRADING DURING THE THERMOCYCLIC ACTION OF A GAS FLOW

Using the methods of physical and mathematical modeling, the effect of non-stationary thermocyclic loading and degradation of the surface layer of the material on the stress-strain state of structural elements is shown. The influence of the process of changing the structure and properties of the material, its thermal and stress-strain state on determining the possibility of safely extending the service life of equipment and ensuring the economy and reliability of new energy systems is studied.