

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДОЯР ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 539.376

**УЗАГАЛЬНЕНА СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ РУЙНУВАННЯ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПОВЗУЧОСТІ
З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ТА ЗМІЦНЕННЯ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Пошивалов Володимир Павлович** Інститут технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України м. Дніпро, провідний науковий співробітник відділу міцності і надійності механічних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Бреславський Дмитро Васильович** Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, завідувач кафедру комп'ютерного моделювання процесів та систем

доктор фізико-математичних наук, професор **Стеблянко Павло Олексійович** Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, завідувач кафедру вищої математики

Захист відбудеться 29 травня 2018 року о 13:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Запорізького національного технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64 та на сайті університету у розділі «Наука» – «Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розісланий «11» квітня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



О. А. Мітяєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Визначення достовірних характеристик довговічності конструкційних матеріалів є актуальною задачею авіаційної, космічної та інших галузей промисловості. При цьому необхідно враховувати, що для зразків, виготовлених з однієї виливки металу, при випробуваннях на повзучість і довготривалу міцність має місце великий розкид по часу до руйнування навіть в ідеальних лабораторних умовах. У зв'язку з цим виникла необхідність розробки стохастичних моделей повзучості і довготривалої міцності, які з одного боку обґрунтовують імовірнісний характер руйнування, а з іншого – дозволяють з достатньою точністю визначати час до руйнування і його можливий розкид. Ця проблема особливо актуальна для визначення показників довготривалої міцності алюмінієвих сплавів і різних марок сталей, що працюють при постійних навантаженнях і високих температурах, коли проявляється ефект повзучості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана здобувачем у відділі міцності і надійності механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) при виконанні науково-дослідних робіт за 2012 – 2015 роки в рамках фундаментальних досліджень за відомчою темою «Підвищення довговічності елементів конструкцій за рахунок збудження самоорганізаційних процесів» (шифр – Ш-71-11, номер державної реєстрації 0111U001440) та 2016 – 2017 роки за темою «Моделювання напружено-деформованого стану елементів конструкцій неоднорідної структури та прогнозування надійності і довговічності складних технічних систем» (шифр – Ш-92-16, номер державної реєстрації 0116U004125), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є побудова стохастичної моделі руйнування при повзучості конструкційних матеріалів, що працюють при підвищених температурах і навантаженнях, яка дозволяє за заданими значеннями напруження та температури визначати імовірнісний розподіл часу до руйнування матеріалу, а також здійснювати екстраполяцію довготривалої міцності на терміни служби, що перевищують на декілька порядків тривалість експериментів.

Досягнення мети передбачає вирішення наступних задач:

– розробку стохастичної моделі руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, яка б відображала випадкову природу довготривалої міцності та була зручною для проведення розрахунків;

– розробку методики ідентифікації сталих повзучості матеріалу, що базується на обробці сімейства експериментальних кривих повзучості;

– перевірку адекватності побудованої моделі за результатами експериментальних досліджень на повзучість зразків зі сталі 12X18H10T та алюмінієвого сплаву РА6 (аналог АМг6);

– розробку стохастичного методу базових діаграм, що застосовується для екстраполяції довготривалої міцності конструкційних матеріалів;

– перевірку адекватності побудованого методу за результатами експериментальних досліджень на довготривалу міцність зразків зі сталі 08X18H10.

Об'єктом дослідження є явище руйнування при повзучості конструкційних матеріалів, що працюють при підвищених температурах і навантаженнях.

Предметом дослідження є узагальнена стохастична модель руйнування при повзучості конструкційних матеріалів, що працюють при підвищених температурах і навантаженнях.

Методи дослідження. Запропоновані у дисертаційній роботі моделі та методи прогнозування часу до руйнування конструкційних матеріалів базуються на використанні методів теорії ймовірностей, математичної статистики та методів оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів:

– розроблено стохастичну модель руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, яка враховує як зміцнення так і пошкоджуваність матеріалу, що розширює область використання даної моделі у порівнянні з відомими лінійними моделями накопичення пошкоджень;

– вперше розглянуто змішаний критерій руйнування, який є комбінацією параметричного та деформаційного критеріїв і враховує як вплив параметра пошкоджуваності, так і вплив деформації повзучості на час до руйнування матеріалу;

– запропоновано методику ідентифікації сталих повзучості матеріалу, що базується на обробці сімейства експериментальних кривих повзучості;

– вперше розроблено стохастичний метод базових діаграм, що застосовується для екстраполяції довготривалої міцності конструкційних матеріалів на терміни служби, які на декілька порядків перевищують тривалість експериментів.

Практичне значення отриманих результатів. Прогнозування довговічності конструкційних матеріалів в умовах повзучості з метою оцінки їх часу до руйнування має важливе практичне значення. Результати дисертаційної роботи впроваджені в розрахункову практику ДП «КБ «Південне ім. М. Я. Янгеля» (м. Дніпро), де використовуються для оцінки можливості продовження строку експлуатації окремих вузлів та систем виробів, у яких закінчився гарантійний строк експлуатації, та в учбовий процес на механіко-математичному факультеті ДНУ ім. О. Гончара (при викладанні дисциплін: математичні моделі механіки, теорія повзучості та в'язкопружності, математичне моделювання).

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, які виносяться на захист, отримані автором особисто. В роботах, виконаних у співавторстві і опублікованих спільно у наукових виданнях, здобувачу належать:

– побудова стохастичної моделі руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, без урахування температурної залежності та стадії зміцнення матеріалу [1] – [3], [7] – [9];

– побудова стохастичної моделі руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, яка враховує температурну залежність та стадію зміцнення матеріалу [4] – [5], [10] – [11];

– розробка алгоритму ідентифікації сталих повзучості матеріалу з урахуванням усіх стадій повзучості [4] – [5], [10] – [11].

Розробка стохастичного методу базових діаграм виконана здобувачем самостійно [6].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних молодіжних науково-практичних конференціях «Людина і космос» (Дніпропетровськ, 2013, 2014, 2016), науковій конференції «Інформаційні технології в управлінні складними системами» (Дніпропетровськ, 2013), всеукраїнській науково-методичній конференції «Проблеми математичного моделювання» (Дніпродзержинськ, 2015). У повному обсязі робота обговорювалась на наукових семінарах відділу міцності і надійності механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (Дніпро, 2013 – 2016 рр., керівник семінару – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор В. С. Гудрамович), на семінарах Запорізького національного технічного університету (Запоріжжя, 2016 – 2017 рр., керівник семінару – доктор фізико-математичних наук, професор В. І. Пожуєв), на Вченій раді Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (Дніпро, 2017 р., голова Вченої ради – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор О. В. Пилипенко).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 11 наукових робіт. З них 6 статей у провідних фахових виданнях, одна з яких входить до міжнародної наукометричної бази – SCOPUS та перекладена на англійську мову і опублікована в іноземному рейтинговому журналі “Eastern-European Journal of Enterprise Technologies”, 5 тез доповідей у збірках праць міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 152 сторінки, об’єм основного тексту – 111 сторінок, 18 рисунків, 14 таблиць. Список використаних джерел включає 153 найменування на 16 сторінках. Додатки займають 7 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подається загальна характеристика дисертаційної роботи. Зокрема, обґрунтовується актуальність її теми, сформульована мета та задачі дослідження, визначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Вказано на зв’язок роботи з науковими темами Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, висвітлено особистий внесок здобувача та наведені його публікації, в яких викладений основний зміст дисертаційної роботи.

У **першому розділі** відмічається, що значний внесок при вивченні характеристик довготривалої міцності внесли українські та закордонні вчені такі як В. В. Болотін, Д. В. Бреславський, В. С. Гудрамович, П. О. Стебляк, В. П. Пошивалов, В. П. Голуб, В. Г. Карнаухов, Л. М. Качанов, В. І. Ковпак, В. В. Кривенюк, М. К. Кучер, О. М. Локощенко, О. К. Морачковський,

Г. С. Писаренко, Ю. М. Работнов, В. П. Радченко, Ю. П. Самарін, І. І. Трунін, С. О. Шестериков, N. J. Hoff та інші. Ці автори для опису процесів тривалого деформування матеріалів розробили цілий ряд математичних моделей, які сприяють глибокому розумінню процесів повзучості.

У розділі виконано огляд феноменологічних та структурних моделей руйнування конструкційних матеріалів при повзучості та методів прогнозування їх довговічності. Зазначено, що структурні моделі засновані на математичному описанні фізики процесу накопичення пошкоджень на одному або декількох рівнях структури, де руйнування розглядається як незворотній процес накопичення мікротріщин, що виникають в результаті термофлуктуаційних розривів міжатомних зв'язків в механічно напруженому матеріалі. Структурні моделі дозволяють знайти спосіб переносу експериментальних даних, отриманих для одного з видів навантажування та поведінки матеріалу на інші, а також об'єднувати експериментальні дані, що відносяться до різних видів напруженого стану та зовнішнього впливу. Існує велика кількість структурних моделей, наприклад, побудованих В. С. Зарубіним, К. Н. Русінко, С. Б. Батдорфом, Д. А. Гохфельдом, О. С. Садаковим, Ю. І. Кадашевичем, М. А. Кузьмінім, В. В. Новожиловим, Ю. Н. Шевченко, Р. Г. Тереховим, Д. Ф. Бесселінгом та іншими авторами із залученням чисто формальних міркувань для подання матеріалу у вигляді конструкцій різного рівня складності.

Феноменологічні моделі у свою чергу є більш простими з математичної точки зору і на макрорівні досить повно відображають основні закономірності процесу пошкоджуваності матеріалів, хоча і не включають опису його механізмів. При дослідженні феноменологічних моделей слід розрізняти кінетичний підхід, в рамках якого застосовуються різні критерії руйнування. Різні види кінетичних рівнянь пошкоджуваності були запропоновані в роботах Л. М. Качанова, М. М. Малініна, Ю. М. Работнова, С. О. Шестерикова, О. В. Сосніна, J. Vult, F. A. Leckie, D. R. Nayhurst, S. Murakami, J. Lemaitre, Shen Huairong та ін.

Також у розділі описано детермінований метод базових діаграм (МБД). Цей метод запропонований В. С. Кривенюком та застосовується для екстраполяції довготривалої міцності конструкційних матеріалів на терміни служби, що на декілька порядків перевищують тривалість експериментів.

У **другому розділі** детально проаналізовано декілька відомих ймовірнісних моделей довготривалої міцності конструкційних матеріалів. Перша з моделей запропонована В. П. Пошиваловим і базується на позиціях теорії надійності. Припускається, що при руйнуванні зразка під дією постійного навантаження між величиною деформації повзучості ε , накопиченої за час t , і ймовірністю неруйнування P зразка в даний момент часу існує функціональна залежність. Рівняння повзучості і довготривалої міцності приймаються у вигляді степеневих залежностей (1), (2) з урахуванням поперечного звуження зразка в процесі деформування:

$$\dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon^{\alpha} = a \cdot \sigma_0 \cdot \exp(n\varepsilon) \cdot (1 - \omega)^{-q}, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = c \cdot \sigma_0^k \cdot \exp(k\varepsilon) \cdot (1 - \omega)^{-r}, \quad (2)$$

де a, c, k, n, r, q, α – постійні матеріалу при даній температурі, які вважаються детермінованими;

σ_0 – номінальне напруження, віднесене до первісної площі поперечного перерізу;

ω – параметр пошкоджуваності.

Розглянуто два варіанти розв'язку задачі для двох критеріїв довготривалої міцності:

– величина деформації повзучості прямує до нескінченності, при цьому існує деяке скінчене значення пошкоджуваності $\omega = \omega_0$, яке відповідає моменту руйнування;

– умова руйнування $\omega = 1$ досягається при деякому скінченному значенні деформації повзучості $\varepsilon = \varepsilon_*$.

Показано, що теоретичні результати добре узгоджуються з експериментальними даними як за часом до руйнування, так і за середньоквадратичним відхиленням. Необхідно зазначити, що запропонована модель не враховує залежності процесу повзучості від температури і розглядає усереднені значення невідомих параметрів замість їх розподілів, що робить дану модель обмеженою у ймовірнісному сенсі.

У другій моделі розглянуто ймовірнісний підхід оцінки довговічності конструкційних матеріалів в умовах повзучості за катастрофічним критерієм відмови, який запропоновано В. П. Радченко. Для опису випадкових властивостей матеріалу у цій роботі розглядається стохастична модель повзучості, яка описує другу та третю її стадії у наступному вигляді (3) – (6):

$$\dot{\varepsilon} = c \sigma^n(t) \quad , \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0(1 + \omega), \quad (4)$$

$$\dot{\omega} = \alpha \cdot \sigma \cdot \dot{\varepsilon} \quad , \quad (5)$$

$$\omega(0) = 0, \quad \varepsilon(0) = 0 \quad , \quad (6)$$

де ε – деформація повзучості;

σ, σ_0 – істинне та номінальне напруження;

c, α – випадкові величини;

n – детермінована величина;

ω – параметр пошкоджуваності.

В якості критерію руйнування тут використовується наступне співвідношення (7):

$$\int_0^{t^*} \sigma \, d\varepsilon = A_C^* \quad , \quad (7)$$

де A_C^* – величина роботи руйнування;

t^* – час до руйнування.

Показана добра відповідність розрахункових та експериментальних даних. Запропонована стохастична модель дозволяє аналітичними методами прогнозувати величину призначеного ресурсу за катастрофічним критерієм відмови, але не враховує стадію зміцнення матеріалу та залежності процесу повзучості від температури, що робить її застосовною лише для обмеженого класу конструкційних матеріалів.

Враховуючи недоліки запропонованих вище моделей, в роботі була поставлена мета розробити узагальнену стохастичну модель руйнування при повзучості, яка б дозволяла за заданими значеннями напруження і температури визначати імовірнісний розподіл часу до руйнування матеріалу та застосовувалась для екстраполяції довготривалої міцності на терміни служби, що на декілька порядків перевищують тривалість експериментів.

Третій розділ присвячено опису механічних та кінетичних теорій повзучості, у яких залежності швидкості повзучості від напруження, температури, часу, накопиченої миттєвої пластичної деформації і деякого числа параметрів визначають рівняння стану, за допомогою яких може бути охарактеризований структурний стан матеріалу. Зазначено, що при конкретизації рівнянь стану виникають певні труднощі, оскільки важко конкретно встановити вигляд шуканої функціональної залежності, а отже часто використовують різні гіпотези для встановлення цієї залежності. Найбільш відомими в інженерній практиці є теорії старіння, течії, зміцнення та спадковості.

Більш детально у розділі висвітлено основні гіпотези та визначальні рівняння кінетичної теорії Ю. М. Работнова, згідно якої процес повзучості конструкційних матеріалів можна описати за допомогою наступної системи кінетичних рівнянь, яка складається з кінетичного рівняння стану (8) та кінетичного рівняння пошкоджуваності (9):

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}(t, \sigma, T, \omega, c_1, c_2, \dots, c_n), \quad (8)$$

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}(t, \sigma, T, \omega, c_1, c_2, \dots, c_n), \quad (9)$$

де σ – напруження;

T – температура;

ω – структурний параметр пошкоджуваності;

ε – деформація повзучості;

t – час;

c_1, c_2, \dots, c_n – сталі повзучості матеріалу.

При цьому вводяться гіпотези про ізотропність матеріалу, пошкоджуваність у свою чергу вважається скалярною величиною. У розділі розглянуто параметричний, деформаційний та змішаний критерії руйнування матеріалу внаслідок повзучості та приведено їх ймовірнісну інтерпретацію.

У **четвертому розділі** представлена розроблена автором стохастична модель руйнування корозійностійкої сталі 12X18H10T при повзучості на основі параметричного, деформаційного та змішаного критеріїв руйнування без урахування температурної залежності та стадії зміцнення. Для описання процесу повзучості матеріалу з полином часу розглянуто систему кінетичних рівнянь, запропонованих

академіком Ю. М. Работновим. Кінетичне рівняння стану прийнято у вигляді степеневі залежності від напруження (10):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{a\sigma^n}{(1-\omega)^n}, \quad (10)$$

а кінетичне рівняння пошкоджуваності розглянуто у двох різних варіантах – степеневі залежності від напруження (11):

$$\dot{\omega} = \frac{b\sigma^k}{(1-\omega)^k}, \quad (11)$$

та експоненційної залежності від напруження (12):

$$\dot{\omega} = \frac{b \exp(\sigma/c)}{(1-\omega)^n}, \quad (12)$$

де a, b, n, k, c – сталі повзучості матеріалу.

У моделі використані припущення про те, що параметри n, k, c є детермінованими величинами, а параметри a та b є незалежними нормально розподіленими випадковими величинами. Деформація повзучості $\varepsilon(t)$ вважається гаусовим випадковим процесом. Для деформаційного критерію руйнування гранично допустиме значення деформації повзучості ε^* визначається як α -квантиль розподілу деформації повзучості у момент руйнування, де α – деяке наперед задане значення ймовірності. Далі прийнято значення ймовірності $\alpha = 0,1$.

У таблиці 1 представлені основні ймовірнісні характеристики розподілу часу до руйнування t_p , виражені у годинах.

Таблиця 1 – Основні ймовірнісні характеристики розподілу часу до руйнування t_p

Напруження σ , МПа	Температура T , °С	Розрахункові значення МС часу до руйнування t_p за критеріями, год			Розрахункові значення СВ часу до руйнування t_p за критеріями, год			Значення характеристик t_p за експериментами, год	
		ПКР	ДКР	ЗКР	ПКР	ДКР	ЗКР	ВС	ВСВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
39,24	850	47,51	39,1	36,28	12,96	10,21	6,23	53,83	14,93
		53,89	44,23	41,14	14,64	11,18	7,06		

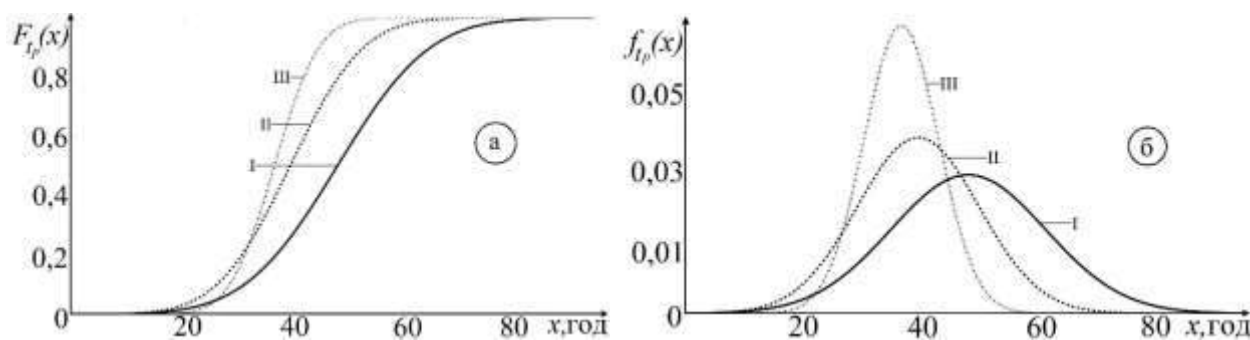
Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
49,05	850	24,49 31,19	17,39 22,11	16,56 21,25	5,05 7,8	4,7 4,79	2,99 3,35	23,5	4,22
58,86	850	11,04 16,22	6,95 7,77	6,83 7,69	5,9 8,07	2,2 2,56	1,72 2,19	15,37	5,01
78,48	850	3,4 5,19	4,53 5,56	4,24 5,02	4,15 4,12	1,06 1,06	0,84 0,93	6	0

Примітка. ПКР – параметричний критерій руйнування; ДКР – деформаційний критерій руйнування; ЗКР – змішаний критерій руйнування; МС – математичне сподівання; СВ – середньоквадратичне відхилення; ВС – вибіркове середнє; ВСВ – вибіркове середньоквадратичне відхилення.

Верхній рядок теоретичних розрахунків відповідає моделі, яка виражає степеневу залежність від напруження, нижній рядок – моделі, яка виражає експоненційну залежність від напруження. Як бачимо з таблиці, теоретичні результати добре узгоджуються з експериментальними даними як за часом до руйнування, так і за середньоквадратичним відхиленням для кожної із моделей. Модель, що виражає експоненційну залежність від напруження, більш точно прогнозує час до руйнування.

На рис. 1 представлені графіки функції і щільності розподілу часу до руйнування t_p для степеневої моделі при напруженні $\sigma = 39,24$ МПа та температурі $T = 850$ °С.



I – ПКР; II – ДКР; III – ЗКР; x – незалежна змінна, яка описує множину значень випадкової величини t_p

Рисунок 1 – Функція (а) та щільність (б) розподілу часу до руйнування t_p при напруженні $\sigma = 39,24$ МПа та температурі $T = 850$ °С для корозійностійкої сталі 12X18H10T

На кожному з даних рисунків проілюстровано графіки для трьох різних критеріїв руйнування, які показують відмінність значень ймовірності руйнування, розрахованої за різними критеріями за один і той же проміжок часу. Зокрема, з графіків випливає, що за заданий проміжок часу в більшості випадків ПКР прогнозує найменшу ймовірність руйнування, а ЗКР – найбільшу ймовірність руйнування.

П'ятий розділ присвячено розробці стохастичної моделі руйнування алюмінієвого сплаву РА6 при повзучості на основі параметричного, деформаційного та змішаного критеріїв руйнування з урахуванням температурної залежності та стадії зміцнення. Для описання процесу повзучості матеріалу з плином часу розглянуто систему кінетичних рівнянь, запропонованих академіком Ю. М. Работновим.

Кінетичне рівняння стану прийнято у вигляді (13):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{a \cdot \exp\left(-\frac{h}{T}\right) \cdot \sigma^n \cdot \left[1 + c \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{g}\right)\right]}{(1 - \omega)^n}, \quad (13)$$

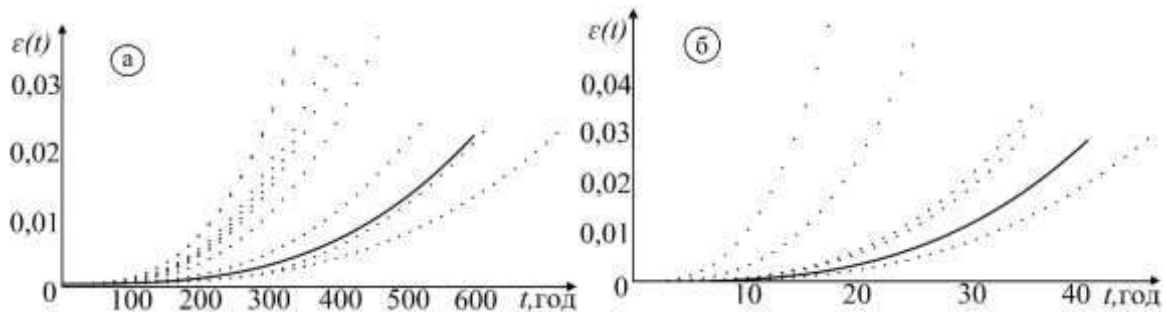
а кінетичне рівняння пошкоджуваності у вигляді (14):

$$\dot{\omega} = \frac{b \cdot \exp\left(-\frac{p}{T}\right) \cdot \sigma^m}{(1 - \omega)^l}, \quad (14)$$

де $a, b, n, m, l, p, h, c, g$ – сталі повзучості матеріалу.

У моделі параметри c, g описують деформаційне зміцнення, яке характерне для першої стадії повзучості. Параметри h та p залежать від універсальної газової постійної, крім того параметр h залежить також від енергії активації повзучості, а параметр p – від енергії активації пошкоджуваності. Використані припущення про те, що параметри n, m, l, p, h, c, g є детермінованими величинами, а параметри a, b – незалежними нормально розподіленими випадковими величинами. Деформація повзучості $\varepsilon(t)$ вважається гаусовим випадковим процесом.

На рисунку 2 наведено усереднені прогнозовані криві повзучості для різних експериментальних значень напруження та температури, причому для кожної такої пари проілюстровано порівняння відповідної кривої з експериментальними кривими повзучості, які схематично позначено точками. З рисунку 2 випливає, що у обох випадках усереднена прогнозована крива повзучості набуває одного і того ж значення деформації у порівнянні з більшістю експериментальних кривих повзучості за більший час, але треба відмітити, що ця крива будується, враховуючи оцінки невідомих параметрів моделі, які описують усі три стадії повзучості та експериментальні дані для різних значень напруження та температури. Усереднена прогнозована крива повзучості безпосередньо застосовується для отримання результатів прогнозування часу до руйнування за деформаційним критерієм руйнування.



суцільна лінія – прогнозована крива повзучості;
точкова лінія – експеримент

Рисунок 2 – Криві повзучості при напруженні $\sigma = 300$ МПа, температурі $T = 423$ °С (а) та при напруженні $\sigma = 200$ МПа, температурі $T = 473$ °С (б) для алюмінієвого сплаву РА6

У таблиці 2 представлені експериментальні та розрахункові значення основних імовірнісних характеристик часу до руйнування t_p , виражені у годинах. При визначенні гранично допустимого значення деформації повзучості ε^* для деформаційного критерію руйнування прийнято значення ймовірності $\alpha = 0,1$. Як бачимо з таблиці, теоретичні результати добре узгоджуються з експериментальними даними як за часом до руйнування, так і за його середньоквадратичним відхиленням.

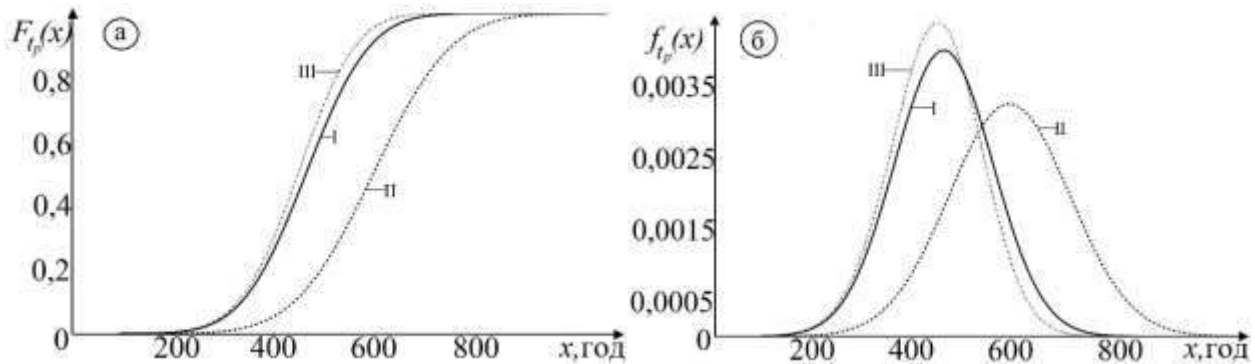
Таблиця 2 – Розрахункові значення основних імовірнісних характеристик часу до руйнування t_p за експериментами та критеріями

Напруження σ , МПа	Температура T , °С	Розрахункові значення характеристики МС часу до руйнування t_p за критеріями, год			Розрахункові значення характеристики СВ часу до руйнування t_p за критеріями, год			Значення характеристик t_p за експериментами, год	
		ПКР	ДКР	ЗКР	ПКР	ДКР	ЗКР	ВС	ВСВ
300	423	465,18	596,54	448,25	102,85	126,43	93,245	436,1	126,8
200	473	32,81	40,57	30,75	7,55	8,59	6,74	31,72	9,98

Примітка. ПКР – параметричний критерій руйнування; ДКР – деформаційний критерій руйнування; ЗКР – змішаний критерій руйнування; МС – математичне сподівання; СВ – середньоквадратичне відхилення; ВС – вибіркове середнє; ВСВ – вибіркове середньоквадратичне відхилення.

На рис. 3 представлені графіки функції і щільності розподілу часу до руйнування t_p при напруженні $\sigma = 300$ МПа та температурі $T = 423$ °С. На кожному з даних рисунків проілюстровано графіки для трьох різних критеріїв руйнування.

Графіки показують відмінність значень ймовірності руйнування, розрахованої за різними критеріями за один і той же проміжок часу. Зокрема, з них випливає, що за заданий проміжок часу ДКР прогнозує найменшу ймовірність руйнування, а ЗКР – найбільшу ймовірність руйнування.



I – ПКР; II – ДКР; III – ЗКР; x – незалежна змінна, яка описує множину значень випадкової величини t_p

Рисунок 3 – Функція (а) і щільність (б) розподілу часу до руйнування t_p при напруженні $\sigma = 300$ МПа та температурі $T = 423$ °С для алюмінієвого сплаву РА6

Результати прогнозування часу до руйнування алюмінієвого сплаву РА6 за допомогою відомих параметричних методів представлені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Прогнозовані значення часу до руйнування сплаву РА6 при використанні різних методів

Тем- пера- тура, °С	Нап- ружен- ня, МПа	Прогнозовані значення часу до руйнування сплаву РА6 при використанні методів, год			Експери- менталь- ний час до руйнуван- ня, год
		Менсона – Саккопа	Ларсона – Міллера	Орра – Шербі – Дорна	
423	300	419,7	419,8	419,09	436,1
473	200	30,03	30,16	29,93	31,72

Як бачимо з таблиць 2 та 3, стохастична модель руйнування при використанні параметричного та деформаційного критеріїв поступається, а при використанні змішаного критерію переважає по точності прогнозування відомі параметричні методи. З ймовірнісної точки зору стохастична модель руйнування є більш

коректною у порівнянні з відомими параметричними методами, оскільки вона враховує випадкову природу довготривалої міцності і дозволяє прогнозувати не «усереднений» час до руйнування, а його ймовірнісний розподіл. Також у розділі проілюстровано прогнозовані криві повзучості алюмінієвого сплаву РА6 для експериментальних значень напруження та температури, а також їх невеликих варіювань (зміна напруження складає $(\pm 10 \text{ МПа})$, а температури – $(\pm 10 \text{ }^\circ\text{C})$ у порівнянні з експериментальними даними).

У шостому розділі розроблено стохастичний метод базових діаграм (СМБД), який призначено для екстраполяції довготривалої міцності конструкційних матеріалів. В основі детермінованого методу базових діаграм, запропонованого В. В. Кривенюком, лежить поняття базових діаграм деформування, що описуються співвідношенням (15):

$$\lg(\tilde{\sigma}) = 3,6 - p \cdot [12 + \lg(t) + 0,1 \cdot \lg^2(t)], \quad (15)$$

де p – параметр, який визначає проходження діаграми через точку (σ, t) з якої здійснюється екстраполяція;

$\tilde{\sigma}$ – екстрапольоване значення напруження.

Треба враховувати, що константи, які використовуються у співвідношенні (15), отримані шляхом обробки декількох сотень діаграм довготривалої міцності, де напруження вимірювалось у МПа, а час – у годинах. Припускається, що із експериментів на довготривалу міцність нам відомі величини напружень σ_i та довговічностей t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) при деяких фіксованих температурах T_k ($k = 1, 2, \dots, m$).

Відрізки діаграми довготривалої міцності $L_1L_2, L_2L_3, \dots, L_{n-1}L_n$ будуються на основі відомих експериментальних даних, а відрізок L_nL_{n+1} розраховується на основі алгоритму метода базових діаграм, причому з точки $L_n = (\sigma_n, t_n)$ здійснюється прогнозування, а $L_{n+1} = (\sigma_{n+1}, t_{n+1})$ – точка, для якої екстрапольується величина напруження при заданій довговічності t_{n+1} . Для вибраних ділянок L_iL_j діаграми довготривалої міцності за експериментальними даними розраховуються характеристики β_{ij} за допомогою співвідношення (16):

$$\beta_{ij} = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{\sigma_i - \tilde{\sigma}_j}, \quad (16)$$

де $i = 1, 2, \dots, n-1$; $j = 2, 3, \dots, n$; $i \neq j$.

В якості параметру β для деякого діапазону напружень і температур вибирають усереднене значення вигляду (17):

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \beta_{ij}. \quad (17)$$

Похибка екстраполяції у відсотках для будь-якого відрізка L_iL_j визначається за допомогою наступного співвідношення (18):

$$\Delta_{ij} = \frac{\tilde{\sigma}_j - \sigma_j}{\sigma_j} \times 100\%. \quad (18)$$

Одним з припущень даного методу є той факт, що максимальна похибка по напруженню Δ не повинна перевищувати 10 – 12 %. Для цього необхідне коректне визначення відповідних діапазонів напружень та температур, в межах яких виконується ця умова при усередненому значенні параметру β . У розділі розглянуто запропоновану Р. П. Приходько лінійну залежність між характеристиками $\beta_{i,n}$, Δ_{in} , $i = \overline{1, n-1}$, які задано співвідношеннями (19), (20):

$$\beta_{i,n} = \frac{\lg(\sigma_i) - \lg(\tilde{\sigma}_n)}{\lg(t_n) - \lg(t_i)}, \quad (19)$$

$$\Delta_{in} = \lg(\sigma_n) - \lg(\tilde{\sigma}_n). \quad (20)$$

Перепишемо цю залежність у вигляді (21):

$$\lg(\sigma_n) = k \cdot \beta_{i,n} + d + \lg(\tilde{\sigma}_n), \quad (21)$$

де k, d – невідомі коефіцієнти.

Далі вважаємо, що k – нормально розподілена випадкова величина, d – детермінована величина, а через $N(\mu_k, s_k^2)$ позначимо розподіл випадкової величини k , де μ_k – математичне сподівання, s_k^2 – дисперсія. В загальному випадку параметри розподілу випадкової величини k та детермінована величина d залежать від температури. Розглянемо довільну точку (σ_n, t_n) на діаграмі довготривалої міцності, з якої здійснюється екстраполяція на час t_{n+1} , σ_{n+1} – невідоме напруження.

Функція розподілу випадкової величини σ_{n+1} приймає вигляд (22):

$$F_{\sigma_{n+1}}(x) = P\{\sigma_{n+1} < x\} = P\{\lg(\sigma_{n+1}) < \lg x\} = F_k\left(\frac{\lg x - d - \lg(\tilde{\sigma}_{n+1})}{\beta_{n,n+1}}\right), \quad (22)$$

де $F_k(x)$ – функція розподілу випадкової величини k .

Для щільності розподілу випадкової величини σ_{n+1} має місце наступне співвідношення (23):

$$f_{\sigma_{n+1}}(x) = \frac{1}{\beta_{n,n+1} \cdot x \cdot \ln 10} \cdot f_k\left(\frac{\lg x - d - \lg(\tilde{\sigma}_{n+1})}{\beta_{n,n+1}}\right), \quad (23)$$

де $f_k(x)$ – щільність розподілу випадкової величини k .

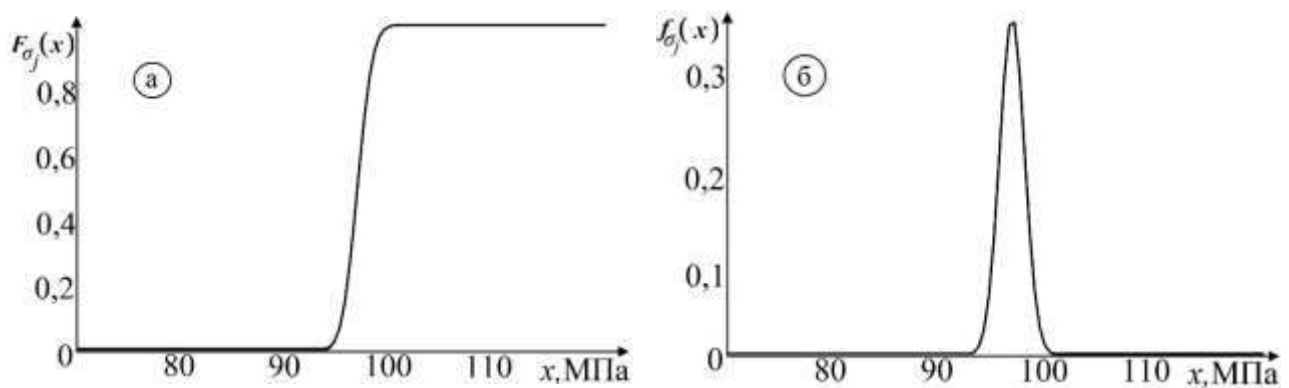
У таблиці 4 представлені експериментальні та розрахункові значення основних імовірнісних характеристик розподілу напруження σ_j , які виражені у МПа при фіксованій довговічності. Як бачимо з таблиці 4, значення математичного сподівання μ напруження σ_j добре узгоджуються з експериментальними даними, причому для кожного експериментального значення температури були вибрані такі

дві експериментальні пари (σ_i, t_i) , (σ_j, t_j) , для яких порядок екстраполяції досягає свого найбільшого значення.

Таблиця 4 – Основні імовірнісні характеристики розподілу напруження σ_j

Температура T , °C	Експериментальне напруження σ_i , МПа	Експериментальний час до руйнування t_i , год	Параметри розподілу μ, s напруження σ_j	Експериментальний час до руйнування t_j , год	Порядок екстраполяції $\lg(t_j/t_i)$	Експериментальне напруження σ_j , МПа
600	216	219	96,97; 1,19	74753,6	2,53	108
650	177	59,7	62,54; 0,85	63534,9	3,03	69
700	98	622,5	49,50; 0,78	46947,1	1,88	41
750	78	241,9	43,16; 0,72	11507,5	1,68	47

На рис. 4 представлено графіки функції і щільності розподілу напруження σ_j при довговічності $t_p = 74753,6$ годин та температурі $T = 600$ °C.



x – незалежна змінна, яка описує множину значень випадкової величини σ_j

Рисунок 4 – Функція (а) і щільність (б) розподілу напруження σ_j при довговічності $t_p = 74753,6$ годин та температурі $T = 600$ °C для сталі 08X18H10

Результати прогнозування довготривалої міцності сталі 08X18H10 за допомогою стохастичного методу базових діаграм (СМБД) та інших відомих детермінованих методів представлені у таблиці 5.

Таблиця 5 – Прогнозовані значення напруження при фіксованій довговічності для сталі 08X18H10 при використанні різних методів

Температура, °С	Порядок прогнозування	Прогнозовані значення напруження при використанні різних методів при фіксованій довговічності для сталі 08X18H10, МПа					
		Експер.	СМБД	МБД	Менсона – Саккопа	Ларсона – Міллера	Орра – Шербі – Дорна
600	2,533	108	96,97	95	95,6	99,66	99,99
650	3,027	69	62,54	59,4	59,33	59,75	60,48
700	1,877	41	49,5	44,93	48,44	48,39	47,53
750	1,677	47	43,16	37,76	37,99	38,82	39,7

Як бачимо з таблиці, в деяких випадках стохастичний метод базових діаграм має переваги по точності прогнозування перед відомими параметричними методами, а також детермінованим методом базових діаграм. З ймовірнісної точки зору стохастичний метод базових діаграм є більш коректним у порівнянні з описаними вище детермінованими методами, оскільки дозволяє прогнозувати при вибраній довговічності не «усереднене» напруження, а його ймовірнісний розподіл.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено методи прогнозування довговічності конструкційних матеріалів в умовах повзучості. Особливу актуальність ця задача представляє для матеріалів, з яких виготовлені відповідальні конструкції для аерокосмічної, енергетичної та інших галузей промисловості.

1. На підставі системи кінетичних рівнянь Ю. М. Работнова запропоновано підхід до прогнозування довговічності конструкційних матеріалів при повзучості в умовах одновісного стаціонарного навантаження. Даний підхід оригінальний імовірнісним трактуванням кінетичних рівнянь, що описують повзучість та критеріїв руйнування.

2. На підставі даного підходу розроблено стохастичну модель руйнування конструкційних матеріалів, яка дозволяє за заданими значеннями напруження, температури та результатами експериментальних досліджень на повзучість матеріалу визначати імовірнісний розподіл його часу до руйнування.

3. Розроблено методикау ідентифікації сталих повзучості матеріалу, яку засновано на статистичній обробці сімейства експериментальних кривих повзучості та використанні методів теорії ймовірностей, математичної статистики та методів оптимізації.

4. За заданими експериментальними даними на повзучість зразків з корозійностійкої сталі 12X18H10T та зразків з алюмінієвого сплаву РА6 проведено розрахунки основних ймовірнісних характеристик розподілу часу до руйнування та перевірено адекватність розроблених стохастичних моделей процесам руйнування при повзучості.

5. Розроблено стохастичний метод базових діаграм, який застосовується для екстраполяції довготривалої міцності конструкційних матеріалів на терміни служби, які на декілька порядків перевищують тривалість експериментів.

6. За заданими експериментальними даними на довготривалу міцність зразків зі сталі 08X18H10 проведено розрахунки основних ймовірнісних характеристик розподілу напруження при фіксованій довговічності та перевірено адекватність розробленого методу.

7. Стохастична модель руйнування та стохастичний метод базових діаграм разом об'єднуються в узагальнену стохастичну модель руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, яка в залежності від наявності відомих експериментальних характеристик та необхідного порядку екстраполяції використовує той чи інший ймовірнісний підхід.

8. Запропонована модель може бути використана для прогнозування часу до руйнування різних конструкційних матеріалів, які широко використовуються у машинобудуванні, аерокосмічній галузі, а також при розробці стандартів, методичних рекомендацій та інших документів в області оцінки довговічності конструкційних матеріалів в умовах повзучості.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Вариант вероятностной оценки времени до разрушения при ползучести. *Техническая механика*. 2013. № 2. С. 99 – 108.

2. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Прогнозирование долговечности стали 12X18H10T при изотермической ползучести в условиях одноосного растяжения. *Техническая механика*. 2014. № 1. С. 84 – 94.

3. Пошивалов В. П., Дояр И. А. Оценка времени до разрушения конструкционных материалов при ползучести. *Вісник Дніпропетровського університету*. Сер. механіка. 2014. Вип. 18, т. 2. С. 172 – 181.

4. Пошивалов В. П., Дояр И. А. Стохастическая модель разрушения конструкционных материалов при неизотермической ползучести. *Вестник Запорожского национального университета*. Математическое моделирование и прикладная механика : сборник научных трудов. 2015. № 1. С. 154 – 162.

5. Doyar I., Poshyvalov V. Development of a stochastic model of failure of structural materials in creep at hardening stage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, no. 5 (81). P. 25–31.

6. Дояр И. А. Стохастический метод экстраполяции диаграмм длительной прочности конструкционных материалов. *Техническая механика*. 2017. № 2. С. 99 – 108.

7. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Вероятностная оценка времени до разрушения конструкционных материалов при ползучести. XV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос»: збірник тез (10 – 12 квітня 2013, м. Дніпропетровськ). Дніпропетровськ, 2013. С. 246.

8. Дояр И. А. Вероятностное оценивание долговечности конструкционных материалов в условиях изотермической ползучести [Электрон. ресурс]. Информационные технологии в управлении сложными системами – 2013. Сборник докладов научной конференции (19 – 20 июня 2013, г. Днепропетровск). Секция 1. Моделирование процессов и средств управления. Доклад 1.08. Днепропетровск, 2013. С. 1–3. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

9. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Прогнозирование долговечности конструкционных материалов при испытаниях на длительную прочность. XVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос»: збірник тез (9 – 11 квітня 2014, м. Дніпропетровськ). Дніпропетровськ, 2014. С. 228.

10. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Прогнозирование долговечности конструкционных материалов при неизотермической ползучести. Всеукраїнська науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання»: збірник тез (27 – 29 травня 2015, м. Дніпродзержинськ). Дніпродзержинськ, 2015. С. 31 – 32.

11. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Прогнозирование долговечности конструкционных материалов при изотермической ползучести с учетом стадии упрочнения. XVIII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос»: збірник тез (6 – 8 квітня 2016, м. Дніпропетровськ). Дніпропетровськ, 2016. С. 172.

АНОТАЦІЯ

Дояр І. О. Узагальнена стохастична модель руйнування конструкційних матеріалів при повзучості з урахуванням пошкоджуваності та зміцнення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 «Механіка деформівного твердого тіла». – Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, 2018.

На підставі системи кінетичних рівнянь Ю. М. Работнова запропоновано підхід до прогнозування довговічності конструкційних матеріалів при повзучості в умовах одновісного стаціонарного навантаження. Новизна даного підходу полягає в тому, що він допускає імовірнісне трактування кінетичних рівнянь, що описують повзучість та критеріїв руйнування. Запропоновані кінетичні рівняння враховують температурну залежність та стадію зміцнення матеріалу в процесі повзучості.

На підставі даного підходу розроблено стохастичну модель руйнування конструкційних матеріалів при повзучості, яка дозволяє за заданими значеннями напруження, температури та результатами експериментальних досліджень на повзучість матеріалу визначати імовірнісний розподіл його часу до руйнування.

Розроблено стохастичний метод базових діаграм, який застосовується для екстраполяції довготривалої міцності конструкційних матеріалів на терміни служби, які на декілька порядків перевищують тривалість експериментів.

Ключові слова: руйнування, повзучість, довготривала міцність, пошкоджуваність матеріалу, час до руйнування, метод базових діаграм, імовірнісний розподіл.

АННОТАЦІЯ

Дояр И. А. Обобщенная стохастическая модель разрушения конструкционных материалов при ползучести с учетом повреждаемости и упрочнения. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела». – Запорожский национальный технический университет, Запорожье, 2018.

На основании системы кинетических уравнений Ю. Н. Работнова предложен подход к прогнозированию долговечности конструкционных материалов при ползучести в условиях одноосного стационарного нагружения. Новизна подхода заключается в том, что он допускает вероятностную трактовку кинетических уравнений, описывающих ползучесть и критериев разрушения.

На основании данного подхода разработана стохастическая модель разрушения конструкционных материалов при ползучести, которая позволяет по заданным значениям напряжения, температуры и результатам экспериментальных исследований на ползучесть материала определять вероятностное распределение его времени до разрушения. По экспериментальным данным на ползучесть образцов из коррозионностойкой стали 12X18H10T и образцов из алюминиевого сплава РА6 проведена проверка на адекватность разработанной стохастической модели.

Разработан стохастический метод базовых диаграмм, который применяется для экстраполяции длительной прочности конструкционных материалов на сроки службы, превышающие длительность экспериментов на несколько порядков. По экспериментальным данным на длительную прочность образцов из стали 08X18H10 проведена проверка на адекватность разработанного стохастического метода.

Научная новизна полученных результатов:

- разработана стохастическая модель разрушения конструкционных материалов при ползучести, которая учитывает как упрочнение, так и повреждаемость материала, что расширяет область применения данной модели по сравнению с широко известными линейными моделями накопления повреждений;

- впервые рассмотрен смешанный критерий разрушения, учитывающий как влияние параметра поврежденности, так и влияние деформации ползучести на время до разрушения материала;

- предложена методика определения постоянных ползучести материала, основанная на семействе экспериментальных кривых ползучести и использовании методов теории вероятностей, математической статистики и методов оптимизации;

– впервые разработан стохастический метод базовых диаграмм, который предназначен для экстраполяции длительной прочности конструкционных материалов на сроки службы, превышающие длительность экспериментов до трех порядков.

Результаты диссертационной работы внедрены в расчетную практику ГП «КБ « Южное им. М. Я. Янгеля » (г. Днепр), где используются для оценки возможности продления срока эксплуатации отдельных узлов и систем изделий, у которых закончился гарантийный срок эксплуатации, и в учебный процесс на механико-математическом факультете ДНУ им. О. Гончара.

Ключевые слова: разрушение, ползучесть, длительная прочность, поврежденность материала, время до разрушения, метод базовых диаграмм, вероятностное распределение.

ABSTRACT

Doyar I. O. Generalized stochastic model of structural materials failure in creep taking into account damageability and strengthening. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 01.02.04 – Mechanics of a Deformable Solid. – Zaporizhya National Technical University, Zaporizhya, 2018.

Based on the system of Y. M. Rabotnov's kinetic equations, an approach to the prediction of the durability of structural materials in creep under uniaxial steady loading is proposed. The novelty of the approach is that it allows a probabilistic interpretation of failure criteria and kinetic equations that describe creep. The proposed kinetic equations account for the temperature dependence and the material strengthening stage of creep.

Based on this approach, a stochastic model of failure of structural materials in creep is developed. The model allows one to determine the probability distribution of the time to failure from given stress and temperature values and the results of creep tests.

A stochastic method of basic diagrams is developed for extrapolating the long-term strength of structural materials to a service life several orders of magnitude longer than the duration of experiments.

Keywords: failure, creep, long-term strength, material damage, time to failure, method of basic diagrams, probability distribution.