ISSN 2079–1836
2022, вип. 35

DOI 10.15421/4222217
УДК 539.376

В. П. Пошивалов, д-р техн. наук

ЙМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

Запропонована ймовірнісна модель довготривалої міцності, яка базується на кінетичній теорії та теорії надійності. Розглянуто два випадки, коли руйнування йде переважно по границях зерен з утворенням клиноподібних тріщин та коли руйнування йде переважно по границях зерен з утворенням пор. Для ступеневих законів повзучості та міжзеренної і внутризеренної пошкоджуваності визначено середній час до руйнування та його, середнє квадратичне відхилення. Проведено порівняння теоретичних розрахунків з результатами експериментів на довготривалу міцність зразків з корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т.

Ключові слова: *довготривала міцність; повзучість; ймовірність неруйнування; пошкоджуваність; час до руйнування; середнє квадратичне відхилення часу до руйнування.*

Вступ. Для опису процесів накопичення пошкодженості в матеріалах, що експлуатуються в широких діапазонах напружень і температур у часі, широко використовуються структурні та феноменологічні моделі [1].

Структурні моделі засновані на математичному описанні фізики процесу накопичення пошкоджень на одному або декількох рівнях структури [5]. За допомогою них стає можливим обґрунтовано оцінювати ризик настання граничного стану, здійснювати перенесення модельних результатів на великогабаритні конструкції, а також об'єднувати в рамках однієї моделі опис процесів накопичення пошкоджень і руйнування матеріалу. Руйнування тут розглядається як незворотній процес накопичення мікротріщин, що виникають в результаті термофлуктуаційних розривів міжатомних зв'язків в механічно напруженому матеріалі. При будь-якому вигляді навантаження основною характеристикою вважається довговічність, тобто час з моменту прикладання навантаження до появи макротріщини.

Структурні моделі також дозволяють знайти спосіб переносу експериментальних даних, отриманих для одного з видів навантаження та поведінки матеріалу на інші, а також дозволяють об'єднувати експериментальні дані, що відносяться до різних видів напруженого стану та зовнішнього впливу.

Феноменологічні моделі є більш простими з математичної точки зору і на макрорівні досить повно відображають основні закономірності процесу пошкодження матеріалів, хоча і не включають опису його механізмів. У цих моделях за критерій руйнування приймається миттєве перевищення накопиченою пошкоджуваністю гранично допустимого рівня.

© В. П. Пошивалов, 2022

При дослідженні феноменологічних моделей слід розрізняти два підходи.

Один з них – кінетичний, в рамках якого застосовуються різні критерії руйнування. На практиці залежно від умов і характеру навантаження використовуються різні уявлення про міцність матеріалу і одиниці виміру його працездатності. У багатьох теоретичних дослідженнях параметр пошкоджуваності має феноменологічний характер, зв'язок якого з реальною зміною структури матеріалу не розглядається. Пізніше були опубліковані роботи, в яких цей параметр визначався через зміну структури матеріалу за допомогою фізичних або металографічних методів.

В найпростішому варіанті пошкоджуваність описують деяким скаляром, параметром суцільності $0<\psi<1$ Л. М. Качанова [3] або параметром пошкоджуваності $0<\omega<1$ Ю. М. Работнова [8]. У початковому стані, при відсутності пошкоджуваності, маємо $\psi=1$, $\omega=0$. З плином часу функція ψ спадає, а пошкоджуваність ω зростає. Можна вважати, що $\psi=1-\omega$. Величину ω можна інтерпретувати як відносну площу поперечного перерізу, яка зайнята тріщинами, мікропорами, мікродефектами. Згідно цього можна зробити висновок, що за класичною теорією Качанова – Работнова поточний стан внутрішньої пошкоджуваності зразка може бути представлений за допомогою єдиного скалярного параметра ω, який являє собою монотонно зростаючу функцію часу.

Другий підхід – критеріальний, що передбачає вибір критеріїв опору металів тривалому руйнуванню. Серед таких слід відзначити критерії, які базуються на концепції так званого еквівалентного напруження. При цьому основна увага приділяється встановленню залежності еквівалентного напруження σ_e від головних напружень $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ $(\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3)$ при різних видах складного напруженого стану та залежності часу руйнування від σ_e.

Однак, феноменологічні моделі повзучості, що використовуються останнім часом, а також доступні результати розрахунків на довготривалу міцність звичайно обмежені ізотермічними умовами. Розширення наявних моделей до варіантів, що враховують зміну температури, вимагає дорогих експериментів на повзучість і, як наслідок, великої кількості констант повзучості матеріалу.

Вивчення фізичної природи руйнування при повзучості в широкому діапазоні зміни напруження, швидкості процесу, температури й часу показує, що для тривалих процесів високотемпературної повзучості, коли зміцненням можна зневажити, досить обмежитися двома структурними параметра ω_1 й ω_2, що відображають накопичення пошкоджень відповідно від максимальних нормальних напружень, при яких виникають клиноподібні тріщини на стиках границь зерен і максимальних дотичних напружень, при яких виникають мікропори на границях зерен. Два види накопичення мікропошкоджуваності від дії нормальних і дотичних напружень відображають дуалізм мікропошкоджуваності при повзучості й дозволяють підвищити точність опису процесу деформування й руй-

нування на великій часовій базі, як при статичному навантаженні в умовах розтягання, так і при складному напруженому стані й знакозмінному навантаженні.

Умова незалежності кінетики утворення й розвитку мікропроцесів руйнування при повзучості приводить до найпростіших феноменологічних моделей, які придатні для практичних розрахунків на довготривалу міцність.

В той же час при розробці методів розрахунків довготривалої міцності конструкційних матеріалів і застосуванні цих методів до дослідження реальних конструкцій необхідно зважати на досить великий розкид дослідних даних за часом до руйнування [2]. Найбільш природній шлях опису розкиду полягає в побудові фізично адекватної імовірнісної моделі руйнування й використанні методів статистичної фізики. Цей шлях, у застосуванні до розглянутої проблеми, пов'язаний з великими труднощами через складність і різномасштабної неоднорідності структурних елементів твердих тіл. Можливості одержання таким шляхом кількісних характеристик довговічності сучасних технічних матеріалів у загальному досить обмежені. Із прикладної точки зору більш ефективні статистичні методи, що спираються на прямі експериментальні дані про розкид і на найпростіші імовірнісні моделі.

Основна частина. У [5- 7] розглянута ймовірнісна модель руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, що базується на позиціях теорії надійності. Припускається, що при руйнуванні зразка під дією постійної навантаження між величиною деформації повзучості ε, накопиченої за час t, і ймовірністю не руйнування P зразка в даний момент часу існує функціональна залежність. В теорії надійності широко використовується показник, що називається інтенсивністю відмов, який пов'язано з ймовірністю безвідмовної роботи (ймовірністю неруйнування) $P(t)$ наступною залежністю [1]

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)\, dt \right]. \qquad (1)$$

У більшості випадків функція інтенсивності відмов $\lambda(t)$ змінюється з плином часу немонотонно і має $U-$ образну форму. Типова крива залежності швидкості деформації повзучості від часу має аналогічний характер, тобто функцію $\lambda(t)$ з точністю до постійної можна представити у вигляді

$$\lambda(t) = C \cdot \dot{\varepsilon}(t). \qquad (2)$$

Підставляючи вираз (2) в (1), враховуючи що $\varepsilon(0)=0$, отримуємо $P(t)=\exp\left[-C\cdot\varepsilon(t)\right]$. Постійна C визначається з умови $P=P_*$ при $\varepsilon=\varepsilon_*$ (P_* – ймовірність неруйнування зразка при досягненні деформацією повзучості величини ε_*, де ε_* – середнє значення величини деформації повзучості у момент руйнування). Після нескладних перетворень маємо наступне співвідношення

$$P(t)=\exp\left[\frac{-m\cdot\varepsilon(t)}{\varepsilon_*}\right], \qquad (3)$$

де $m=-\ln P_*\geq 0$ – параметр, який визначається за результатами випробувань матеріалу на повзучість до руйнування.

Середній час до руйнування $\langle t_*\rangle$ і його середнє квадратичне відхилення $\langle\sigma_t\rangle$ в умовах повзучості визначаються на основі першого і другого моменту розподілу у вигляді

$$\langle t_*\rangle=\int_0^\infty P(t)dt\,;$$

$$\langle\sigma_t\rangle=\left\{2\int_0^\infty tP(t)dt-\left(\int_0^\infty P(t)dt\right)\right\}^{1/2}. \qquad (4)$$

Зневажаючи зміцненням на першій стадії процесу (справедливо для тривалої високотемпературної повзучості), можна записати наступну систему кінетичних рівнянь:

$$\dot{\varepsilon}=a\sigma_e^n\exp(n\varepsilon)(1-\omega_j)^{-q},\ j=1,2\,; \qquad (5)$$

$$\dot{\omega}_1=b\sigma_e^k\exp(k\varepsilon)(1-\omega_1)^{-1}\,; \qquad (6)$$

$$\dot{\omega}_2=c\sigma_e^p\exp(p\varepsilon)(1-\omega_2)^{-8}, \qquad (7)$$

де ω_1 й ω_2 - міжзерена й внутризерена пошкоджуваність; σ_e - еквівалентне напруження; $a, b, c, p, n, k, q, r, s$ - постійні матеріалу при фіксованій температурі.

Фізичні рівняння (5) – (7) справедливі при простих або близьких до них навантаженнях, коли тензор напружень у будь-якій точці тіла залишається постійним, незважаючи на те, що в різних точках він є різним. У випадку однорідного напруженого стану навантаження буде простим,

якщо зовнішні навантаження зростають із моменту їх додатка пропорційно одному загальному параметру.

Розділивши рівняння (5) на рівняння (6) і на (7), отримаємо диференціальні рівняння для функцій ω_j, розв'язок яких має вигляд

$$1-\omega_1=\left\{1-\frac{b(r-r+1)}{a}\sigma_e^{-(n-k)}\int_0^{\varepsilon}\exp\left[-(n-k)\varepsilon\right]d\varepsilon\right\}^{1/(r-q+1)}; \quad (8)$$

$$1-\omega_2=\left\{1-\frac{c(s-q+1)}{\alpha}\sigma_e^{-(n-p)}\int_0^{\varepsilon}\exp\left[-(n-p)\varepsilon\right]d\varepsilon\right\}^{1/(s-q+1)}. \quad (9)$$

Підставляючи в (4) вираз (3) та враховуючи (5) – (9) одержимо співвідношення для часу руйнування і його середнє квадратичного відхилення у двох випадках:

1) для руйнування, яке йде переважно по границях зерен з утворенням клиноподібних тріщин

$$<t_*>=nt_1\int_0^{\varepsilon_*}\exp[-(n+m\varepsilon_*)]\,f_1(\varepsilon)d\varepsilon; \quad (10)$$

$$<\sigma_t>=nt_1\left\{2\int_0^{\varepsilon_*}[\int_0^{\varepsilon}\exp[-(n+m\varepsilon_*)]\,f_1(\varepsilon)d\varepsilon]\exp[-(n+m\varepsilon_*)\,f_1(\varepsilon)d\varepsilon-\right.$$

$$\left.-(\int_0^{\varepsilon_*}\exp[-(n+m\varepsilon_*)]\,f_1(\varepsilon)d\varepsilon)^2\right\}^{1/2}, \quad (11)$$

де $f(\varepsilon)=\{1-\frac{n-k}{\nu_1}\int_0^{\varepsilon}\exp[-(n-k)\varepsilon]d\varepsilon\}^{\lambda_1-1}$; $\lambda_1=\frac{r+1}{r-q+1}$; $\nu_1=\frac{1+r}{n}\frac{n-k}{r-q+1}\frac{t_1}{t_2}$;

$t_1=1/(an\sigma_e^n)$ - час в'язкого руйнування (руйнування йде переважно по тілу зерна); $t_2=1/[b(1+r)\sigma_e^k]$ - час крихкого руйнування (руйнування йде переважно з утворенням клиноподібних тріщин;

2) для руйнування, яке йде переважно по границях зерен з утворенням пор

$$< t_* >= nt_1 \int_0^{\varepsilon_*} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_2(\varepsilon) d\varepsilon ; \qquad (12)$$

$$< \sigma_t >= nt_1 \left\{ 2 \int_0^{\varepsilon_*} [\int_0^{\varepsilon} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_2(\varepsilon) d\varepsilon] \exp[-(n+m\varepsilon_*) f_2(\varepsilon) d\varepsilon - \right.$$

$$\left. -(\int_0^{\varepsilon_*} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_2(\varepsilon) d\varepsilon)^2 \right\}^{1/2} , \qquad (13)$$

де $f_2(\varepsilon) = \{1 - \frac{n-p}{\nu_2} \int_0^{\varepsilon} \exp[-(n-p)\varepsilon] d\varepsilon\}^{\lambda_2 - 1}$; $\lambda_2 = \frac{s+1}{s-q+1}$; $\nu_2 = \frac{1+s}{n} \frac{n-p}{r-q+1} \frac{t_3}{t_1}$;

$t_3 = 1/[c(1+s)\sigma_e^p]$ - час крихкого руйнування, коли руйнування йде переважно по границях зерен з утворенням пор.

Можливі два варіанти розв'язку задачі для двох критеріїв тривалої міцності.

Варіант 1. Величина деформації повзучості прямує до нескінченності.

З рівностей (8) і (9) випливає, що існує деяке кінцеве значення пошкодження для двох розглянутих випадків, коли $\omega_1 = \omega_{*1}$ й $\omega_2 = \omega_{*2}$, які відповідають моменту руйнування. Причому

$$\omega_{*1} = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\nu_1} \right\}^{1/(r-q+1)} ; \qquad (14)$$

$$\omega_{*2} = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\nu_2} \right\}^{1/(s-q+1)} . \qquad (15)$$

У цьому випадку співвідношення (10) - (13) приймають вигляд

$$< t_* >= nt_1 \cdot \int_0^{\infty} \exp[-n\varepsilon] f_1(\varepsilon) d\varepsilon ;$$

$$< \sigma_t >= 0 ;$$

$$< t_* >= nt_1 \cdot \int_0^{\infty} \exp[-n\varepsilon] f_2(\varepsilon) d\varepsilon ;$$

$$< \sigma_t >= 0 .$$

Варіант 2. Умова руйнування $\max\{\varepsilon,\omega_1,\omega_2\}=[\varepsilon_*\bigcup 1]$, як випливає з (8) і (9) досягається при деякому кінцевому значенні деформації повзучості, яке визначається одним зі співвідношень для руйнування, яке йде переважно по границях зерен з утворенням клиноподібних тріщин

$$\varepsilon_{*1}=-\frac{1}{n-k}\ln[1-\frac{a(n-k)}{b(r-q+1)}\sigma_e^{n-k}] \qquad (16)$$

для руйнування, яке йде переважно по границях зерен з утворенням пор

$$\varepsilon_{*2}=-\frac{1}{n-p}\ln[1-\frac{a(n-p)}{c(s-q+1)}\sigma_e^{n-p}]\,. \qquad (17)$$

З рівностей (16) і (17) знаходиться деформація повзучості у момент руйнування ε_{*1} і ε_{*2}, а зі співвідношень (10) - (13) – середні часи до руйнування і їх середньоквадратичні відхилення.

Зі співвідношень (16) і (17) можна отримати умови руйнування для випадків коли руйнування здійснюється по границях зерен з утворенням клиноподібних тріщин

$$\sigma_e<\left[\frac{b(r-q+1)}{a(n-k)}\right]^{1/(n-k)}=\sigma'_e\,. \qquad (18)$$

Та, коли руйнування здійснюється по границях зерен з утворенням пор

$$\sigma_e<\left[\frac{c(s-q+1)}{a(n-p)}\right]^{1/(n-p)}=\sigma'_e\,. \qquad (19)$$

З співвідношень (18) і (19) витікає залежність між постійними повзучості b, c, k, r, s, p, що характеризують накопичення пошкоджень відповідно від максимальних нормальних напружень (клиноподібні тріщини на стиках границь зерен) і максимальних дотичних напружень (мікропори на границях зерен)

$$\left[\frac{b(r-q+1)}{a(n-k)}\right]^{1/(n-k)}=\left[\frac{c(s-q+1)}{a(n-p)}\right]^{1/(n-p)}\,.$$

Було проведено порівняння теоретичних розрахунків з результатами випробувань на довготривалу міцність зразків з корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т при температурі 850°Су випадку простого розтягання, коли руйнування йде з утворенням клиноподібних тріщин [2]. Константи мате-

ріалу визначалися після обробки відповідних експериментів на повзучість і довготривалу міцність:

$$a = 0,63 \cdot 10^{-8}\, МПа^{-3,2} \cdot год; \quad n = 3,2; \quad q = 0,7;$$

$$c = 0,58 \cdot 10^{-7}\, МПа^{-3,12} год; \quad k = 3,12; \quad r = 1,56; \quad m = 0,4\,.$$

У табл. 1 наведені експериментальні (третій і четвертий стовпці) і розрахункові (п'ятий і шостий стовпці) значення часу до руйнування зразків і їх середньоквадратичні відхилення, визначені за допомогою співвідношень (10) і (11).

Таблиця 1 – **Експериментальні і розрахункові значення часу до руйнування для моделі (10), (11) на прикладі експериментальних даних для зразків з корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т при температурі T= 850°С**

N	σ_e , $МПа$	t_* , $год$	σ_t , $МПа$	$< t_* >$, $год$	$< \sigma_t >$, $год$
10	39,24	51,3	14,5	52,3	16,1
11	49,05	21,8	5,1	26,0	8,0
6	58,86	16,4	5,0	14,7	4,5
2	78,48	6,0	0	6,0	1,8

У першому стовпці табл. 1 зазначено кількість зразків N , які випробувались при фіксованому значенні напруження σ_e .

З таблиці бачимо, що теоретичні результати добре узгоджуються з результатами експериментів як за часом руйнування, так і за його середньоквадратичним відхиленням.

Висновки. Запропонована ймовірнісна модель довготривалої міцності може використовуватись при прогнозуванні часу руйнування елементів конструкцій, які працюють в умовах температурної повзучості.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. ***Болотин В. В.*** Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.

2. Закономерности ползучести и длительной прочности: справочник / ред. С. А. Шестериков. М. : Машиностроение, 1983. 101 с.

3. ***Качанов Л. М.*** Основы механіки разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с.

4. ***Кулик Н. С.***, *Кучер А. Г., Мильцов В. Е.* Вероятностный аналіз процес сов накопления повреждений при действии статических и циклических загрузок // Вестник Нац. авиационного ун-та. 2010. №1. С. 5–39.

5. ***Пошивалов В. П.*** Определение времени до разрушения в условиях ползучести // Изв. вузов. Машиностроение. 1989. №11. С. 19–23.

6. ***Пошивалов В. П.*** Об одном подходе к определению времени до разрушения в условиях ползучести // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. №3. С. 56–60.

7. ***Пошивалов В. П.*** Визначення часу руйнування в умовах повзучості при нелінійних накопиченнях пошкоджень // Технічна механіка. 2022. №1. С. 36–41.

8. ***Работнов Ю. Н.*** Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.

UDC 539.376

V. P. Poshyvalov, Dr. Sci.(Tech.)
ORCID ID: 0000-0003-4782-5942

PROBABLE MODEL OF LONG-TERM STRENGTH OF STRUCTURAL MATERIALS BASED ON KINETIC THEORY

A probabilistic model of long-term durability based on kinetic theory and reliability theory is proposed. Two cases were considered, when the fracture proceeds mainly along the grain boundaries with the formation of wedge-shaped cracks and when the fracture proceeds mainly along the grain boundaries with the formation of pores. For the power laws of creep and intergranular and intragranular damage, the average time to failure and its root mean square deviation are determined. The comparison of theoretical calculations with the results of experiments on the long-term strength of samples made of corrosion-resistant steel 12X18H10T was carried out.

Keywords: *long lasting strength, creep, probability of non-destruction, vulnerability, time to destruction, root mean square deviation of time to failure.*

In the work, it is assumed that when the sample is destroyed under the action of a constant load, there is a functional dependence between the value of the creep deformation ε accumulated over time t and the probability of the sample not being destroyed P at this moment in time.

The average time to failure $\langle t_* \rangle$ and its root mean square deviation $\langle \sigma_t \rangle$ under creep conditions are determined on the basis of the first and second moments of the distribution.

Neglecting hardening at the first stage of the process (just for prolonged high-temperature creep), the following system of kinetic equations can be written:

$$\dot{\varepsilon} = a\sigma_e^n \exp(n\varepsilon)(1-\omega_j)^{-q},\ j = 1,2\ ;$$

$$\dot{\omega}_1 = b\sigma_e^k \exp(k\varepsilon)(1-\omega_1)^{-1}\ ;$$

$$\dot{\omega}_2 = c\sigma_e^p \exp(p\varepsilon)(1-\omega_2)^{-8}\ ,$$

where are intergranular ω_1 and intragranular ω_2 damage; σ_e is equivalent stress; $a, b, c, p, n, k, q, r, s$ are constants of the material at a fixed temperature.

Based on these equations, the relationships for the time of destruction and its mean square deviation in two cases are obtained:

1) for destruction that proceeds mainly along grain boundaries with the formation of wedge-shaped cracks

$$< t_* >= nt_1 \int_0^{\varepsilon_*} \exp[-(n+m\varepsilon_*)]\, f_1(\varepsilon) d\varepsilon\ ;$$

$$< \sigma_t >= nt_1 \left\{ 2 \int_0^{\varepsilon_*} [\int_0^{\varepsilon} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_1(\varepsilon) d\varepsilon] \exp[-(n+m\varepsilon_*) f_1(\varepsilon) d\varepsilon - \right.$$

$$\left. - (\int_0^{\varepsilon_*} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_1(\varepsilon) d\varepsilon)^2 \right\}^{1/2},$$

where $f(\varepsilon) = \{1 - \frac{n-k}{\nu_1} \int_0^{\varepsilon} \exp[-(n-k)\varepsilon] d\varepsilon\}^{\lambda_1 - 1}$; $\lambda_1 = \frac{r+1}{r-q+1}$; $\nu_1 = \frac{1+r}{n} \frac{n-k}{r-q+1} \frac{t_1}{t_2}$;

$t_1 = 1/(an\sigma_e^n)$ is time of viscous destruction (destruction occurs mainly along the body of the grain); $t_2 = 1/[b(1+r)\sigma_e^k]$ is the time of brittle failure (the failure occurs mainly with the formation of wedge-shaped cracks;

2) for destruction, which proceeds mainly along grain boundaries with the formation of pores

$$< t_* >= nt_1 \int_0^{\varepsilon_*} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_2(\varepsilon) d\varepsilon;$$

$$< \sigma_t >= nt_1 \left\{ 2 \int_0^{\varepsilon_*} [\int_0^{\varepsilon} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_2(\varepsilon) d\varepsilon] \exp[-(n+m\varepsilon_*) f_2(\varepsilon) d\varepsilon - \right.$$

$$\left. - (\int_0^{\varepsilon_*} \exp[-(n+m\varepsilon_*)] f_2(\varepsilon) d\varepsilon)^2 \right\}^{1/2},$$

where $f_2(\varepsilon) = \{1 - \frac{n-p}{\nu_2} \int_0^{\varepsilon} \exp[-(n-p)\varepsilon] d\varepsilon\}^{\lambda_2 - 1}$; $\lambda_2 = \frac{s+1}{s-q+1}$; $\nu_2 = \frac{1+s}{n} \frac{n-p}{r-q+1} \frac{t_3}{t_1}$;

$t_3 = 1/[c(1+s)\sigma_e^p]$ is the time of brittle fracture, when the fracture occurs mainly along grain boundaries with the formation of pores.

The comparison of theoretical calculations was made with the results of tests on the long-term strength of samples of corrosion-resistant steel 12X18H10T at a temperature of 850°C in the case of simple stretching, when the destruction proceeds with the formation of wedge-shaped cracks.

Material constants were determined after processing the relevant experiments on creep and long-term strength

$$a = 0.63 \cdot 10^{-8} MPa^{-3,2} \cdot hour; \quad n = 3.2; \quad q = 0.7;$$

$$c = 0.58 \cdot 10^{-7} MPa^{-3,12} hour; \quad k = 3.12; \quad r = 1.56; \quad m = 0.4.$$

Table 1 shows the experimental (third and fourth columns) and calculated (fifth and sixth columns) values of the time to failure of the samples and their root mean square deviations determined using the obtained ratios.

Table 1 – **Experimental and calculated values of the time to destruction on the example of experimental data for samples of corrosion-resistant steel 12X18H10T at a temperature of T = 850°C**

N	σ_e , *MPa*	t_* , *hour*	σ_t , *MPa*	$< t_* >$, *hour*	$< \sigma_t >$, *hour*
10	39.24	51.3	14.5	52.3	16.1
11	49.05	21.8	5.1	26.0	8.0
6	58.86	16.4	5.0	14.7	4.5
2	78.48	6.0	0	6.0	1.8

The first column of Table 1 shows the number of samples N that were tested at a fixed stress value σ_e. From the table, we can see that the theoretical results are in good agreement with the experimental results both in terms of the time of destruction and in terms of its root mean square deviation. The proposed probabilistic model of long-term strength can be used in predicting the time of destruction of structural elements operating under conditions of temperature creep.

REFERENCES

1. ***Bolotin V. V.*** Resource of machines and structures. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 448 p. (in Russian).

2. Patterns of creep and long-term strength: reference book / ed. S. A. Shesterikov. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 101 p. (in Russian).

3. ***Kachanov L. M.*** Fundamentals of fracture mechanics. Moscow: Nauka, 1974. 311 p. (in Russian).

4. ***Kulik N. S.,*** *Kucher A. G., Miltsov V. E.* Probabilistic analysis of damage accumulation processes under the action of static and cyclic loads // Bulletin of the National Aviation University. 2010. №1. P. 5–39. (in Russian).

5. ***Poshivalov V. P.*** Determining the time to fraclure under creep conditions // Izv. universities. Engineering. 1989. No. 11. P. 19–23. (in Russian).

6. ***Poshivalov V. P.*** On One Approach to Determining the Time to Fracture under Creep Conditions // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 1993. No. 3. P. 56–60. (in Russian).

7. ***Poshivalov V. P.*** Determining the time to fracture under creep condition in case of non-linear accumulation of damages // Tekhnichna mekhanika. 2022. №1. P. 36-41. (in Ukranian).

8. ***Rabotnov Yu. N.*** Creep of structural elements. Moscow: Nauka, 1966. 752 p. (in Russian).

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і
Державного космічного агентства України,
Дніпро, Україна

Надійшла до редколегії 20.11.2022