

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Бреславський Дмитро Васильович

УДК 539.3

**РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПОВЗУЧОСТІ  
ТА ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ЦИКЛІЧНО НАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.02.09 - Динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків - 1999

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському державному політехнічному університеті  
Міністерства освіти України

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор  
Морачковський Олег Костянтинович,  
Харківський державний політехнічний  
університет,  
завідувач кафедри теоретичної механіки.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор  
Пошивалов Володимир Павлович,  
Інститут технічної механіки НАН України,  
м. Дніпропетровськ, провідний науковий  
співробітник відділу надійності та довговічності конструкцій;  
доктор технічних наук, професор  
Сімсон Едуард Альфредович,  
Харківський державний політехнічний університет,  
професор кафедри опору матеріалів;  
доктор технічних наук, професор  
Шульженко Микола Григорович,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М.Підгорного НАН України,  
м. Харків, заступник директора.

Провідна установа - Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
Міністерство освіти України, м. Київ, кафедра  
динаміки, міцності машин та опору матеріалів.

Захист відбудеться «15» березня 2000 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.10 у Харківському державному політехнічному університеті за  
адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного  
політехнічного університету.

Автореферат розісланий «25» січня 2000 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Бортовий В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Умови експлуатації сучасної техніки часто відповідають екстремальним. Більша кількість машинобудівних конструкцій працює за цими умовами при високих температурах, сумісній дії статичного та циклічного навантаження. Найбільш відповідальні елементи конструкцій турбін, реакторів, літаків та ракет, хімічних апаратів тощо працюють при суттєвих деформаціях високотемпературної повзучості, які супроводжуються процесами накопичення пошкоджень. Функціонування таких конструкцій пов'язано з циклічною зміною напружень, що відбуваються як з великим періодом циклу - від секунд до днів чи місяців, так й з малим, меншим однієї секунди. Ресурс таких конструкцій обмежується умовами малоциклового та багатоциклового руйнування.

Забезпечення високої надійності та довготривалої міцності елементів конструкцій при загальному скороченні часу на проведення дослідницько - конструкторських робіт та експериментального доведення нових зразків вимагає створення сучасних методів адекватного комп'ютерного моделювання процесів деформування та руйнування конструкцій для визначення найкращого варіанту спроектованих виробів. Для випадку циклічно навантажених конструкцій створення таких методів є наукоємною складною та разом з цим актуальною на сьогоднішній день проблемою. Її розв'язання потребує формулювання нових рівнянь стану циклічної повзучості, розробки алгоритмів розв'язку початково - крайових задач нелінійного деформування та руйнування елементів конструкцій.

Поведінка конструкцій з малоцикловим ресурсом досить пильно привертала увагу дослідників, що призвело до створення сучасних теорій опису цього явища. На відміну від цього проблема повзучості конструкцій за умов багатоциклового ресурсу при швидкій зміні напружень та складному напруженому стані до теперішнього часу не мала свого завершеного теоретичного розв'язання. Разом з цим, практика проектування сучасної техніки свідчить про існуючі потреби у створенні теорії та методів розрахунку повзучості елементів машинобудівних конструкцій, що експлуатуються за умов сумісної дії статичних та циклічних напружень при високих температурах. Розв'язок цієї проблеми, наданий за темою роботи, дозволить впровадити у практику проектування сучасні засоби розрахунку елементів конструкцій, повзучість яких відбувається при циклічному навантаженні, що швидко змінюється (вимушених коливаннях).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати досліджень, наведені у роботі, отримані за державними темами: «Розробка теоретичних основ дослідження матеріалів та конструкцій в умовах високотемпературного

навантаження» (1991-1993 р.р.), № держ. реєстрації 0193 U 027870; «Розв'язок проблеми деформування та руйнування тіл внаслідок статичної та динамічної повзучості з метою розрахунків довготривалої міцності та технологій теплового складання» (1994-1996 р.р.), № держ. реєстрації 0195 U 009046; «Побудова теоретичних основ розрахунків нелінійної повзучості та руйнування деформівних тіл за умов дії зовнішніх швидко осцилюючих полів навантаження» № держ. реєстрації 0197 U 001933 (1997-1999 р.р.) Міжвузівської програми Міносвіти, координаційний план «Створення теорії, методів математичного моделювання та чисельного аналізу процесів деформування твердих тіл та складних механічних систем», що виконувались у ХДПУ та у яких автор був відповідальним виконавцем. Крім того, розроблені алгоритми розв'язку задач вимушених коливань застосовані при виконанні теми «Розробка основ динамічного розрахунку тонких положистих оболонок та оболонок, що з'єднані з пружно-в'язкими тілами або заповнені рідиною», № держ. реєстрації 0198 U 000187, яка виконувалась у Харківській державній академії міського господарства (ХДАМГ) у 1997 - 1999р.р.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи - розробити та теоретично й експериментально обґрунтувати метод розв'язку проблеми повзучості з урахуванням руйнування найбільш поширених елементів машинобудівних конструкцій, що експлуатуються за умов швидкого циклічного навантаження.

Досягнення сформульованої мети вимагає розв'язку наступних задач досліджень:

- сформулювати, термодинамічно обґрунтувати та перевірити за допомогою даних експериментальних досліджень рівняння стану багатоциклової повзучості з урахуванням пошкодженості внаслідок повзучості та багатоциклової втоми при складному напруженому стані;
- надати математичні постановки початково - крайових (ПК) задач повзучості плоских тіл та тонких оболонок при швидкому циклічному навантаженні;
- розробити методи та алгоритми розв'язку сформульованих ПК задач, на основі яких створити прикладне програмне забезпечення;
- провести верифікацію створеного методу розрахунку шляхом порівняння чисельних та експериментальних результатів;
- експериментально дослідити багатоциклову повзучість та руйнування при простому та складному напружених станах;
- визначити закономірності багатоциклової повзучості та пошкодженості при складному напруженому стані;

- впровадити теоретичні, експериментальні та чисельні результати роботи для розв'язку прикладних проблем проектування сучасної техніки.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукову новизну отриманих результатів складають:

- 1) запропоновані та теоретично й експериментально обгрунтовані рівняння стану багатоциклової повзучості з урахуванням пошкодженості внаслідок повзучості та багатоциклової втоми;
- 2) метод розв'язку початково - крайових задач повзучості плоских тіл та тонкостінних оболонок при їхньому швидкому циклічному навантаженні;
- 3) експериментальні результати з циклічної повзучості та руйнування алюмінієвих сплавів при простому напруженому стані та пластин з надрізами та вирізами при розтягу та згині;
- 4) чисельно та експериментально встановлені закономірності багатоциклової повзучості та накопичення пошкоджень при складному напруженому стані;
- 5) розв'язки задач повзучості циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій: лопаток ГТД, труб установок рідинного каталітичного крекінгу, оболонок твелів, панелей літальних апаратів та інших.

Запропонований та теоретично й експериментально обгрунтований новий варіант рівнянь стану багатоциклової повзучості, що супроводжується накопиченням прихованих пошкоджень внаслідок дії механізмів повзучості і втоми, та метод розв'язку початково - крайових задач, оснований на асимптотичних розкладах невідомих і усередненні отриманих рівнянь на періоді складають основу нового напрямку у динаміці та міцності машин та надають можливість ефективного моделювання поведінки циклічно навантажених конструктивних елементів машин.

Чисельно та експериментально встановлені закономірності багатоциклової повзучості та руйнування при складному напруженому стані надають змогу фізико-механічного розуміння механізмів та характерних якісних та кількісних відмінностей дослідженого явища, що складає внесок у загальну теорію циклічної повзучості.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розв'язано практичні задачі повзучості та довготривалої міцності найбільш поширених елементів машинобудівних конструкцій: лопаток ГТД, труб установок рідинного каталітичного крекінгу, оболонок твелів, панелей літальних апаратів тощо. Окремі результати цих досліджень використовуються у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут», НВО «ТУРБОАТОМ» та Інноваційному технологічному центрі "Лайн" (м. Харків).

**Особистий внесок здобувача.** Рівняння стану та методи розв'язку початково-крайових задач циклічної повзучості створено автором особисто. Науковий консультант професор Морачковський брав участь у обговоренні результатів досліджень.

Алгоритми, програмне забезпечення для розв'язку ПК задач та експериментальне обладнання розроблено автором особисто. Частково практичні розробки з програмного забезпечення, окремі чисельні та експериментальні дослідження за темою роботи виконано за участю аспірантів ХДПУ (Г.О.Аніщенко, С.О.Шипулін) та ХДАМГ (В.М.Бурлаєнко, О.О.Чупринін) та к.т.н., доц. В.М Конкіна під керівництвом автору, що надано у спільних з ними публікаціях.

У обговоренні отриманих автором результатів з циклічної повзучості тонких осесиметричних оболонкових елементів брали участь проф. Х.Альтенбах та доктор К.В.Науменко.

У формулюванні технічних завдань та обговоренні отриманих особисто автором роботи результатів з довготривалої міцності конструктивних елементів обладнання, що проектується у ННЦ «ХФТ», приймав участь ст.н.с., к.т.н. О.В.Бірюков.

Для виготовлення за лазерними технологіями отворів в пластинах, що залучені до експериментів, та при аналізі окремих експериментально встановлених закономірностей циклічної повзучості та руйнування пластин з вирізами залучались ст.н.с., к.т.н. М.І.Дзюбенко (ІРЕ НАН України) та інж. С.М.Колпаков.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи обговорювались на наукових конференціях, симпозіумах та колоквиумах: науково-технічній конференції «Научные и прикладные проблемы прогнозирования долговременной прочности конструкционных материалов», Севастополь, 1991р.; науковій нараді «Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций», Канів, 1992р.; науковій конференції «Исследование вибраций машин, механизмов и конструкций», Севастополь, 1993р.; міжнародних науково-технічних конференціях «Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье», Харків, 1993, 1995-1999р.р.; Першому міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові, 1993р.; 15му, 16му та 17му Симпозіумах з експериментальної механіки твердого тіла у Варшаві (1992, 1994 та 1996р.р.); 314 Колоквиумі Європейського Механічного товариства «Ефективність формулювань теорії оболонок для чисельних розв'язків», Мюнхен, 1993р.; Симпозіумі ІУТАМ з анізотропії, неоднорідності та нелінійності твердого деформованого тіла у Нотінгемі, 1994 р.; 5му та 6му міжнародних симпозіумах «Повзучість та пов'язані процеси», Білосток, 1995, 1998 р.р.; 75й Ювілейній

конференції Німецького товариства математиків та механіків у Регенсбурзі, 1997р.; 385 Колоквіумі Європейського Механічного товариства «Непружній аналіз конструкцій при змінному навантаженні: теорія та інженерне застосування» у Аахені, 1998р.; семінарах кафедр динаміки та міцності машин і теоретичної механіки Харківського державного політехнічного університету у 1996-1999р.р., кафедри технічної механіки Мартін-Лютер Університету Халле-Вітенберг у 1998р., кафедри динаміки, міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» у 1999 р. .

**Публікації.** За результатами досліджень, наведених у дисертаційній роботі, опубліковано 33 наукових праці, у тому числі 23 статті у періодичних виданнях та 10 - у збірках матеріалів доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг роботи складає 354с., в тому числі: 253 с. основного тексту; 137 ілюстрацій, 18 таблиць на 72 с., список використаних джерел з 225 найменувань на 23 с., додаток на 6 с.

Автор висловлює щирю вдячність своєму науковому консультантові, завідувачу кафедри теоретичної механіки Харківського державного політехнічного університету доктору технічних наук, професору Морачковському Олегу Костянтиновичу за постійну увагу до роботи та корисні поради при її написанні.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи, розкрито актуальність наукової проблеми, сформульовано мету й основні задачі досліджень, викладено наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів.

**У першому розділі** надано огляд публікацій, присвячених проблемі повзучості та руйнування матеріалів та конструкцій при швидкому циклічному руйнуванні. Проаналізовано стан проблеми.

Високочастотна циклічна повзучість матеріалів (частоти навантаження вищі за 1..2 Гц) вивчалась експериментально Лазаном, Відалем, Кеннеді, Тайрою і Отані, Работновим, Писаренко, Руденко, Треть'яченко, Трощенко, Шестериковим та Локощенко, Яковлюком, Голубом, Моріссі, Мак-Дауелом та Николасом, Скленичкою, Поклудою, Станеком та іншими авторами. За результатами експериментальних досліджень

встановлено, що опір повзучості при швидкому циклічному навантаженні не залежить від частоти зміни напруження. В той же час встановлено його залежність від параметру асиметрії циклу напружень  $A$ : для більшості досліджених матеріалів експериментально доведено існування фундаментальної константи  $A_{кр}$ , яка зветься критичним параметром асиметрії циклу напружень.

При  $A < A_{кр}$  мають місце усі описані вище закономірності інтенсифікації повзучості при накладенні циклічної компоненти (збільшення швидкості повзучості та зменшення часу до руйнування). Руйнування при цьому відбувається внаслідок дії механізмів повзучості. Такі процеси одержали назву динамічної повзучості.

При навантаженні зразку з  $A > A_{кр}$  подібного прискорення повзучості не спостерігається, а руйнування відбувається вже не тільки внаслідок механізмів повзучості, але й завдяки високотемпературній багатоцикловій втомі.

Теорія втоми матеріалів при багатоцикловому навантаженні інтенсивно розвивається в останні роки. Вагомий внесок у її розвиток внесли такі вчені, як Болотін, Матвеев, Писаренко, Серенсен, Трощенко та багато інших. В останні роки її основні досягнення пов'язані з широким застосуванням континуальної механіки пошкодженості (КМП) для аналізу прихованого руйнування матеріалу. Основний внесок у її розвиток зроблено роботами Болотіна, Крайчиновича, Леметра та Шабоша, Мураками, Хульта та інших.

На відміну від процесів повзучості, що відбуваються при малій частоті навантаження з граничним числом циклів до руйнування  $N_* \leq 5 \cdot 10^4$ , яке відповідає малоцикловій втомі, до теперішнього часу розрахунки та аналіз впливу сумісної дії статичного та циклічного навантаження з великою частотою ( $f > 1..2$  Гц) для елементів конструкцій виконувались за спрощеними методиками.

За оглядом літератури визначено, що при наявності методів розрахунку повзучості та руйнування тіл при статичному навантаженні, таких за рівнем методів для випадку складного напруженого стану при циклічному навантаженні з частотою, вищою за 1..2 Гц, немає. В літературі відсутні рівняння стану багатоциклової повзучості з урахуванням пошкодженості для складного напруженого стану з параметром асиметрії циклу напружень у точці тіла, що довільно змінюється у часі, які б були придатні для застосування при розрахунках конструкцій.

У зв'язку з цим у розділі сформульовано основну мету та задачі, що розв'язані у дисертаційній роботі - створити метод розрахунку, який би базувався на фізично достовірних та експериментально перевірених створених рівняннях стану, та за його допомогою провести дослідження циклічної повзучості та довготривалої міцності елементів



машинобудівних конструкцій.

У другому розділі запропоновані та експериментально обґрунтовані для великого класу конструкційних матеріалів нові рівняння стану повзучості з урахуванням руйнування внаслідок повзучості та втоми за умов циклічного навантаження з малим періодом.

Для точки тіла при складному напруженому стані в умовах повзучості встановлюються так звані рівняння стану, які відбивають реакцію точки на дію навантажень та температури. Для виводу та термодинамічного обґрунтування цих рівнянь у роботі застосовано концепції так званої раціональної механіки твердого деформованого тіла, започаткованих Труделом, Жерменом, Леметром, Шабошем та іншими вченими. Згідно з цим, для опису еволюції матеріалу внаслідок циклічного навантаження при повзучості до зовнішніх змінних віднесені тензор повних деформацій  $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^c$  та температура  $T$ ; до внутрішніх - девіатор тензору деформацій повзучості  $\epsilon^c$  та структурні параметри; до асоційованих - тензор напружень  $\sigma$ , ентропія та термодинамічні сили.

Розглянуто циклічні процеси, що належать до так званих багатоциклових, коли час до руйнування  $t_* = N_*/f$ , де  $f$  - частота циклічної складової навантаження, а кількість циклів у зміні напружень у точці тіла до моменту закінчення прихованого руйнування перевищує  $N_* = (0.5..1) \cdot 10^5$ . За визначених умов відношення періоду циклічної складової напружень  $T = 1/f$  до часу руйнування є малим параметром, значно меншим за одиницю:

$$\mu = \frac{T}{t_*} = \frac{1}{ft_*} = \frac{1}{N_*} \ll 1. \quad (1)$$

Цим умовам відповідають процеси багатоциклової втоми та так звані процеси динамічної повзучості за класифікацією Работнова та Тайри.

Загальні рівняння стану при повзучості використано за варіантами теорії зміцнення

$$\dot{\epsilon} = \Lambda \bar{\sigma} \cdot F(\sigma, \omega) \quad (2)$$

та течіння

$$\dot{\omega} = F(\sigma, \omega) \quad (3)$$

з кінетичним рівнянням для параметру пошкодженості  $\omega$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= F(\sigma, \omega) \\ \omega(0) &= 0, \quad \omega(t_*) = \omega_* \end{aligned} \quad (4)$$

Для опису процесів циклічної повзучості з урахуванням пошкодженості у роботі рівняння стану (2) - (4) перетворено за допомогою методики асимптотичних розкладень (АР) зовнішніх, внутрішніх та асоційованих змінних за малим параметром  $\mu$  з коефіцієнтами, які залежать від змінних часу - як від  $t$  («повільні» або макроскопічні,

індекс 0), так й від  $\tau = t/\mu$  чи  $\xi = \tau/T$  («швидкі» або мікроскопічні, індекс 1).

Розглянуто просте циклічне навантаження, коли всі компоненти девіатору напружень змінюються за одними й тими ж прямолінійними траєкторіями у п'ятивимірному просторі напружень.

За асимптотичним розкладенням тензор напружень має вигляд:

$$\sigma \cong \sigma^0(x_k, t) + \mu \sigma^1(x_k, t, \tau) + \dots \quad (5)$$

У роботі збережено два перших члени асимптотичних розкладень. Тут  $\sigma^0$  - повільна за часом (або постійна) складова,  $\sigma^1$  - складова, яка швидко змінюється за часом з нульовою на періоді  $0 \leq \tau \leq T$  середньою:  $\langle \sigma^1(x_k, t, \tau) \rangle = 0$ , що дозволяє розклад останньої на періоді  $T$  у вигляді

$$\sigma^1(x_k, t, \tau) = \sum_{r=1}^R \sigma^r \cos 2\pi r \tau + \sum_{q=1}^Q \sigma^q \sin 2\pi q \tau, \quad (6)$$

де  $\sigma^r, \sigma^q$  - амплітудні значення гармонік,  $R, Q$  - їхня кількість.

За використанням техніки асимптотичних розкладень для рівнянь (2)-(4) з усередненням одержаних рівностей на періоді змінювання циклічної складової, у роботі одержані рівняння, які описують процеси циклічної повзучості з урахуванням пошкодженості внаслідок дії механізмів пошкодження повзучості та втоми.

У випадку одногармонійного періодичного навантаження та найбільш поширених на практиці степеневих форм функцій  $F$  та  $\dot{F}$  у роботі одержано наближені аналітичні вирази для швидкості деформацій динамічної повзучості ( $A < A_{кр}$ ). Наприклад, для узагальнення рівнянь типу Бейлі-Нортону з урахуванням пошкодженості:

$$\dot{\sigma}^0 = \langle F \rangle = \frac{B \sigma_{vM}^0}{(1 - \omega^0)^l} \int_0^1 \left( 1 + A \sin 2\pi \xi \right)^n d\xi = \frac{B \sigma_{vM}^0}{(1 - \omega^0)^l} (1 + H(A)); \quad (7)$$

$$\dot{\omega}^0 = \langle \dot{F} \rangle = \frac{D \sigma_{eq}^0}{(1 - \omega^0)^l} \int_0^1 \left( 1 + \hat{A} \sin 2\pi \xi \right)^m d\xi = \frac{D \sigma_{eq}^0}{(1 - \omega^0)^l} (1 + K(\hat{A})), \quad (8)$$

де  $\sigma_{vM}, \sigma_{eq}$  - інтенсивність напружень та еквівалентне напруження лінеаризованого критерію Лебедева - Писаренка;  $A = \sigma_{vM}^1 / \sigma_{vM}^0$ ;  $\hat{A} = \sigma_{eq}^1 / \sigma_{eq}^0$  - параметри асиметрії циклу

напружень;  $H(A) = G(A; n)$ ,  $K(\hat{A}) = G(\hat{A}; m)$ , де  $G(A; r) = \frac{r-1}{4} A^2 \left( 1 + \frac{r-2}{16} A^2 \right)$ ;

$B, D, n, m, l$  - матеріальні сталі. Для визначення усереднених значень функцій типу (7)-(8) у інших випадках використовується чисельне інтегрування.

Узагальнене кінетичне рівняння для пошкодженості побудовано за співвідношенням  $d\omega^0 = \alpha_f(\hat{A})d\omega_c + \beta_f(\hat{A})d\omega_f$ , використовуються функції  $\alpha_f(\hat{A})$  та  $\beta_f(\hat{A})$ , які дозволяють відбити внесок кожного з механізмів пошкодженості повзучості  $\omega_c$  та втоми  $\omega_f$ . Ці функції впливу можуть також розглядатись як ймовірності переходу до руйнування внаслідок механізмів повзучості чи втоми.

В роботі на підставі експериментальних даних обгрунтовано використання відповідних інваріантів тензорів напружень для опису накопичення пошкодженості при складному напруженому стані. Для пошкодженості внаслідок повзучості рекомендовано застосування еквівалентного напруження, що відповідає лінеаризованому критерію Лебедева - Писаренка; пошкодженості внаслідок високотемпературної багаточислової втоми - еквівалентне напруження  $\chi_f$ , що відповідає критерію Сайнсу. Обгрунтовано також вигляд функцій  $\alpha_f(\hat{A})$  та  $\beta_f(\hat{A})$  за феноменологічними даними експериментів.

За конкретизацією побудованих рівнянь стану найбільш часто використовується у розрахунках наступний варіант:

$$\dot{s}_{ij}^0 = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{VM}^0 \tau^{n-1} \left( 1 + \nu \frac{H}{E} \right)}{\tau - \omega^0} s_{ij}^0; \quad (9)$$

$$\dot{\omega}^0 = \alpha_f(\hat{A})D \frac{\sigma_{eq}^0 \tau^m}{\tau - \omega^0} + \beta_f(\hat{A})F_f \frac{\chi_f \sigma^0 \sigma^a \tau^{-p}}{\tau - \omega^0} \quad \omega^0(0) = 0, \omega^0(t_*) = 1, \quad (10)$$

де  $s_{ij}^0$  - девіатор складової напружень, що змінюються у «повільному» часі.

У співвідношеннях (9) - (10) матеріальні сталі  $B, D, n, m, l, F_f, p, q$  та функції  $\alpha_f, \beta_f$  мають бути визначені шляхом експериментального вивчення повзучості до руйнування матеріалів. Запропоновані кінетичні рівняння циклічної повзучості та пошкодження побудовано за умов мінімальної кількості констант, що у них входять. У загальному випадку число цих констант дорівнює 14. Запропоновано базові експерименти для їхнього визначення. Усі вони є стандартними для теорій повзучості та втоми. Додатковим експериментом є випробування на циклічну повзучість з різним рівнем параметру асиметрії циклу напружень.

У розділі проведено термодинамічне обгрунтування одержаних рівнянь, встановлено їхню відповідність основним фундаментальним законам механіки суцільних середовищ.

Для аналізу закономірностей змінювання деформацій у процесі динамічної повзучості при осьовому розтягу розглянуто рівняння Удквіста-Хоффа, обгрунтоване для використання при змінному за часом напруженні. Порівняння даних з повзучості,

отриманих за цією моделлю, з одержаними інтегруванням рівнянь типу (9), показало задовільний ступінь адекватності розрахунків. Отримані величини за відповідними розрахунками деформацій динамічної повзучості відрізняються не більше, ніж на 11%. Витрати машинного часу на інтегрування рівнянь Удквіста-Хоффа виявляються значно більшими, ніж для розрахунків за співвідношеннями (9), що робить перші неефективними у застосуванні при складному напруженому стані.

Запропоновані у роботі рівняння стану циклічної повзучості та накопичення пошкодженості для визначення їхньої достовірності при простому та складному напружених станах були перевірені на відомих експериментальних даних, одержаних до теперішнього часу різними вченими. Порівнювались криві циклічної повзучості, довготривалої міцності, граничні криві для зразків насамперед з жароміцних нікелевих та легких сплавів, що застосовуються як конструктивні матеріали у енергетичному та авіаційному машинобудуванні.

Експериментальна перевірка отриманих рівнянь виявила достатньо високий ступінь їхньої адекватності. Максимальна похибка при описі кривих циклічної повзучості дорівнює 25-30%, пошкодженості внаслідок повзучості 15-25% та пошкодженості внаслідок втомних механізмів - 25-30%. На цій підставі отримані рівняння стану циклічної повзучості рекомендовано до використання при аналізі довготривалої міцності елементів машинобудівних конструкцій.

**У третьому розділі** надано математичну постановку задач циклічної повзучості тіл та спосіб їхнього розв'язку шляхом застосування асимптотичних розкладів методу двох масштабів часу.

Розглянуто довільне тіло об'ємом  $V$ , закріплене на частині поверхні  $S_1$  та навантажене силами на частині поверхні  $S_2=S_3 \cup S_4$  - поверхневими  $p$  та об'ємними  $f$ . У системі координат  $x=(x_1, x_2, x_3)$  рух континуума матеріальних точок в рамках підходу Лагранжу описано вектором переміщень  $u$ , пов'язаних з малими деформаціями  $\varepsilon_{ij}$  співвідношеннями типу Коши. Симетричні тензори  $\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$  - напружень та  $\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ji}$  - деформацій є функціями координат та часу. Припущено, що  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + c_{ij}$ , де  $\varepsilon_{ij}^e$  -зворотні пружні деформації, а  $c_{ij}=c_{ji}$  - незворотні деформації повзучості без урахування їхнього впливу на стисливість. Зв'язок останніх з компонентами тензора напружень та часом визначається за прийнятими рівняннями стану типу (9). Зовнішні сили, що діють на тіло, розділені на дві складові - основну та осцилюючу. До першої віднесемо об'ємні сили  $f(x,t)$ ,  $x \in V$ , та частку поверхневого навантаження  $p^0(x,t)$ ,  $x \in S_3$ , що повільно змінюються у часі чи залишаються незмінними.

Осцилююче поле зовнішніх сил, що діють на  $S_4$  (зокрема, можливо  $S_4 \in S_3$ ) розглянуто як полігармонійне з компонентами

$$\left[ \text{ } \right], \quad (11)$$

де  $p_i^r, p_i^q$  - амплітуди відповідних компонент поверхневих навантажень, які відповідають  $r$ -ій чи  $q$ -ій гармоніці;  $R_i, Q_i$  - їхня кількість. Функції  $\Phi_i(t)$  - періодичні полігармонічні функції.

У сформульованих вище припущеннях загальну математичну постановку початково-крайової задачі повзучості тіл при дії циклічних навантажень зі збереженням звичайних позначень представлено такою системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + f_i &= \rho \ddot{u}_i, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j}), \quad x_i \in V; \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} (e_{kl} - c_{kl}); \quad \sigma_{ij} n_j = p_i^0 + \Phi_i(t), \quad x_i \in S_2; \\ u_i|_{S_1} &= \bar{u}_i, \quad u_i(x,0) = v_i(x,0) = c_{ij}(x,0) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Система (12) істотно нелінійна, що пов'язане з нелінійністю співвідношень (9) та кінематичних співвідношень.

Для невідомих системи (12) застосовано асимптотичні розклади за малим параметром  $\mu$  з коефіцієнтами, що залежать як від змінної  $t$  («повільний» чи макроскопічний рух), так й від змінної  $\tau=t/\mu$  чи  $\xi=\tau/T$  («швидкий» або мікроскопічний рух)

$$z = z^0(x, t) + \sum_{i=1}^{\infty} \mu^i z^i(x, t, \xi). \quad (13)$$

Тут  $z$  - будь-яка з невідомих системи (12), а  $x, t$ , та  $\xi$  вважаються формально незалежними змінними.  $z^i$  - одноперіодичні функції  $\xi$ ,  $0 \leq \xi \leq 1$ , такі, що

$$\langle z^i_{,\xi}(x, t, \xi) \rangle = \int_0^1 z^i_{,\xi} d\xi = 0. \quad (14)$$

Як звичайно, для похідної за часом маємо:

$$\frac{d}{dt} z^i = \frac{\partial}{\partial t} z^i + \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial \xi} z^i. \quad (15)$$

У подальшому збережемо по два доданки у кожному з асимптотичних розкладень (13), так, що для переміщень та напружень:

$$\begin{aligned} u_i &\approx u_i^0(t) + \mu u_i^1(\xi); \\ \sigma_{ij} &\approx \sigma_{ij}^0(t) + \mu \sigma_{ij}^1(\xi). \end{aligned} \quad (16)$$

Для компонентів тензору деформацій за припущенням малих коливань отримано:

$$\varepsilon_{ij} \approx \varepsilon_{ij}^0 + \mu \varepsilon_{ij}^1; \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ij}^0 = \frac{1}{2} (u_{i,j}^0 + u_{j,i}^0 + u_{k,i}^0 u_{k,j}^0); \quad (18)$$

$$\varepsilon_{ij}^1 = \frac{1}{2} (u_{i,j}^1 + u_{j,i}^1). \quad (19)$$

Після підстановки асимптотичних розкладень (16), (17) у (12) та їх усереднення на періоді з точністю до  $\mu^2$  отримано дві рекурентні системи рівнянь. Перша описує процеси, що відбуваються у «повільному» основному русі:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}^0 + f_i^0 &= \rho \dot{u}_i^0, & x_i \in V; \\ \sigma_{ij}^0 n_j &= p_{in}^0, & x_i \in S_3; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{ij}^0 = C_{ijkl} \sigma_{kl}^0 + c_{ij}^0, \quad \varepsilon_{ij}^0 = \frac{1}{2} (u_{i,j}^0 + u_{j,i}^0 + u_{k,i}^0 u_{k,j}^0), \quad x_i \in V;$$

$$u_i^0|_{S_3} = \bar{u}_i, \quad u_i^0(x_i, 0) = u_{i0}(x_i), \quad v_i^0(x_i, 0) = c_{ij}^0 = 0.$$

Тут всі невідомі є функції, що повільно змінюються у масштабі часу  $t$ . Інерційний доданок у (20) формально слідує з виведених рівнянь, але у розрахунках їм слід нехтувати. У випадку, коли малі не тільки деформації, а ще й кути поворотів, як це має місце у багатьох випадках, кінематичні співвідношення лінеаризуються:  $\varepsilon_{ij}^0 = 0.5(u_{i,j}^0 + u_{j,i}^0)$ .

Друга система описує процеси, що відбуваються у «швидкому» додатковому русі, всі невідомі змінюються у масштабі «швидкого» часу  $\xi$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^1 &= \frac{1}{\mu^2} \rho u_{,\xi\xi}^1, & x_i \in V; \\ \sigma_{ij}^1 n_j &= \Phi_i(\xi), & x_i \in S_4; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{ij}^1 = \frac{1}{2} (u_{i,j}^1 + u_{j,i}^1) = C_{ijkl} \sigma_{kl}^1, \quad x_i \in V;$$

$$u_i^1|_{S_4} = \bar{u}_i; \quad u_i^1(x, 0) = v_i^1(x, 0) = 0, \quad c_{ij}^1 = 0, \quad 0 < \xi < 1.$$

Системи (20) та (21) пов'язані рівняннями стану (9)-(10). Система (21) є лінійною та з точністю до множника  $1/\mu^2$  відповідає задачі малих пружних вимушених коливань. Розв'язок цієї системи знаходиться у вигляді суперпозиції гармонійних функцій так, що

$$u_i^1 = \sum_{r=1}^R u_i^r \cos \mu 2\pi r \xi + \sum_{q=1}^Q u_i^q \sin \mu 2\pi q \xi, \quad (22)$$

де невідомі  $u_i^r(x)$ ,  $u_i^q(x)$  знаходяться з системи (21).

У випадку одногармонійного навантаження отримуємо одноперіодичний процес з частотою вимушених коливань  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ .

На основі систем рівнянь основного руху (20) з рівняннями стану типу (9)-(10) та малих вимушених коливань (21) сформульовані відповідні варіаційні постановки задач циклічної повзучості при плоскому напруженому стані, а також пластин та оболонок при згині. Для цього залучені варіаційні функціонали Сандерса - Мак-Комба - Шлехте та функціонали типу Лагранжу.

**Четвертий розділ** присвячено викладенню розробленого у роботі методу розв'язку початково-крайових задач повзучості з урахуванням пошкодженості циклічно навантажених тіл. Метод використовує скінченоелементні алгоритми для розв'язання крайових задач та крокові схеми для початкових.

На початку надано скінченоелементне формулювання задач циклічної повзучості для тіл при плоскому напруженому стані, тонких пластин та оболонок при згині. На функціонально-аналітичному рівні наведено основні співвідношення для розв'язку задач, які описують основний рух системи у «повільному» часі (повзучість) та вимушені коливання у «швидкому» часі. Далі, у відповідності зі схемою МСЕ, розглянуто питання щодо дискретизації областей, які зайняті тілами, та вибору функцій форм. Точність розв'язків залежить як від розміру скінченного елемента, так й від його апроксимаційних властивостей. Разом з тим використання складних елементів призводить до різкого зростання обсягів машинної пам'яті, що може зробити неможливим практичне застосування алгоритмів при розрахунках задач циклічної повзучості кроковими методами. У зв'язку з цим для розв'язку цих задач запропоновано використовувати такі типи елементів, які спроможні забезпечити достатню точність розв'язків на кожному кроці інтегрування за часом у задачах, аналогічних пружним з додатковими напруженнями.

У розрахунках використовуються 4 типи скінчених елементів. Плоский напружений стан досліджено за допомогою трикутного 3х вузлового скінченного елемента (СЕ) з 6 степенями свободи. Для положистих оболонок та пластин застосований трикутний елемент з 18 степенями свободи. Для оболонок обертання - елемент у вигляді конічної оболонки з 28 степенями свободи. У випадку осьової симетрії задач використовувався двохвузловий СЕ конічної оболонки з 6 степенями свободи.

Після застосування скінченоелементних процедур, у роботі одержані рівняння для розв'язання початково - крайових задач. Задачі циклічної повзучості плоских тіл з

урахуванням пошкодженості їхнього матеріалу внаслідок повзучості та високотемпературної багаточислової втоми розв'язуються за наступною системою рівнянь:

$$K \ddot{u}^0 = \dot{F} + \dot{F}^c, \quad (23)$$

де

$$\dot{F} = \sum_{N_\beta} \int_{S_3^e} N^T \dot{p}^0 dS \Big|_{t=0} + \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} N^T \dot{P}^0 dV \Big|_{t=0}; \quad \dot{F}^c = \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} \Phi^T \cdot \Phi \dot{c} dV,$$

та

$$\begin{aligned} \{\dot{c}\} &= \frac{3}{2} \frac{\sigma_{VM}^0 \tau^{n-1} + \nu \sigma_H}{-\omega^0} [\hat{C}] \{\sigma^0\}, \\ \dot{\omega}^0 &= \alpha_f (\hat{A}) D \frac{\sigma_{eq}^0 \tau^m}{-\omega^0} + \beta_f (\hat{A}) F_f \frac{\chi_f \sigma^0 \sigma^a \tau^p}{-\omega^0}, \quad (24) \\ \omega^0(0) &= 0, \omega^0(t_*) = 1; \quad [\hat{C}] = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & 0 \\ -1/2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Тут, як звичайно,  $[K]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  - матриці жорсткості системи, деформацій та пружності,  $[N]$  - матриця форм;  $\{u\}$  - вектори вузлових переміщень,  $\{\sigma\}$  та  $\{\varepsilon\}$  - вектори напружень та деформацій в елементах;  $\{F\}$  та  $\{F^c\}$  - вектори прикладених вузлових сил та сил, обумовлених деформаціями повзучості.

Розв'язок задачі вимушених коливань для кожної складової полігармонічного навантаження визначається системою рівнянь типу

$$K - \Omega^2 M \ddot{u}^a = F^a, \quad (25)$$

Тут  $\{u^a\}$ ,  $\{F^a\}$  - вектори амплітудних значень вузлових переміщень та сил відповідно до кожної складової полігармонічного навантаження з частотою вимушених коливань  $\Omega$ ,  $[M]$  - матриця мас системи СЕ. За амплітудними значеннями вузлових переміщень за допомогою геометричних та фізичних рівнянь одержуються амплітуди деформацій та напружень у скінчених елементах, за якими обчислюються їхні необхідні інваріанти, що входять до рівнянь стану циклічної повзучості.

Скінченоелементний розв'язок задач згину пластин та оболонок на кожному кроці інтегрування за часом на відміну від попереднього визначається системою рівнянь

$$K \ddot{u}^0 = F + F^c + F^n,$$



$$F \equiv \sum_{N_\beta} \int_{S_3^e} N^T p^0 dS; F^c \equiv \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} \Phi^T \cdot \Phi \cdot c dV; \quad (26)$$

$$F^n \equiv \sum_{N_\beta} \left( \int_S N^T p^n ds + \int_{V_\beta} [B]^T [C] \{\varepsilon^n\} dV \right),$$

до якої додаються рівняння стану (24). Тут  $\{F^n\}$  - додаткові вузлові сили, пов'язані з урахуванням геометричної нелінійності.

Для розв'язку сформульованих задач застосовано: метод прогнозу-корекції (інтегрування початкових задач), методи Холецького та фронтальний - для розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Повну проблему власних значень розв'язано методом Якобі. Для регуляризації чисельних розв'язків на кожному кроці за часом застосовується метод сполученої апроксимації.

Запропоновані алгоритми методів розв'язку задач циклічної повзучості реалізовано у вигляді пакету прикладних програм, орієнтованого на IBM-сумісні комп'ютери.

Для оцінки достовірності чисельних даних, отриманих при застосуванні пакету програм, у роботі проведено цикл досліджень, що включає аналіз збіжності розв'язків задач визначення напружено-деформованого стану зі скінченоелементними сітками, що використовуються; оцінки збіжності при інтегруванні початкових задач. Проаналізовано виконання умов простого навантаження, що передбачались за теоретичними припущеннями задач циклічної повзучості. Дані досліджень свідчать про ефективність програмної розробки.

**У п'ятому розділі** викладено результати досліджень з достовірності розв'язків задач циклічної повзучості при двовимірному напруженому стані. За результатами порівняння чисельних даних, отриманих у роботі, з експериментальними, які наведені у літературі, зроблено висновки щодо адекватного опису динамічної повзучості та пов'язаного з нею руйнування у випадках, коли до статичного навантаження розтягу додаються циклічні напруження згину; довготривалої міцності лопаток ГТД при такому ж навантаженні у широкому діапазоні зміни параметру асиметрії циклу напружень; руйнування внаслідок циклічної повзучості при складному плоскому напруженому стані, який реалізується у зразках з гострими надрізами.

Експериментальні дослідження повзучості матеріалів та конструктивних моделей, методики та засоби випробувань, експериментальні дані, отримані з метою як подальшої верифікації запропонованих в роботі методу та алгоритмів розрахунку, так й встановлення ступеню вірогідності отриманих чисельних даних, є змістом **шостого розділу**.

У розділі представлено опис експериментальних комплексів, методик та результатів досліджень циклічної повзучості матеріалів, тонких квадратних та круглих пластин - суцільних і з отворами при згині, а також пластин з надрізами при осьовому навантаженні.

Експериментальні дослідження виконано в лабораторії міцності кафедри динаміки та міцності машин Харківського державного політехнічного університету, що має створені на протязі п'ятидесяти років унікальні можливості виконання експериментальних робіт у напрямку повзучості.

У розділі наведено експериментальні дані, одержані за допомогою створених стендів. Отримані криві циклічної повзучості зразків з матеріалів Д16АТ та АМГ6 добре описуються за допомогою запропонованих фізичних рівнянь (9) -(10).

Дані щодо змін деформованого стану, отримані експериментально на конструктивних моделях пластин з надрізами та вирізами, порівнювались з результатами чисельного моделювання. Як приклад, наведемо деякі результати випробувань пластин з гострими надрізами при осьовому навантаженні. Пластини було виконано з дуралюмінієвого сплаву Д16АТ, температура випробувань 573К. Їхні геометричні розміри відповідають стандартним плоским зразкам довжиною  $6.6 \cdot 10^{-2}$ м, шириною  $6.2 \cdot 10^{-3}$ м та товщиною  $1.3 \cdot 10^{-3}$ м для випробувань на повзучість та довготривалу міцність. Розглянуті смуги було виконано з симетрично розташованими чотирма гострими надрізами, що мали рівні кути розхилу  $60^\circ$ .

Програма випробувань складалася з експериментів на статичну та циклічну повзучість пластин до руйнування. Випробування виконані з застосуванням модифікованої установки АІМА 5-2. Один край зразку було жорстко закріплено, а інший був з'єднаний з пристроєм навантаження. Розглянуто чотири програми випробувань, дві з яких пов'язані зі статичним навантаженням, та дві - з комбінованим, коли до статичної складової  $p_m$  додавалась циклічна складова  $p_a$ , що гармонійно змінювалась з частотою 290Гц. Надамо номери цим програмам навантаження: 1: статичний розтяг смуги напруженням  $p_m=35.5$ МПа. У випадках 2-4 підтримувалось значення  $p_m=23.5$ МПа, а параметр асиметрії циклу навантаження  $L=p_a/p_m$  варіювався: 2 -  $L=0.9$ , 3 -  $L=0.5$ , 4 - статичне навантаження з  $L=0$ .

На рис. 1 для усіх чотирьох програм випробувань точками позначені усереднені дані переміщень кромки смуг з надрізами. Збільшення циклічної складової призводить до більших значень  $v$ , набутих за один й той же час. Так, наприклад, к моменту  $t=2$ г при  $L=0$   $v^{\max}$  дорівнює 0.21мм, а при  $L=0.5$   $v^{\max} = 0.36$ мм, що більше ніж в 1.5 рази. При цьому за програ-

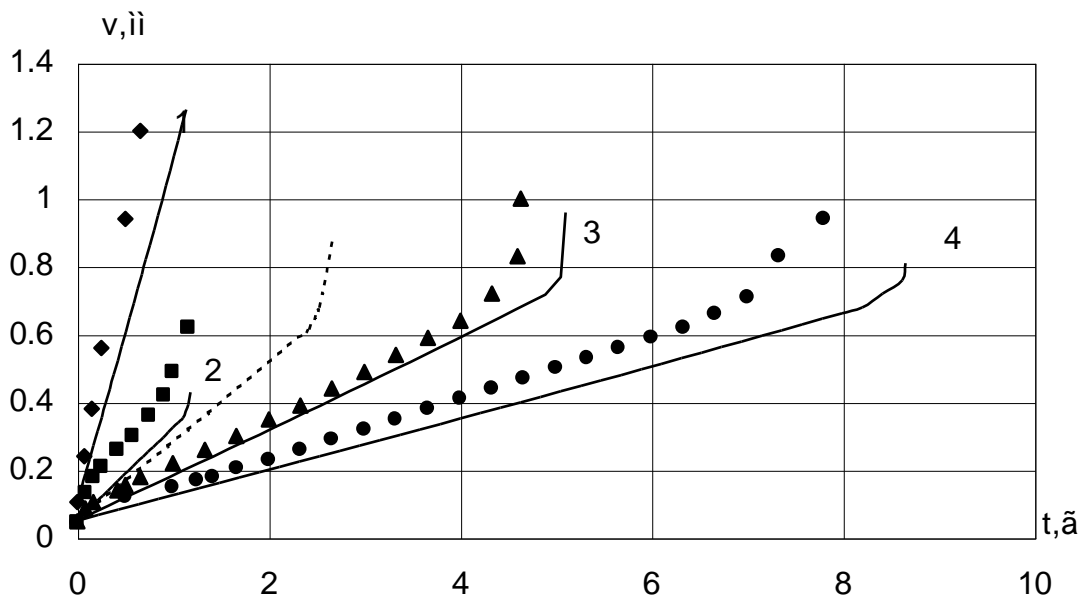


Рис.1. Переміщення кромки смуг з надрізами

мою 2 ( $L=0.9$ ) на цей момент вже відбулось руйнування смуги, граничні переміщення її кромки перед руйнуванням ( $t_*=1.2$  г) дорівнюють 0.61мм.

Програму 1 з статичного розтягу напруженням  $p_m=35.5$ МПа прийнято до порівняння з програмою циклічного навантаження з  $p_m=23.5$ МПа та  $L=0.5$ . У порівняннях повзучості за цими програмами з'ясувалась гіпотеза про те, що циклічна повзучість еквівалентна статичній при  $p_m^{\max} = p_m + p_a$ . Експериментальні результати - швидкість деформування та час до руйнування свідчать, що така гіпотеза не є справедливою й тому неможливо відбити реальну криву циклічної повзучості пластини з  $L=0.5$  кривою статичної повзучості з  $p_m^{\max} = p_m + p_a$ . Такий висновок з експериментальних досліджень підтверджує теоретичні положення запропонованої теорії. У роботі це вперше експериментально доведено для двовимірного напруженого стану.

Одержані експериментальні результати використано для аналізу достовірності чисельних даних, що одержуються при комп'ютерному моделюванні повзучості та руйнування смуг з надрізами. В розрахунках використовувався плоский трикутний трьохвузловий елемент. Попередніми чисельними дослідженнями за умов збіжності розв'язків задачі на трьох різних сітках для розрахунків було обрано сітку з 140 вузлами та 184 елементами.

Проведено розрахункове визначення напружено-деформованого стану та часу до руйнування пластин для усіх чотирьох програм випробувань, що й аналізувалися вище.

Чисельні результати на рис.1 подані суцільними лініями. Тут для програми 3 з  $L=0.9$  наведено результати чисельних розрахунків за двома моделями повзучості - без урахування втоми - (пунктирна крива) та циклічна повзучість з урахуванням втомних пошкоджень. Це зроблено у зв'язку з тим, що значення критичного параметру асиметрії циклу напружень  $A_{кр}$  для цього випадку дорівнює 0.85. Таким чином, програма 2 ( $L=0.9$ ) теоретично відноситься до циклічної повзучості, а випадок 3 ( $L=0.5$ ) - до динамічної.

Як можна побачити з рис. 1, розрахункові дані вірно описують якісні характеристики деформування та руйнування пластин. Кількісні дані слід вважати задовільними: максимальна різниця між експериментальними та чисельними результатами для  $v^{max}$  та часу до руйнування  $t_*$  не перевищує 25%. Окремо проаналізуємо циклічну повзучість з  $L=0.9$  (крива 2). Тут розрахунки з урахуванням динамічної повзучості (пунктирна крива) дають істотно завищені дані. Розрахунки з урахуванням взаємодії пошкоджень повзучості та втоми (суцільна крива) дають практично те ж саме значення часу до руйнування (1.2 г), що й визначено експериментально, з похибкою у значенні  $v^{max}$  не більшою, ніж в усіх розглянутих випадках. Цей висновок отримано за чисельними та експериментальними результатами, він цілком відповідає теоретичним положенням щодо доцільності застосування у розрахунках сумування двох типів пошкоджень за кінетичним рівнянням (10).

Порівняння чисельних та експериментальних даних, одержаних для задач згину квадратних та круглих пластин з вирізами, отримані при цьому задовільні результати (максимальна різниця не перевищувала 40%), надали можливість зробити висновок щодо достовірності чисельних результатів.

За результатами верифікаційних досліджень у роботі зроблено висновок про те, що створені методи, алгоритми та програмні засоби є придатними як для чисельного вивчення закономірностей циклічної повзучості, так й для розв'язку практичних задач високотемпературної довготривалої міцності конструктивних елементів.

Метою **сьомого розділу** є чисельний аналіз напружено-деформованого стану при циклічній повзучості з урахуванням накопичення пошкодженості у конструктивних пластинчатих та оболонкових елементах, які деформуються до руйнування.

У розділі розглянуто чисельні розрахунки на повзучість з пошкодженнями тонких суцільних пластин з надрізами та вирізами при плоскому напруженому стані та при поперечному згині, тонких оболонок обертання при осесиметричному та неосесиметричному навантаженні. Отримані розрахункові дані узагальнено у вигляді

закономірностей циклічної повзучості. Встановлені закономірності рекомендовані до проектування відповідальної техніки.

Аналіз розрахунків підтверджує існування залежності швидкості повзучості та часу до завершення прихованого руйнування у розглянутих пластинах від величини та розподілу параметру асиметрії циклу напружень, як це має місце при простому напруженому стані. Але при двовісному напруженому стані, який реалізується у пластинах, що розглядаються, величина та розподіл цього параметру залежить як від рівня циклічної складової навантаження, так й від її частоти.

Виходячи з розглянутих прикладів поведінки пластин при плоскому напруженому стані, виявлено наступні закономірності циклічної повзучості. Коли на початку деформування в усіх точках реалізуються умови динамічної повзучості, при повзучості за часом області з  $A > A_{кр}$  з'являються тільки в районах концентрації напружень, де відбувається зміна механізмів пошкодженості внаслідок динамічної повзучості на взаємодію повзучості та втоми. У решті об'єму превалюють механізми динамічної повзучості.

При згині пластин з концентрацією напружень вище встановлені закономірності повзучості та руйнування зберігаються. Однак руйнування внаслідок додаткової дії втомних пошкоджень може бути незалежним від початкової концентрації напружень та відбуватися внаслідок релаксації максимальних напружень, наприклад, в областях біля жорстко закріплених границь.

Сформульовані закономірності залежать від рівня параметру асиметрії циклу напружень, що впливає на координати місця завершення прихованого руйнування. Так, наприклад, в областях з великою концентрацією напружень, де  $A > A_{кр}$ , за рахунок істотної релаксації напруження перерозподіляються, так, що у сусідніх точках еквівалентні напруження в кінетичних рівняннях для пошкоджень внаслідок втоми, які враховують як статичні, так й амплітудні компоненти, можуть помітно зростати, що й визначає зміну місця остаточного граничного рівня пошкодженості при повзучості.

За даними чисельних досліджень встановлені закономірності процесів циклічної повзучості та накопичення пошкоджень у циліндричних та конічних оболонках: як й у пластинах, тут має місце істотна інтенсифікація процесів повзучості та накопичення пошкоджень за рахунок додавання циклічної складової. Характер цього прискорення повзучості виявляється складним: так, наприклад, збільшення частоти навантаження скорочує час до руйнування та збільшує швидкість повзучості лише при вимушених коливаннях за першою формою. При вищих частотах вплив циклічного навантаження

визначається розподілом амплітудних складових напружень. Виявлено, що у оболонках пошкодженість охоплює великі області з близьким рівнем її значень, що істотно відрізняється від плоского напруженого стану з концентраторами напружень, де пошкодженість має локальний характер.

Для різних за формою оболонок проведено аналіз впливу величини та розподілу параметру асиметрії циклу напружень на параметр пошкодженості, час та місце завершення прихованого руйнування. Чисельними розрахунками встановлено, що у пластинах та оболонках при згині руйнування внаслідок переважної дії втомних пошкоджень може виникати й при відсутності початкової концентрації напружень - як внаслідок суттєвого перерозподілу напружень зі значною їх релаксацією, так й завдяки вимушеним коливанням оболонок за формами, вищими за першу.

В розглянутих прикладах встановлено закономірності повзучості та руйнування пластин та оболонок, що є важливими як для розуміння явища циклічної повзучості, так й для проектування таких поширених елементів конструкцій. Висновок щодо часу до руйнування, виду пошкодженості та набутого деформованого стану, як показано у розділі, для кожної конкретної конструкції може бути зроблено за результатами розрахунків на базі теорії та методів, що запропоновані у роботі.

У **восьмому розділі** наведено результати дослідження прикладних задач циклічної повзучості та довготривалої міцності поширених елементів конструкцій - лопаток авіаційних газових турбін, труб хімічного виробництва, оболонок твелів ядерних реакторів, панелей обшивки літаків та обговорено встановлені закономірності їхньої повзучості за експлуатаційними умовами.

Коротко наведемо результати чисельних досліджень лопаток ГТД за розрахунковою схемою консольно жорстко закріплених коротких пластин у формі трапеції. Розглянуто повзучість лопаток при дії відцентрових сил та нормального тиску, що змінюється за гармонійним законом з частотами 100 Гц (режим 1) и 1100 Гц (режим 2). Розрахунки виконано для лопаток з жароміцних нікелевих сплавів ЭИ867 та ЭП109 при температурі 1173К, які широко застосовуються для їх виготовлення.

До чисельного моделювання залучено сітку з трикутних трьохвузлових елементів. За аналізом власних частот визначено, що режими 1 та 2 відповідають руху пластини за 1<sup>ою</sup> та 2<sup>ою</sup> формами вимушених згинних коливань, які превалюють при експлуатації ГТД.

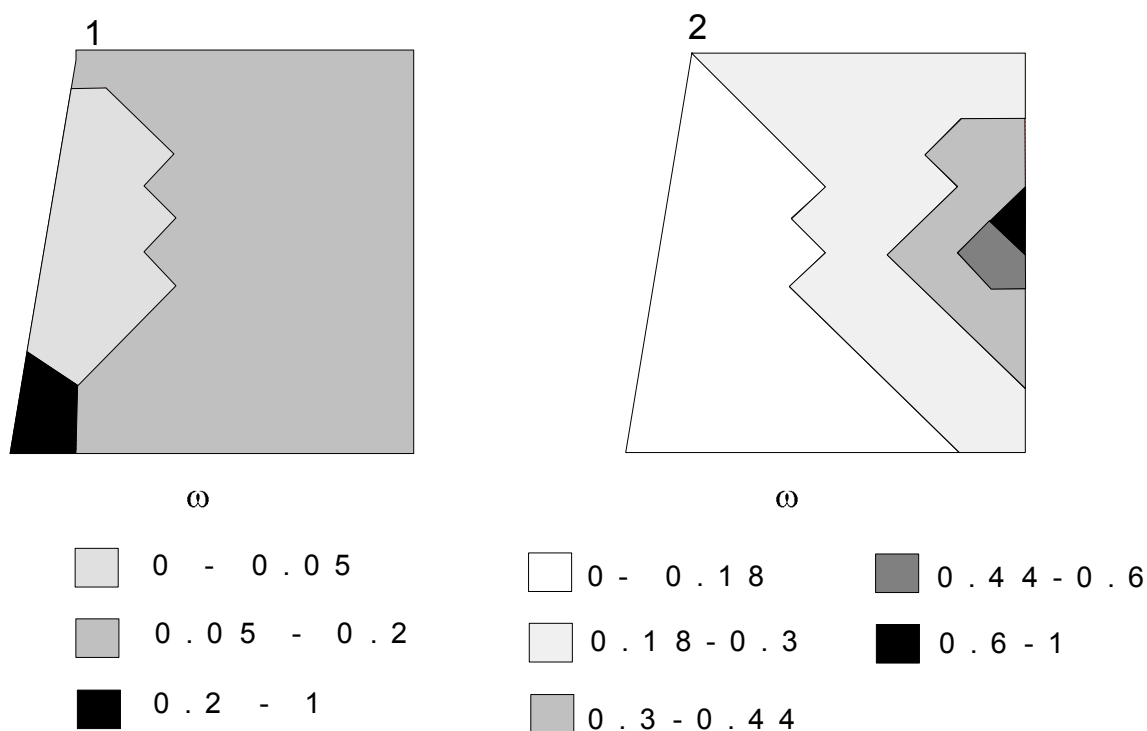


Рис.2. Розподіл рівнів параметру пошкодженості у лопатках

На рис. 2 ілюструються рівні параметру пошкодженості  $\omega$  на поверхні лопатки зі сплаву ЭИ867 у момент завершення прихованого руйнування при першому (ліворуч) та другому (праворуч) режимах навантаження відповідно. Зона біля максимального значення  $\omega$  відповідає області, де виникають макротріщини. За розрахунками встановлено, що макроруйнування починається у кореневому перерізі лопатки за режимом 1 та у області біля максимального значення амплітудних напружень при коливаннях лопатки з частотою, вище першої власної (режим 2), що добре узгоджується з відомими експериментальними даними. Наголосимо, що найменший час до руйнування реалізується у лопатках при навантаженні за 1<sup>м</sup> режимом.

Флуктуації температури у ядерних реакторах призводять до повторних деформацій поверхні оболонок елементів виділення тепла (твелів), створюючи високочастотне навантаження. У роботі розглянуто цю проблему з метою оцінки деформованого стану та накопиченої пошкодженості внаслідок повзучості. Розглянуто фрагмент твелу, який прийнято шарнірно закріпленою за краями циліндричною оболонкою з спеціальної реакторної сталі, середня експлуатаційна температура дорівнює 873К. У розрахунках прийнято, що внутрішній тиск у твелі змінюється за законом  $p = p^0 + p^a \cdot \sin 2\pi f t \cdot \cos 3\phi$ , де  $\phi$  - кутова координата,  $p^0$ ,  $p^a$  - постійна та амплітудна складові тиску.

Чисельне моделювання виконано за допомогою чотирьохвузлового елемента

оболонки обертання. Результати розрахунків, які виконано для динамічної (крива 1,  $L = p^a/p^0 = 0.05$ ) та статичної повзучості твелу під тиском  $p^0 = 65 \text{ МПа}$  (крива 2), надано на рис. 3. Отримані чисельні дані свідчать, що внаслідок динамічної повзучості втрачається симетричність форми деформування твелів. Встановлено, що причиною такого неосиметричного деформування є істотна нерівномірність за кутовою координатою тиску в твелі. Вже за 1 рік безперервної роботи деформування твелів призводить до суттєвих змін їхньої форми, що представлено на рис. 3, а. Тут жирною лінією надано початкову форму оболонки, криві 1 та 2 демонструють зростання її прогину за часом.

Релаксація максимальних напружень при цьому також призводить до неосесиметричного перерозподілу напружень, суттєвих силових факторів (рис. 3, б). Тут кривою з індексом «0» представлено рівень осьових зусиль  $N_1$  у середині фрагменту оболонки твелу при  $t=0$ .

Результати проведених чисельних розрахунків свідчать, що разом з факторами, які традиційно обмежують довготривалу міцність оболонок твелів: підвищені температури та тиски, радіаційне опромінювання тощо, циклічне змінювання тиску також може суттєво лімітувати ресурс твелів. Останнє впливає підвищенням швидкості накопичення пошкоджень внаслідок розвиненої циклічної повзучості та втратою форми оболонки, яка може відбутися раніше, ніж закінчення прихованого руйнування.

За результатами чисельних досліджень встановлено, що розглянутим об'єктам, що характеризуються досить складною геометрією форми та на-

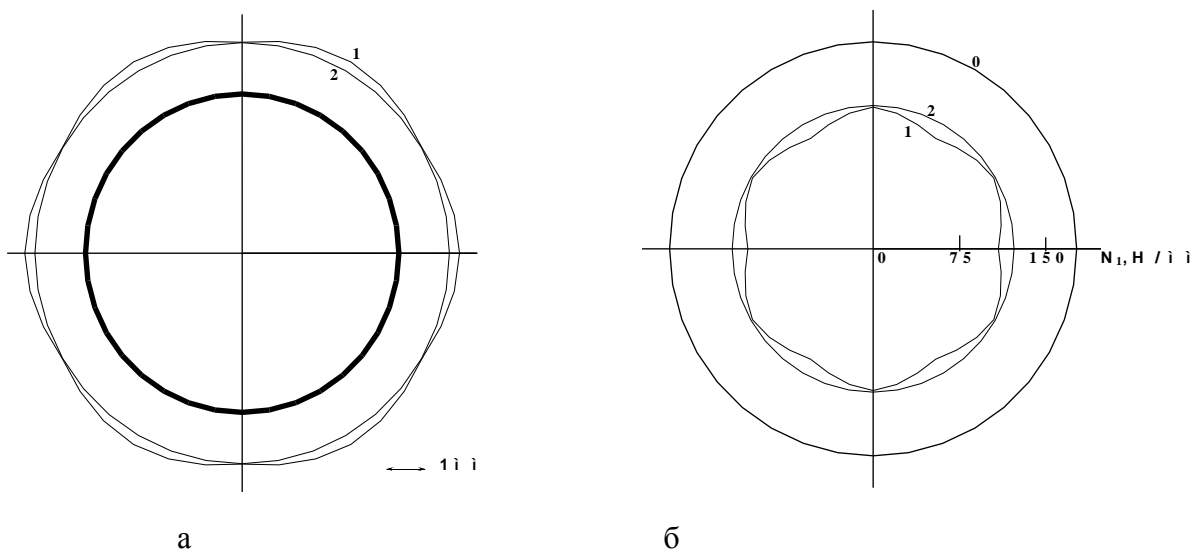


Рис. 3 Змінювання форми (а) та осьових зусиль (б) у центральному перерізі оболонки твелу вантажень, притаманні основні закономірності циклічної повзучості, які виявлені при чисельному та експериментальному аналізі циклічного деформування пластин та оболонок



канонічної чи більш простої форми: терміни життя в них також менші, а деформування йде швидше, ніж при навантаженні тільки статичною складовою.

У той же час виявлено нові факти та закономірності: причиною руйнування лопаток газотурбінних двигунів, що працюють в умовах спільної дії статичних та досить високих циклічних навантажень, може виявитись тільки механізм пошкодженості внаслідок повзучості при дуже незначному рівні набутих деформацій; навіть незначна початкова пошкодженість втомного характеру може істотно зменшити ресурс елементів, що експлуатуються в умовах повзучості; коливання зовнішнього тиску, викликані турбулентністю газових потоків, якісно змінюють форму деформованих при повзучості оболонок, що може привести до вичерпання їхнього ресурсу за фактом втрати функціональної запроєктованої геометрії.

У розділі також сформульовані теоретичні основи технологічного процесу формоутворення панелей у режимі динамічної повзучості, на чисельному прикладі продемонстровано його переваги у порівнянні зі статичним формуванням заготовок.

## **ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ**

У дисертаційній роботі надано розроблений автором новий метод розрахунку на повзучість з урахуванням пошкодженості та результати досліджень з деформування й довготривалої міцності циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій.

За сукупністю, теоретичним та практичним значенням виконаних досліджень можна вважати, що у роботі здійснена нова науково обгрунтована розробка у динаміці та міцності машин, яка забезпечує розв'язання значної прикладної проблеми розрахунку на повзучість та довготривалу міцність циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій. На сучасному теоретичному рівні з використанням останніх надбань нелінійної механіки та теорії повзучості, континуальної механіки пошкодженості та чисельних методів у дисертаційній роботі розв'язано важливі питання визначення параметрів довготривалої міцності та часу до ініціювання макроруйнування в тонкостінних плоских та оболонкових елементах конструкцій, які функціонують в умовах незворотної високотемпературної повзучості при дії статичних та циклічних навантажень, що швидко змінюються за часом.

Наукове значення розв'язаної проблеми полягає у:

- розробці та обгрунтуванні рівнянь стану циклічної повзучості з урахуванням пошкодженості внаслідок дії механізмів повзучості та втоми, придатних до застосування

у розрахунках при складному напруженому стані, що реалізується у машинобудівних конструкціях;

- створенні ефективного методу чисельного аналізу циклічної повзучості при складному напруженому стані;
- чисельно та експериментально встановлених закономірностях циклічної повзучості та руйнування конструктивних елементів машин.

Практичне значення роботи полягає у тому, що у ній реалізовано пакет прикладних програм для сучасних ПЕОМ, який дозволяє на єдиній методологічній основі проводити на етапі проектування розрахунки циклічної повзучості з урахуванням пошкодженості деталей та елементів машин насамперед у енергетичній, авіаційній, атомній та хімічній промисловості України. Проведення таких розрахунків надасть змогу одержати науково-обґрунтовані висновки з довготривалої міцності та оцінки ресурсу вже існуючих об'єктів та при проектуванні нових зразків.

Найбільш важливі наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. За наданою у роботі оцінкою стану проблеми зроблено висновок, що до теперішнього часу існували лише спрощені методики, що були неспроможні визначити параметри складного напружено-деформованого стану та час до ініціювання макроруйнування елементів машинобудівних конструкцій, які мають експлуатуватися в умовах високотемпературної повзучості та циклічного навантаження, що швидко змінюється за часом. Спрощені методики при застосуванні до оцінки багаточислової високотемпературної довготривалої міцності елементів конструкцій нехтували ефектами, властивими повзучості при складному напруженому стані, деформаціями повзучості, розподілом динамічних напружень й іншими важливими факторами, що призводило до невірних оцінок ресурсу. Потреби сучасної практики проектування вимагають створення більш достовірних методів розрахунків та сучасних програмних засобів гарантованої розрахункової оцінки циклічної повзучості та довготривалої міцності елементів машин та конструкцій.

2. У дисертаційній роботі для створення нового методу розрахунку на повзучість елементів машинобудівних конструкцій, які експлуатуються при підвищених температурах та сумісній дії статичних та циклічних навантажень з малим періодом, застосовано метод розв'язання початково-крайових задач повзучості тіл за асимптотичними розкладами у двох масштабах часу - «повільному», який відповідає основному руху системи під дією статичних чи повільно змінних навантажень, та «швидкому», який відповідає малим осциляціям внаслідок дії циклічного навантаження. Після застосування процедури усереднення на періоді складових навантаження, що швидко змінюється, одержано дві

рекурентні (пов'язані) системи рівнянь, які описують рух розглянутого тіла у «повільному» та «швидкому» часі.

3. Одержані системи рівнянь не є незалежними, вони пов'язані рівняннями стану циклічної повзучості з урахуванням пошкодженості при складному напруженому стані. У роботі запропоновано та термодинамічно й експериментально обгрунтовано варіант таких рівнянь стану, який дає можливість визначення полів деформацій повзучості та пошкодженості для змінного за часом діапазону параметру асиметрії циклу напружень, яким характеризуються різні механізми деформування та руйнування внаслідок статичної чи динамічної або циклічної повзучості, що відбувається при взаємодії пошкоджень внаслідок повзучості та багатоциклової втоми.

4. Для розв'язку одержаних початково-крайових задач циклічної повзучості застосовано метод скінчених елементів у комбінації з кроковими методами інтегрування за часом. Для найбільш поширених у сучасній практиці проектування об'єктів - плоских деталей, пластин та оболонок розроблено алгоритми розв'язку задач повзучості та вимушених коливань, за рахунок яких остаточно розв'язуються проблеми багатоциклової повзучості.

5. Створені скінченоелементні алгоритми реалізовано у вигляді пакету прикладних програм, орієнтованих на IBM - сумісні комп'ютери.

6. Проведено оцінку достовірності отриманих розв'язків. Для цього досліджено їхню збіжність в залежності від дискретизації за координатами та часом, проаналізовано та встановлено виконання умов простого навантаження. У цілому достовірність розв'язків підтверджено узгодженими даними при порівнянні чисельних результатів, отриманих за допомогою створених програмних засобів, з експериментальними, які одержані як особисто, так й іншими авторами. Максимальні похибки для найбільш складних випадків не перевищують 30%, що свідчить про достатній ступінь адекватності запропонованого розрахункового опису процесів циклічної повзучості та пошкодженості.

7. Для експериментального дослідження циклічної повзучості матеріалів та елементів конструкцій спроектовано та виготовлено стенди, що дозволяють проводити випробування плоских деталей при розтягу та пластин і оболонок при згині. За допомогою створеного обладнання проведено дослідження циклічної повзучості зразків з матеріалів Д16АТ та АМГ-6, смуг з гострими надрізами, квадратних та круглих пластин з отворами.

8. За результатами чисельних та експериментальних досліджень встановлено нові закономірності багатоциклової повзучості та руйнування при складному напруженому стані. Встановлено, що при початковій динамічній повзучості в районах концентрації напружень внаслідок їхньої релаксації при повзучості можливо виникнення областей з великими

значеннями  $A > A_{кр}$ , у яких відбувається зміна механізмів пошкодженості. На відміну від цього руйнування внаслідок переважної дії втомних пошкоджень може виникати в пластинах та оболонках при згині й при відсутності початкової концентрації напружень - як внаслідок їх суттєвого перерозподілу з значною релаксацією напружень, так й завдяки вимушеним коливанням за формами, вищими за першу. При збільшенні величини параметру асиметрії циклу напружень у пластинах з істотною концентрацією напружень зі зростанням параметру асиметрії навантаження внаслідок суттєвої втомної пошкодженості може змінюватись місце закінчення прихованого руйнування. Прискорення повзучості завдяки додаванню циклічної складової у оболонках при згині має складний характер й визначається характером розподілу складових амплітудних напружень.

Виявлено, що: причиною руйнування лопаток газотурбінних двигунів може виявитись тільки механізм пошкодженості внаслідок повзучості при дуже незначному рівні набутих деформацій; навіть незначна початкова пошкодженість втомного характеру істотно зменшує ресурс елементів, що експлуатуються в умовах повзучості; коливання зовнішнього тиску, наприклад викликані турбулентністю газових потоків, якісно змінюють форму деформованих при повзучості оболонок.

9. Теоретичні та експериментальні результати досліджень отримані за державними науковими темами та програмами. У роботі розв'язано практичні задачі повзучості та довготривалої міцності найбільш поширених елементів машинобудівних конструкцій: лопаток ГТД, труб установок рідинного каталітичного крекінгу, оболонок твелів, панелей літальних апаратів та інших. Результати роботи у вигляді розрахункових даних та рекомендацій використовуються у практиці проектування Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», НВО «ТУРБОАТОМ» та Інноваційного технологічного центру "Лайн" (м. Харків).

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Breslavsky D., Morachkovsky O. New experiments in dynamic creep// Proc. 15th Symp. on Experimental Mechanics of Solids. - Warsaw: Warsaw Techn. Univ. - 1992. - P.29-31.

Автором спроектовано та виготовлено експериментальне обладнання, що модифікує установку АІМА-5-2 для випробувань на циклічну повзучість, одержано усі експериментальні та чисельні результати.

2. Бреславский Д.В. Аппроксимация кривых динамической ползучести по теории эквивалентных напряжений// Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т. сборник. - Харьков: ХПИ. - 1993. -№ 54. - С.29-33.

3. Breslavsky D., Konkin V., Morachkovsky O. Dynamic creep of rectangular plates// Proc. 16th Symp. on Experimental Mechanics of Solids. - Warsaw: Warsaw Techn. Univ. - 1994. - P. 35 - 38.

Автором спроектовано експериментальне обладнання для випробувань на циклічну повзучість тонких пластин, одержано усі експериментальні та чисельні результати.

4. Breslavsky D., Morachkovsky O. A new model of nonlinear dynamic creep// IUTAM Symposium on Anisotropy, Inhomogeneity and Nonlinearity in Solid Mechanics. - Rotterdam: Kluwer Academic Publishers. - 1995. - P. 161-166.

Авторові належить метод розрахунку динамічної повзучості тонкостінних елементів конструкцій, алгоритми, які реалізують МСЕ, та усі чисельні та експериментальні результати.

5. Breslavsky D., Morachkovsky O. Cyclic creep constitutive equations with consideration of creep - fatigue interaction// Proc. of 1st International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials. - Bethel, USA: SEM. - 1995. - P.61-66.

Авторові належать рівняння стану циклічної повзучості та усі чисельні результати.

6. Breslavsky D., Morachkovsky O.. Dynamic creep modeling with coupled creep and fatigue damage: computational and experimental results for structures// Creep and Coupled Processes. Selected and rev. papers of 5th International Symposium on Creep and Coupled Processes, Bialowieza, 1995. - Bialystok: Bialystok Techn. Univ. Publ. - 1996. - P. 141-146.

Авторові належать рівняння стану циклічної повзучості та усі чисельні результати.

7. Breslavsky D.V., Morachkovsky O.K., Shipulin S.A. Creep and rupture of notched plates under fast cyclic load// Proc. 17th Symp. on Experimental Mechanics of Solids. - Warsaw: Warsaw Techn. Univ. - 1996. - P. 118-123.

Авторові належать усі експериментальні та чисельні результати з повзучості та руйнуванні смуг з надрізами, експериментальні дані для плоских зразків одержано спільно з С.О.Шипуліним.

8. Морачковский О.К., Бреславский Д.В., Анищенко Г.О. Математические постановки начально-краевых задач теории динамической ползучести// R-функции в задачах математической физики и прикладной геометрии. Сборник научных трудов, посвященных 70-летию В.Л.Рвачева. - Харьков: ХГПУ. - 1996. - С. 33-37.

Автором отримано формулювання задач динамічної повзучості при складному напруженому стані.

9. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Морачковський О.К., Науменко К.В. Сучасні проблеми міцності та повзучості елементів конструкцій// Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Праці. - Львів: Штабар. - 1996. - С.7-8.

Авторові належать методи розв'язку задач та висновки з аналізу результатів розв'язку задач циклічної повзучості.

10. Breslavsky D., Morachkovsky O. Dynamic creep continuum damage mechanics: FEM-based design analysis// Computational Plasticity: Fundamentals and Applications. Proc. of the Fifth International Conference on Computational Plasticity held in Barselona, Spain. 17-20 March 1997. - Barselona: IMNE. - 1997. - Part 1. - P.1071-1076.

Авторові належить метод розрахунку динамічної повзучості тонкостінних елементів конструкцій на основі схеми МСЕ, та усі чисельні та експериментальні результати.

11. Анищенко Г.О., Бреславський Д.В. Ползучесть и повреждаемость в телах при плоском напряженном состоянии// Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т. сборник. Харьков: ХГПУ. - 1997. - №55. - С.23-32.

Авторові належить метод розрахунку повзучості при плоскому напруженому стані та окремі чисельні результати.

12. Бреславський Д.В. Циклическая ползучесть и повреждаемость элементов конструкций// Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье: Тр. междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 12-14 мая 1997г. Ч.1. - Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, МУ, МТУ. -1997. -С. 58 -61.

13. Бреславський Д.В., Морачковський О.К. Нелинейная ползучесть и разрушение плоских тел при высокочастотном циклическом нагружении// Прикладная механика. - 1998. -Т. 34, №3. - С.97-103.

Авторові належить метод розрахунку динамічної повзучості при плоскому напруженому стані та усі чисельні результати.

14. Анищенко Г.О., Бреславський Д.В., Морачковський О.К. Влияние циклического нагружения на ползучесть и длительную прочность пластин с отверстиями// Доповіді НАН України. - 1998. - №8. - С. 59-64.

Авторові належить метод розрахунку динамічної повзучості при плоскому напруженому стані та окремі чисельні результати.

15. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Ползучесть и длительная прочность елочного замкового соединения ГТД при совместном действии статических и циклических нагрузок// Проблемы прочности. -1998. -№1. -С. 34-40.  
Авторові належить метод розрахунку динамічної повзучості при плоскому напруженому стані та деякі чисельні результати.
16. Altenbach H., Breslavsky D., Morachkovsky O., Naumenko K. Simulation of Cyclic Creep-Damage Behaviour of Thin-Walled Structures Using Asymptotic Expansions// EUROMECH 385 Colloquium "Inelastic Analysis of Structures under Variable Loads: Theory and Engineering Applications" September 8-11, 1998. - Aachen, Germany: RWTH Aachen. - 1998. - P.87-89.  
Авторові належить метод розрахунку циклічної повзучості тонкостінних оболонок обертання та усі чисельні результати.
17. Бирюков О.В., Бреславский Д.В., Морачковский О.К., Шипулин С.А. Пути повышения прочности конструктивных элементов газостатов для подготовки отработанных сборок ТВС к длительному хранению// Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - Харьков: Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт".- 1998. - Вып. 3(69)-4(70). - С. 94-96.  
Авторові належать теоретичні питання щодо математичного формулювання задач та висновки за результатами досліджень.
18. Бреславский Д.В., Бурлаенко В.Н., Дзюбенко М.И., Колпаков С.Н. Циклическая ползучесть и разрушение пластин с вырезом, полученным с помощью лазера// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1998. - Вип.18. - С.95-99.  
Авторові належить ідея розрахункового дослідження, усі чисельні та експериментальні результати.
19. Бреславский Д.В., Чупрынин А.А. Ползучесть и повреждаемость в тонких неосесимметрично нагруженных оболочках вращения// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1998. - Вип.23. - С.87-91.  
Авторові належить метод розрахунку циклічної повзучості тонкостінних оболонок обертання.
20. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В., Бурлаенко В.Н.. Численное исследование разрушения лопаток ГТД при высокотемпературном циклическом нагружении// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1998. - Вип.27. - С.166-170.

Авторові належить ідея досліджень, метод розрахунку та усі чисельні результати.

21. Бреславский Д.В. Кинетические уравнения повреждаемости циклически нагруженных тел// Динамика и прочность машин. Респ. межвед. н-т. сборник. - Харьков: ХГПУ. - 1998. - №56. - С.132-139.
22. Бреславский Д.В. О закономерностях разрушения тонкостенных осесимметричных оболочек в условиях циклической ползучести// Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Збірка наукових праць ХДПУ. -Харків: Харк. держ. політехн. ун-т. Ч. 1. -1998.- Вип. 6. -С.44-47.
23. Бреславський Д. Рівняння стану повзучості металевих матеріалів за умов швидкого циклічного навантаження// Вісник Тернопільського державного технічного університету. - Тернопіль: ТДПУ. -1998.- Т.3, №1. - С.32-37.
24. Бреславский Д.В. Экспериментальные исследования циклической ползучести и разрушения пластин с надрезами// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.29. - С.115-117.
25. Бреславский Д.В. Ползучесть и разрушение тел при многоцикловом полигармоническом нагружении// Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.36. - С.12-15.
26. Бреславський Д.В., Морачковський О.К. Експериментальне дослідження циклічної повзучості алюмінієвих сплавів// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.42. - С.147-150.  
Авторові належать усі експериментальні та чисельні результати.
27. Бреславский Д.В., Морачковский О.К., Чупрынин А.А. Геометрически нелинейные задачи циклической ползучести оболочек вращения.// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. -Вип.43. - С.49-53.  
Авторові належить метод та окремі алгоритми розв'язку.
28. Бреславський Д.В., Морачковський О.К. Обгрунтування розрахункових моделей циклічної повзучості та руйнування жароміцних матеріалів// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.47. - С.3-6.  
Авторові належать рівняння стану та усі чисельні результати.
29. Бреславський Д.В. Вплив попередньої втомної пошкодженості на повзучість та довготривалу міцність елементів конструкцій// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.49. - С.36-39.
30. Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Исследование влияния асимметрии и частоты циклической нагрузки на повреждаемость пластин с октагональным вырезом// Вісник



Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.53. - С.20-24.

Автором запропоновано постановку задачі та виконані усі чисельні дослідження.

31. Бреславський Д.В., Морачковський О.К. Експериментальне дослідження циклічної повзучості круглих пластин.// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.56. - С.61-63.

Авторові належать усі експериментальні та чисельні результати.

32. Бреславський Д.В., Бурлаєнко В.Н., Морачковський О.К. Технологія теплового формообрання листових матеріалів в режимі динамічної повзучості// Вісник Харківського державного політехнічного університету. -Харків: ХДПУ. - 1999. - Вип.58. - С. 42-45.

Авторові належить метод розрахунку динамічної повзучості та усі чисельні результати.

33. Бреславський Д.В., Чупрынин А.А. Расчеты циклической ползучести и разрушения неосесимметричных оболочек вращения// Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Збірка наукових праць ХДПУ. Ч. 1. -Харків: Харк. держ. політехн. ун-т. - 1999. - Вип. 7.-С. 255-257.

Авторові належить метод розрахунку динамічної повзучості.

## АНОТАЦІЇ

**Бреславський Д.В.** Розробка методу розрахунку повзучості та довготривалої міцності циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. - Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1999.

Дисертацію присвячено розробці методу розрахунку повзучості та довготривалої міцності циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій. На підставі нового підходу в математичній теорії повзучості з застосуванням методу асимптотичних розкладів у двох масштабах у часі («повільному» та «швидкому») за малим параметром запропоновано математичні постановки початково-крайових задач циклічної повзучості для просторових та плоских об'єктів, тонких оболонок та пластин при згині. Створено та теоретично й експериментально обгрунтовано новий варіант рівнянь стану циклічної повзучості з урахуванням пошкодженості внаслідок дії механізмів повзучості та

багатоциклової втоми. Розроблено метод чисельного розв'язку задач циклічної повзучості при складному напруженому стані та чисельно й експериментально встановлені закономірності циклічної повзучості та руйнування конструктивних елементів машин.

**Ключові слова:** циклічна повзучість, довготривала міцність, втома, пошкодженість, пластини, оболонки, елементи машинобудівних конструкцій.

*Breslavsky D.V.* Development of the method for creep and durable strength calculations of cyclically loaded structural members. Manuscript.

Thesis for a doctor's degree by speciality 05.02.09 - dynamics and strength of machines. - Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1999.

The dissertation is devoted to the development of the method for creep and durable strength calculations of cyclically loaded structural members. By use of new approach in mathematical creep theory with applying of the method of asymptotic expansions in two time scales ('slow' and 'fast') the mathematical problem statement of boundary - initial value problems of cyclic creep for three- and two- dimensional objects, thin shells and plates in bending are suggested. The new variant of cyclic creep constitutive equations considering the creep - high cycle fatigue damage mechanisms is created and theoretically and experimentally justified. The method for numerical simulation of cyclic creep problems in the case of complex stress state is developed. The laws of cyclic creep and damage accumulation in structural members in machinery are numerically and experimentally established.

**Key words:** cyclic creep, durable strength, fatigue, damage, plates, shells, structural members in machinery.

*Бреславский Д.В.* Разработка метода расчета ползучести и длительной прочности циклически нагруженных элементов машиностроительных конструкций. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.09 - динамика и прочность машин. - Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1999.

Диссертация посвящена разработке метода расчета ползучести и длительной прочности циклически нагруженных элементов машиностроительных конструкций. В работе создан новый вариант уравнений состояния циклической ползучести с учетом повреждаемости вследствие действия механизмов ползучести и высокотемпературной

многоцикловой усталости. Обсуждено использование соответствующих инвариантов тензоров напряжений для описания накопления поврежденности при сложном напряженном состоянии, базовые эксперименты, которые необходимо провести для определения материальных постоянных.

Проведено термодинамическое обоснование определяющих уравнений, установлено их соответствие основным фундаментальным законам механики сплошных сред. Экспериментальное обоснование полученных уравнений выполнено путем сравнения численных результатов с данными ползучести и разрушения материалов при простом и сложном напряженном состоянии, как собственными, так и других авторов. Полученная при этом достаточно высокая степень адекватности позволяет рекомендовать разработанные методы для использования при анализе ползучести и длительной прочности элементов машиностроительных конструкций.

С использованием нового подхода в математической теории ползучести на основании метода асимптотических разложений в двух масштабах времени («медленном» и «быстром») по малому параметру предложены математические постановки начально-краевых задач циклической ползучести для трехмерных и плоских объектов, тонких оболочек и пластин при изгибе.

В качестве метода решения сформулированных задач выбран метод конечных элементов (МКЭ). На основе вариационной формулировки поставленных задач записана общая конечноэлементная постановка задачи ползучести, а также постановки задач при двумерном напряженном состоянии. В расчетах использовано 4 типа конечных элементов. Плоское напряженное состояние исследовано с помощью треугольного 3х узлового конечного элемента с 6 степенями свободы. Для пологих оболочек и пластин использован треугольник с 18 степенями свободы. Для оболочек вращения - элемент конической оболочки с 28 степенями свободы. В случае осевой симметрии задач использовался двухузловой элемент конической оболочки с 6 степенями свободы.

Для решения поставленных задач применены: метод прогноза-коррекции (интегрирование начальных задач), методы Холецкого и фронтальный - для решения СЛАУ, метод Якоби - для решения полной проблемы собственных значений. Для регуляризации численных решений на каждом шаге по времени применен метод сопряженной аппроксимации.

Предложенный метод решения задач циклической ползучести реализован в виде пакета прикладных программ, ориентированного на IBM-совместимые компьютеры.

Для исследования достоверности получаемых решений в работе проведены оценки сходимости решений задач; сравнения полученных численных данных с известными результатами экспериментального изучения циклической ползучести и разрушения титановых и стальных пластин при совместном действии растяжения и изгиба, образцов с острыми надрезами, лопаток ГТД.

В работе проведено экспериментальное исследование ползучести и разрушения циклически нагруженных образцов и пластин с надрезами и вырезами при растяжении и поперечном изгибе, для чего созданы две экспериментальные установки. Одна из них предназначена для испытаний образцов и моделей при высокотемпературном многоцикловом растяжении, вторая - для испытаний пластин при поперечном изгибе. Получены экспериментальные результаты по циклической ползучести и разрушению образцов из алюминиевых сплавов Д16АТ и АМГ6, пластин с надрезами, изгиба квадратных пластин - сплошных и с вырезами, круглых пластин с вырезом. Вполне удовлетворительное соответствие, полученное при сравнении численных и экспериментальных данных, позволило сделать вывод о достоверности полученных решений и метода в целом.

С его помощью проведено численное исследование циклической ползучести пластин и оболочек, что позволило выявить основные закономерности многоциклового деформирования и накопления повреждений при сложном напряженном состоянии. Выполнены исследования циклической ползучести и длительной прочности наиболее распространенных элементов машиностроительных конструкций: лопаток ГТД, труб установок жидкостного каталитического крекинга, оболочек твэлов, панелей летательных аппаратов. Разработаны теоретические основы технологического процесса формования панелей в режиме динамической ползучести.

**Ключевые слова:** циклическая ползучесть, длительная прочность, усталость, повреждаемость, пластины, оболочки, элементы машиностроительных конструкций.

Бреславський Дмитро Васильович

**Розробка методу розрахунку повзучості та довготривалої міцності  
циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій**

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Спеціальність 05.02.09 - динаміка та міцність машин

---

Підп. до друку 17.01.2000 р. Формат 60×84/16. Папір СоруРех.

Ум. друк. арк. 2.0. Тираж 120. Зам. 2-10.

---

Надруковано на ризографі ХДПУ.  
310002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.