

Б. С. Карпінос,
Л. В. Кравчук,
К. П. Буйських,
А.В.Рутковський,
Є.О.Задворний,
В.М.Співак

ПРОГНОЗУВАННЯ ГРАНИЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА УМОВ ЦИКЛІЧНОЇ ДІЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

Анотація

Наведено критичний аналіз сучасних методів прогнозування термоциклічної довговічності матеріалів та показано перспективність запропонованих авторами методів прогнозування, що базуються на засадах термодинаміки, та фізичного моделювання. Розглянуто приклади застосування комп'ютерних технологій для розв'язання мультифізичних задач рухомого середовища і твердого тіла для визначення несталого термодинамічного стану матеріалів.

Ключові слова: граничний стан, температура, напруження, довговічність, критерії та рівняння, прогнозування

Вступ

Дослідження втомних конструктивних матеріалів налічують майже 200 літню історію. За цей час досягнуто розуміння природи цього складного процесу. Накопичено великий обсяг експериментальних результатів деформування і руйнування різних класів матеріалів. Запропоновано різноманітні критерії і рівняння граничного стану. Разом з тим сучасний технічний прогрес потребує розв'язання актуальних проблем прогнозування втомних матеріалів в нових умовах термосилового навантаження, зокрема в умовах дії рухомого середовища з високими термодинамічними параметрами.

Прогнозування граничного стану

Теорії і методи прогнозування граничного стану матеріалу (поява тріщини, незворотне деформування зразку, повне або часткове його руйнування та інші) є феноменологічними, що ґрунтуються на експериментальних результатах і подальшій їхній статистичній інтерпретації. Встановлено, що степені залежності задовільно описують результати дослідів в межах одного переважаючого механізму деформування

$$N = A\sigma^n \text{ або } N = B\varepsilon^m, \quad (1)$$

де N – довговічність, σ – напруження, ε – деформації, A, B, n, m – емпіричні параметри. Параметри рівняння (1) в свою чергу залежать від структури і складу матеріалу, технологічних і експлуатаційних чинників, умов навантаження, стану поверхні, робочого середовища тощо. Це пояснює різноманітність рівнянь, що додатково враховують той, чи інший чинник. Крім того, для забезпечення адекватності рівняння (1) виникає потреба визначення меж дії механізму деформування, що пов'язано з додатковими експериментальними дослідженнями.

Термічна втома матеріалів займає окреме місце в загальній проблемі втоми. Термічні напруження є наслідком неоднорідності теплових станів конструктивних елементів, що

притаманно несталим режимам роботи обладнання. Це стосується, теплової та атомної енергетики, газових турбін та ракетних двигунів, ливарного виробництва, поверхневого зміцнення. В кожному випадку, виходячи з мети, розробляється методика досліджень, обирається або створюється експериментальне обладнання, виконується чисельне моделювання несталих термодинамічних станів зразків, що тотожні експлуатаційним станам конструкційних елементів. При цьому забезпечується фізико-хімічна подібність, хоча геометрична порушується. Зразки мають форму клиновидної призми, пластини, порожнистого циліндру або еліпсоїду. Зазвичай нагрівання зразків відбувається газовим (іноді іонізованим) потоком або локальним проходженням електричного струму, або у контакті з розплавом металу, чи солі. Тепловий стан під час експериментальних досліджень контролюється сучасними засобами вимірювання і порівнюється з результатами моделювання. Ознакою руйнування зразків є поява тріщини певної довжини або їх критичне незворотне деформування, а також кінетика.

В загальному випадку залежність довговічності від експлуатаційних умов має вигляд

$$N = f\left(\sigma_i, \varepsilon_i, T, t, \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \text{grad}\sigma_i, \frac{d\sigma_i}{dt}, k, \dots\right) \quad (2)$$

де T – температура, t – час, k – структурно-технологічний або експлуатаційний чинник (наявність покриття, залишкові напруження, концентрація агресивного компоненту тощо). Конкретизація рівняння (2) досягається відповідними експериментальними дослідженнями. Авторами доповіді запропоновано такі рівняння термічної втоми конструкційних матеріалів

$$N = C[\varepsilon_i \exp(A|\text{grad}\varepsilon_i|)]^m$$

$$\ln N = b_0 + b_1 T_{\max} + b_2 2\sigma_a, \quad \ln N = b_0 + b_1 T_{\max} + b_2 2\sigma_a, \quad \ln N = b_0 + b_1 T_{\max} + b_2 \ln 2\sigma_a, \quad \ln N = b_0 + b_1 T_{\max} + b_2 \Delta\varepsilon + b_3 T,$$

де σ_a – амплітуда термічних напружень в циклі, $T_{\max}$ – максимальне значення температури в циклі, C, A, b_0, b_1, b_2, b_3 – статистично визначені параметри емпіричних рівнянь.

Висновки

Показано перспективність запропонованого феноменологічного напрямку дослідження термічної втоми матеріалів за умов циклічної дії високотемпературного газового середовища.

Карпінос Борис Сергійович – доктор техн. наук, професор, завідувач відділу Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України,

Кравчук Леонід Васильович – доктор техн. наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

Буйських Костянтин Павлович – канд. техн. наук, заступник директора Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

Рутковський Анатолій Віталійович – канд. техн. наук, ст. наук. співр. Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

Задворний Євгеній Олександрович – канд. техн. наук, ст. наук. співр. Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

Снівак Віктор Маркович – головний інженер-дослідник Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

Prediction of the limit state of structural materials under conditions of cyclic action of high-temperature gas

Abstract

A critical analysis of modern methods for predicting the thermocyclic durability of materials is presented and the prospects of the forecasting methods proposed by the authors, based on the principles of thermodynamics and physical modeling, are shown. Examples of the application of computer technologies for solving multiphysical problems of a moving medium and a solid body to determine the unstable thermodynamic state of materials are considered.

Keywords: *limit state, temperature, stress, durability, criteria and equations, forecasting*

Borys Karpinos – Doctor of technical sciences, professor, head of department G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine

Kostiantyn Buiskykh – Ph.D., deputy director for scientific work G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine

Leonid Kravchuk – Doctor of technical sciences, professor, leading researcher G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine

Anatolii Rutkovskiy – Ph.D., research worker, G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine

Yevhenii Zadvornyi – Ph.D., research worker, G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine

Viktor Spivak – chief engineer researcher G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine