

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Татарінова Оксана Андріївна

УДК 539.3

**РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ ЦИКЛІЧНО НАВАНТАЖЕНИХ
НЕОСЕСИМЕТРИЧНИХ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі систем і процесів управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бреславський Дмитро Васильович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
декан інженерно-фізичного факультету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Бородій Михайло Васильович,
Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка
НАН України, м. Київ,
провідний науковий співробітник
відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій
при криогенних температурах

кандидат технічних наук, доцент
Ромашов Юрій Володимирович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
доцент кафедри теоретичної механіки

Захист відбудеться «28» жовтня 2009 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « » вересня 2009 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.050.10

В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для конструктивних елементів сучасної техніки, які працюють в умовах сумісної дії статичних і циклічних навантажень, однією з важливих є проблема забезпечення довговічності. На час їхньої роботи при підвищених температурах істотно впливають незворотні деформації повзучості та накопичення пов'язаної з нею пошкоджуваності. Тонкі оболонки обертання є поширеним класом елементів конструкцій сучасної техніки, насамперед у космічному, авіаційному та енергетичному машинобудуванні, тому оцінка їхньої довговічності в умовах циклічного навантаження є необхідним завданням при проектуванні.

Розрахункові методи оцінювання довговічності та довготривалої міцності оболонкових конструктивних елементів створені в основному для випадку дії статичних навантажень. Разом з цим, процеси повзучості та накопичення пошкоджень в конструкціях в умовах циклічного навантаження залишаються мало вивченими, а створення відповідних розрахункових методів зберігає свою актуальність.

Конкретизація моделей для опису циклічної повзучості та пошкоджуваності при різних режимах навантаження відноситься до актуальних теоретичних питань проблеми забезпечення довговічності. Існують моделі динамічної повзучості, що не беруть до уваги частоту, але враховують асиметрію циклу навантаження, та які здатні адекватно відбити зростання швидкості деформацій повзучості і скорочення часу до руйнування. До теперішнього часу недостатньо опрацьовані моделі з визначальними рівняннями повзучості, які враховують вплив сумісної дії різних циклічних навантажень на довговічність матеріалів, та які є придатними для застосування при розрахунках елементів конструкцій.

Створення визначальних рівнянь, що забезпечують адекватний опис циклічної повзучості та пошкоджуваності, та розробка методу оцінювання довговічності тонкостінних оболонкових конструктивних елементів машин є актуальною задачею у сучасній динаміці та міцності машин й складає напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі систем і процесів управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») за держбюджетними темами МОН України: «Створення методів аналізу нелінійних динамічних процесів, біфуркацій та повзучості в тонкостінних конструкціях» (Д.Р. № 0103U001486, 2003-2005рр.); «Створення методів аналізу нелінійної динаміки і повзучості деформованих тіл та дискретних систем» (Д.Р. № 0106U001465, 2006-2008рр.), де здобувач була виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка розрахункового методу для оцінювання довговічності тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій різного призначення та виробів на технологічному обладнанні безперервного лиття, які експлуатуються за умов незворотного деформування при повзучості.

Для досягнення сформульованої мети в роботі поставлені наступні завдання:

- формулювання та обґрунтування рівнянь стану циклічної повзучості з урахуванням пошкоджуваності конструкційних матеріалів при простому та складному напруженому стані;

- створення методу та програмного забезпечення для розрахункового оцінювання довговічності за рівнем пошкоджуваності та часу до руйнування, ступенем незворотного формоутворення тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій при циклічному навантаженні;

- встановлення закономірностей впливу виду циклічного навантаження на показники довговічності тонкостінних елементів конструкцій у випадку малої частоти циклічного навантаження (менш 1Гц);

- отримання розрахункових даних з довговічності конструктивних елементів реактивних та газотурбінних двигунів;

- розповсюдження розробленого методу для оцінювання довговічності оболонкових елементів конструкцій на новий клас об'єктів при аналізі багатоциклової втоми конструктивних елементів сільськогосподарської техніки для забезпечення нормативного ресурсу;

- створення інженерної методики для вибору параметрів технологічного процесу з метою отримання мінімально пошкоджених внаслідок повзучості виробів на технологічному обладнанні безперервного лиття.

Об'єкт дослідження - тонкостінні неосесиметричні циклічно навантажені оболонкові елементи конструкцій.

Предмет дослідження - довговічність циклічно навантажених неосесиметричних оболонкових елементів конструкцій.

Методи дослідження. Всі основні теоретичні розробки дисертаційної роботи базуються на методах теорії тонких оболонок, теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності, а також асимптотичних методах для створення визначальних рівнянь циклічної повзучості, чисельних методах для розв'язання початково-крайових задач: методі скінчених елементів (МСЕ), методі Гауса для інтегрування за площиною елемента, методі Ньютона -Котеса - за товщиною елемента, методах прогнозу-корекції й Ейлера для інтегрування за часом, фронтальному методі й методі Холецького для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- уперше запропоновані теоретично й експериментально обґрунтовані рівняння стану циклічної повзучості з пошкоджуваністю конструкційних матеріалів;

- розроблено новий розрахунковий метод визначення довговічності за рівнем пошкоджуваності та часом до руйнування, ступеню незворотного формоутворення тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій при циклічному навантаженні;

- встановлено нові закономірності впливу коефіцієнту асиметрії та періоду циклу на показники довговічності тонкостінних елементів конструкцій у випадку малої частоти циклічного навантаження (менш 1Гц);

- одержано нові дані конструкційної міцності елементів сучасних машин: камер згоряння рідкісного ракетного двигуна (РРД) та газотурбінного двигуна (ГТД), за якими встановлені закономірності циклічної повзучості: інтенсифікацію чи уповільнення процесів повзучості при циклічному навантаженні з малою частотою; прискорення процесів незворотного деформування та пошкоджуваності при комбінованій дії статичного та циклічних навантажень з великим та малим періодами циклу; руйнування лише внаслідок дії механізмів пошкоджуваності внаслідок циклічної повзучості у жаровій трубі ГТД;

- створено нову інженерну методику вибору конструктивних параметрів елементів машин для забезпечення нормативного ресурсу за умов багатоциклової втоми;

- уперше визначені параметри технологічного процесу з метою отримання мінімально пошкоджених внаслідок повзучості бронзових заготовок на технологічному обладнанні безперервного лиття.

Практичне значення одержаних результатів. Створені при виконанні дисертаційної роботи метод та програмний комплекс розрахунку конструкційної міцності та довговічності тонкостінних неосесиметричних оболонкок обертання можуть бути застосованими при проектуванні сучасних елементів машин у енергетичному, аерокосмічному, хімічному, транспортному машинобудуванні.

Рекомендації щодо виготовлення мінімально пошкоджуваних бронзових заготовок за рахунок вибору параметрів технологічного процесу безперервного лиття використані у ВАТ «Енергопром» (м. Харків). Розрахункові оцінки втомної пошкоджуваності корпусних елементів жатки використані на підприємстві «Укр.Агро-Сервіс» (м. Харків) при проектуванні жаток.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що надані в дисертаційній роботі, здобувачем отримані самостійно. Серед них рівняння стану циклічної повзучості з пошкоджуваністю металевих матеріалів при малих частотах навантаження; математична постановка та метод розв'язання задачі циклічної повзучості тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій; отримані чисельні оцінки довговічності матеріалів та оболонкових конструкцій при циклічній повзучості; дані розрахункового аналізу втомної довговічності конструктивних елементів жаток; спрощена інженерна методика для визначення параметрів технологічного процесу безперервного лиття з урахуванням повзучості та пошкоджуваності матеріалу.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на: VIII міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні та комп'ютерні технології в народному господарстві» (м. Харків, 2003 р.), XII, XV, XVI міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2004 р., 2007-2008 рр.), XIV міжнародній науковій конференції вчених України, Білорусії, Росії «Прикладні завдання математики та механіки» (м. Севастополь, 2006 р.), науково-технічній конференції інженерно-фізичного факультету, присвяченої 120-річчю НТУ «ХП» і 45-річчю першого

пілотованого космічного польоту (м. Харків, 2006 р), 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні» (м. Київ, 2007 р.), 2-й Міжнародній конференції з нелінійної динаміки «Nonlinear Dynamics - 2007» (м. Харків, 2007 р.), 6-й міжвузівській науково-практичній конференції «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2007 р.). Робота в повному обсязі розглядалась та обговорювалась в НТУ «ХПІ» на семінарах кафедр динаміки та міцності машин й систем і процесів управління (2005-2008 рр.).

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових працях, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 153 сторінки, у тому числі 2 таблиці та 60 рисунків у тексті, 3 додатки на 3 сторінках, 127 найменувань використаних літературних джерел на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну цінність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні задачі досліджень, відзначено наукову новизну, теоретичне і практичне значення одержаних результатів, представлені дані про зв'язок роботи з науковими темами, наведено інформацію про апробацію роботи та публікації, особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз наукових праць за темою роботи – у напрямку опису поведінки матеріалів та конструкцій при циклічному навантаженні. Особливу увагу приділено випадку високотемпературного деформування, коли довговічність матеріалу визначається деформаціями повзучості та пов'язаного з нею накопичення пошкоджень.

Наголошується, що основний внесок у формулювання рівнянь стану та розвиток континуальної механіки пошкоджуваності внесли Ю. М. Работнов, Л. М. Качанов, Г. С. Писаренко, В. В. Болотін, М. В. Бородій, Ж. Відаль, Г. Гварнієрі, В. П. Голуб, Р. Д. Кемпбелл, А. Дж. Кеннеді, Л. Ф. Коффін, Д. Крайчинович, Б. Лазан, Дж. Леметр, А. М. Локощенко, С. С. Менсон, С. Мураками, Р. Отані, В. М. Руденко, В. О. Стрижало, С. Тайра, Т. М. Трет'яченко, В. Т. Трощенко, Ж. Л. Шабош, С. О. Шестеріков, А. Яковлюк та інші; у скінченноелементне моделювання процесів повзучості: Дж. Аргіріс, К. - Й. Бате, І. А. Біргер, Дж. Бойл, О. Зенкевич, М. М. Малінін, Д. Л. Маріотт, Дж. Т. Оден, Р. К. Пенні, А. М. Підгорний, К. М. Рудаков, Д. Спенс, Д. Хейхерст, Ю. М. Шевченко та інші; у аналіз нелінійної поведінки тонкостінних конструкцій: Х. Альтенбах, А. В. Бурлаков, А. С. Вольмир, О. З. Галішин, Е. І. Григолюк, Я. М. Григоренко, Г. І. Львов, О. К. Морачковський, К. В. Науменко, Ю. М. Шевченко та інші.

Відзначено, що для широко розповсюджених в сучасному космічному, авіаційному та енергетичному машинобудуванні тонкостінних оболонок обертання більшість розрахунків на довговічність та довготривалу міцність проводиться для умов статичного навантаження.

За результатами аналізу стану проблеми відмічено, що на теперішній час є практично відсутніми інженерні методи аналізу довговічності для найбільш типового випадку високотемпературного циклічного навантаження оболонкових конструкцій, коли початкові пластичні деформації є відсутніми.

Другий розділ присвячено побудові рівнянь стану циклічної повзучості та пошкоджуваності конструкційних матеріалів при простому та складному напруженому стані. Наведено дані з перевірки їхньої адекватності при описі повзучості та довготривалої міцності конструкційних матеріалів.

Розглядається комбіноване циклічне навантаження $\sigma = \sigma^0 + \sigma^1 + \sigma^2$ при одночасній дії постійного напруження σ^0 , напруження σ^1 , що змінюється із циклічною частотою за період робочого циклу T ($f_1 \ll 1$ Гц), та напруження σ^2 , що змінюється за гармонійним законом з частотою f_2 ($f_2 \ll 1$ Гц). Представляючи напруження σ^1 періодичним рядом Фур'є з коефіцієнтами a_k й b_k , для комбінованого навантаження закон циклічної зміни напруження вводиться в такому вигляді:

$$\sigma = \sigma^0 + \sigma^1 + \sigma^2 = \sigma^0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin \left(\frac{2\pi k}{T} t + \beta_k \right) + A \sin \left(\frac{2\pi}{T_2} t \right) \right), \quad (1)$$

де;

- коефіцієнти амплітуд в процесах динамічної та циклічної повзучості відповідно, $\sigma^0 \neq 0$; $\beta_k = \arctg(a_k/b_k)$.

Повзучість зразка, вирізаного з металевого матеріалу, вивчається у рамках загальних кінетичних залежностей теорії структурних параметрів, запропонованих Ю.М. Работновим. Рівняння стану повзучості при простому напруженому стані, приймаючи закон повзучості з пошкоджуваністю типу Бейлі-Нортон й Работнова-Качанова, мають вигляд:

$$\dot{\omega} = c(t) \omega^n, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = \omega_*, \quad (2)$$

де $c(t)$, $\omega(t)$ – незворотна деформація повзучості й параметр пошкоджуваності; B , D , n , r , k , l – матеріальні постійні, що визначені при заданій температурі T^0 за експериментальними кривими повзучості та довготривалої міцності матеріалу; ω_* – значення параметра пошкоджуваності в момент часу закінчення прихованого руйнування t_* .

Несумірність періодів основної та циклічної дії комбінованого навантаження дозволило для опису процесів циклічної повзучості й пов'язаної з нею пошкоджуваності застосувати методику асимптотичних розкладань й усереднення на періоді.

Приймаючи, що загальна тривалість процесу повзучості t_* перевершує величину періоду T циклічної складової напруження σ , введено у розгляд

малий параметр: $\mu = \frac{T}{t_*} \ll 1$ і два масштаби часу: t – час для основного процесу

повзучості циклічного навантаження; $\tau = \frac{t}{\mu}$ чи $\tau = \frac{t}{\mu}$ – час робочого циклу, що змінюється за період дії напруження, $0 \leq \xi \leq 1$.

Асимптотичне рішення шукається у вигляді розкладання за малим параметром так, що

$$c \cong c^0(t) + \mu c^1(\xi), \quad (3)$$

$$\omega \cong \omega^0(t) + \mu \omega^1(\xi), \quad (4)$$

де $c^0(t)$, $\omega^0(t)$, $c^1(\xi)$, $\omega^1(\xi)$ – функції, що відповідають основному процесу повзучості й пошкоджуваності в масштабі часу, що повільно змінюється, і періодично повторюваному процесу в масштабі часу ξ .

Для конкретизації визначальних рівнянь (2) спочатку розглядається дія статичної складової напруження й складової напруження, що повільно змінюється, при простому навантаженні: . Використовуючи техніку асимптотичних розкладань для рівнянь (2) і співвідношення (3), (4), після усереднення на періоді робочого циклу T при циклічному напруженні, отримано:

$$\dot{c} = B g_n \frac{\mathcal{G}^0 \bar{n}}{1 - \omega \bar{k}}, \quad g_n = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin 2\pi k \xi + \beta_k \right)^n d\xi, \quad (5)$$

$$\dot{\omega} = D g_r \frac{\mathcal{G}^0 \bar{r}}{1 - \omega \bar{r}}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = \omega_*, \quad g_r = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin 2\pi k \xi + \beta_k \right)^r d\xi. \quad (6)$$

Тут g_n , g_r – функції коефіцієнтів амплітуди циклічного навантаження.

Рівняння (5) і (6) приймаються як рівняння стану циклічної повзучості при дії статичної складової й складової напруження, що повільно змінюється:

Далі розглядається комбіноване просте навантаження $\sigma = \sigma^0 + \sigma^1 + \sigma^2$. Приймається, що рівняння стану в цьому випадку зберігають вид (5), (6). Тепер вже застосовуються до них асимптотичні розкладання (3), (4) з малим параметром μ_1 , і проводячи процедуру усереднення на періоді

, вдається остаточно одержати рівняння стану для основного процесу циклічної повзучості при комбінованому навантаженні:

$$\dot{c} = B g_n K_n \frac{\mathcal{G}^0 \bar{n}}{1 - \omega \bar{k}}, \quad \dot{\omega} = D g_r K_r \frac{\mathcal{G}^0 \bar{r}}{1 - \omega \bar{r}}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = \omega_*, \quad (7)$$

де $K_n = \int_0^1 \left(1 + A_n \sin 2\pi \xi \right)^{\bar{n}} d\xi$, $K_r = \int_0^1 \left(1 + A_r \sin 2\pi \xi \right)^{\bar{r}} d\xi$, $A_n = \frac{A}{g_n^{1/n}}$, $A_r = \frac{A}{g_r^{1/r}}$.

З рівнянь (7) витікають відомі рівняння стану динамічної повзучості при $g_n = 1$, якщо $M_k = 0$ для кожної гармоніки k . Якщо $A_n = 0$, $K_n = 1$ ці рівняння відповідають циклічній повзучості з полігармонійним навантаженням в межах циклу.

В роботі побудовані нові рівняння стану циклічній повзучості з полігармонійним навантаженням в межах циклу й одногармонійним навантаженням, що мають різні періоди циклу. Ці рівняння враховують вплив на деформації повзучості й параметр пошкоджуваності коефіцієнтів амплітудних напружень, що відповідають полігармонійному навантаженню в межах циклу й одногармонійному навантаженню за різні періоди циклів. Отримані рівняння стану дозволяють здійснити математичний опис нелінійного деформування матеріалу при сумісній дії статичних і циклічних складових навантаження.

Рівняння стану (7) узагальнено на випадок складного напруженого стану, виходячи із традиційного для теорії повзучості постулату відповідності співвідношень між величинами напружень і швидкостей деформацій при простому напруженому стані й еквівалентних напруженнях - при складному. Для циклічної й динамічної повзучості прийняття інтенсивностей напружень Мізеса як еквівалентних напружень підтверджується при складному напруженому стані дослідними даними С. Тайри й Р. Отані та іншими. Разом з тим, у кінетичних рівняннях для параметра пошкоджуваності, що відповідають кривим довготривалої міцності використовуються еквівалентні напруження, які відповідають критерію довготривалої міцності типу Писаренка-Лебедева.

Для визначення вірогідності запропонованих у роботі рівнянь стану циклічної повзучості й пов'язаного з нею накопичення пошкоджуваності проведено перевірку рівнянь (7) на експериментальних даних, отриманих різними вченими. Розглянуті дані з сплавів АМг6, N 155, S 321, титану RC-130-A, інконелю «X», титану RS50 в робочому діапазоні температур с різним рівнем напружень та використанням постійного та змінного навантажень.

На рис.1 наведено залежність деформації від температури для титану RC-130-A, на якому криві 1 та 3 відповідають даним при статичному навантаженні під дією напруження $\sigma=281$ МПа й $\sigma=211$ МПа відповідно, а криві 2 й 4 - при циклічному навантаженні під дією цих же напружень.

Рис.2 побудований за даними цих же експериментів, при досягненні у різних дослідах рівної деформації повзучості 1%. Крива 1 - дані, отримані при циклічному навантаженні, крива 2 – при статичному. Точками позначені експериментальні дані. Розбіжності чисельних та експериментальних результатів для усіх дослідів не перевищують 10%. Знайдено, що для титану розглянуте циклічне навантаження зменшує швидкість повзучості, отже, збільшує час до руйнування.

Рис. 1. Криві циклічної повзучості титану RC-130-A при 698 К

Рис. 2. Залежність напружень від часу для титану RC-130-A при 698 К при досягнутій деформації 1%

Експериментальна перевірка отриманих рівнянь виявила достатній ступінь їхньої адекватності, що дозволяє рекомендувати отримані рівняння стану для використання при аналізі довготривалої міцності елементів машинобудівних конструкцій. Максимальна похибка при описі кривих циклічної повзучості дорівнює 7-10%, пошкодженості внаслідок повзучості 2-5%.

На основі аналізу відомих експериментальних даних та їхньої обробки у розділі встановлено, що визначити факт інтенсифікації чи уповільнення процесів повзучості та руйнування при циклічному навантаженні з малою частотою можливо тільки після відповідних розрахунків за отриманими формулами (7), а якісну оцінку, як у випадку динамічної повзучості, без розрахунків зробити неможливо.

У третьому розділі запропоновано розрахунковий метод для оцінювання довговічності циклічно навантажених тонкостінних оболонкових елементів конструкцій. Сформульовано загальну математичну та скінчено-елементну постановку задач циклічної повзучості тіл за умов дії зовнішнього навантаження зі сталою й циклічно змінюваними складовими. Надані алгоритми розрахунків та програмне забезпечення, розглянуті результати досліджень з достовірності обчислювальних даних, які отримані за створеним методом та програмним забезпеченням.

Розглянуто загальну математичну постановку початково-крайової задачі повзучості тіла об'ємом V , закріпленого на частині поверхні S_1 , та яке навантажено поверхневими силами p_i на частині поверхні S_2 та об'ємними силами f_i . Зовнішні об'ємні сили залишаються незмінюваними у часі - $f = f(x)$, $x \in V$, а поверхневі сили, що діють на тіло, мають постійну у часі -

та змінну впродовж циклу складові навантаження: $p_i = p_i^{(0)} + \Phi_i(t)$, $x \in S_2$, ,
де p_i^{max} , p_i^a - амплітуди відповідних компонент поверхневих навантажень;
;

Враховуючи сформульовані вище припущення, математичну постановку початково-крайової задачі повзучості тіла представлено системою рівнянь:

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} + c_{ij}, \sigma_{ij,j} + f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j}) \quad x_i \in V; \quad (8)$$

де n - одинична зовнішня нормаль до границі тіла, $j=1,2,3\{D\}$ - тензор пружних властивостей матеріалу; u_i - відомі значення переміщень точок поверхні S_1 , що не змінюються за часом.

Асимптотичні розкладання та усереднення на періоді дозволили розділити систему (8) на дві: перша виникає зі співвідношень, що залишаються після усереднення, та описує процеси, що відбуваються у повільному основному русі; друга одержується, віднімаючи з (8) першу систему.

Таким чином, для визначення напружено-деформованого стану тіл при циклічній повзучості за умов комбінованого циклічного навантаження розв'язується наступна система рівнянь, в якій усі невідомі змінюються у масштабі повільного часу:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + f_i &= 0 & \sigma_{ij} n_j &= p_i, & ; \\ \varepsilon_{ij} &= C_{ijkl} \sigma_{kl} + c_{ij}, & \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j}) \\ u_i &= \bar{u}_i, & u_i(x_i, 0) &= c_{ij}(x_i, 0) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

а рівняння стану приймаються відповідними до (7) у виді:

$$\dot{c}_{ij} = B g_n K_n \frac{3 \sigma_i^{\bar{n}-1}}{2 (1 - \omega)^{\bar{k}}} S_{ij}; \quad \dot{\omega} = D g_r K_r \frac{\sigma_e^{\bar{r}}}{(1 - \omega)^{\bar{r}}}, \quad \omega(0) = \omega_0, \quad \omega(t_*) = 1; \quad (10)$$

де σ_i – максимальне нормальне напруження та компоненти девіатора тензора напружень σ_{ij} ; α - параметр чутливості матеріалу до виду руйнування (крихке $\alpha=1$, в'язке $\alpha=0$ і змішане $0 < \alpha < 1$);

$$\begin{aligned} g_n &= \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin \pi k \xi + \beta_k \right)^n d\xi, & g_r &= \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin \pi k \xi + \beta_k \right)^r d\xi, & M_k &= \frac{\sigma_e^{ak}}{\sigma_e^0}, \\ K_n &= \int_0^1 (1 + A_n \sin \pi \xi)^{\bar{n}} d\xi, & K_r &= \int_0^1 (1 + A_r \sin \pi \xi)^{\bar{r}} d\xi, & A_n &= \frac{A}{g_n^{1/n}}, & A_r &= \frac{A}{g_r^{1/r}}, & A &= \frac{\sigma_e^a}{\sigma_e^0}, \end{aligned}$$

– компоненти девіаторів тензорів амплітудних напружень, відповідно.

Для визначення коефіцієнтів A та M_k , які використовуються в функціях g_n та K_n , попередньо обчислюються еквівалентні напруження, при $\alpha=0$.

Для конкретизації рівнянь (10) попередньо визначаються компоненти тензорів амплітудних напружень за розв'язанням наступних крайових задач у масштабі швидкого часу ($k=1, 2, \dots$):

$$\sigma_{ij,j}^{ak} = -\rho \Omega_k^2 u_i^{ak}, \quad x_i \in V; \quad \sigma_{ij}^{ak} n_j = p_i^{\max} A_k, \quad x_i \in S_2; \quad (11)$$

$$\varepsilon_{ij}^{ak} = \frac{1}{2} (u_{i,j}^{ak} + u_{j,i}^{ak}) = C_{ijmn} \sigma_{mn}^{ak}, \quad x_i \in V; \quad u_i^{ak} = 0, \quad x_i \in S_1;$$

$$\sigma_{ij,j}^a = -\rho \Omega^2 u_i^a, \quad x_i \in V; \quad \sigma_{ij}^a n_j = p_i^a, \quad x_i \in S_2; \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ij}^a = \frac{1}{2} (u_{i,j}^a + u_{j,i}^a) = C_{ijmn} \sigma_{mn}^a, \quad x_i \in V; \quad u_i^a = 0, \quad x_i \in S_1.$$

Розв'язуванням систем (11), (12) для кожної гармоніки k знаходяться компоненти тензорів амплітудних напружень, за якими остаточно визначаються коефіцієнти $M_k, g_n, g_r, A, A_n, K_n, K_r$, що конкретизують рівняння стану циклічної повзучості (10).

Основні кінематичні та статичні рівняння теорії тонких оболонок сформульовано в роботі на основі гіпотез Кирхгофа-Лява. Далі в цьому розділі розглядається циклічна повзучість тонкої конічної оболонки обертання при неосесиметричному напружено-деформованому стані. Отримані при цьому співвідношення використовуються для подальшого застосування МСЕ з елементом у вигляді конічної оболонки.

Геометричні залежності довільної конічної оболонки записуються у вигляді:

$$\begin{matrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{22} \end{matrix}; \begin{matrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{22} \end{matrix}, \quad (13)$$

де $(\epsilon_{11}, \epsilon_{12}, \epsilon_{22})^T$ - вектор повних деформацій оболонки; де γ_{ij} - деформації в серединній поверхні, $i, j=1,2$.

Параметри зміни кривизн $(\kappa_{11}, \kappa_{12}, \kappa_{22})^T$ в обраних напрямках серединної поверхні b, ϕ й z обчислюються за формулами:

$$\kappa_{11} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial b^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \phi^2} \right)$$

$$\kappa_{12} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial b \partial \phi}$$

$$\kappa_{22} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial b^2} \right)$$

де u, v, w – компоненти вектора переміщень; θ – кут між твірною й віссю обертання; r – відстань від осі обертання до серединної поверхні оболонки.

Повний вектор деформацій в серединній поверхні має лінійну та нелінійну складові $\epsilon_{11} = \epsilon_{11}^l + \epsilon_{11}^n$, $\epsilon_{12} = \epsilon_{12}^l + \epsilon_{12}^n$, $\epsilon_{22} = \epsilon_{22}^l + \epsilon_{22}^n$, де

$$\cdot$$

Приймаючи, що в умовах повзучості повні деформації в точці оболонки складаються з пружних e_{ij} і незворотних c_{ij} деформацій $\epsilon_{ij} = e_{ij} + c_{ij}$ ($i, j=1,2$), рівняння зв'язку напружень з деформаціями мають вигляд:

$$\begin{matrix} N_{11} \\ N_{12} \\ N_{22} \end{matrix}; \begin{matrix} M_{11} \\ M_{12} \\ M_{22} \end{matrix}; \begin{matrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{matrix}; \quad (14)$$

де $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{12}$ – компоненти вектора напружень, що характеризує напружений стан оболонки; c_{11}, c_{22}, c_{12} – незворотні деформації повзучості; E, G – модулі пружності та зсуву матеріалу; ν - коефіцієнт Пуассона.

Рівняння рівноваги елемента оболонки:

$$\begin{matrix} N_{11} \\ N_{12} \\ N_{22} \end{matrix}; \begin{matrix} M_{11} \\ M_{12} \\ M_{22} \end{matrix}; \begin{matrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{matrix}; \quad (15)$$

$$\begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix}; \quad (15)$$

$$\begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix};$$

де N_{ij} - мембранні сили; M_{ij} - моменти згину та крутіння; Q_i – перерізуюча сила; p_1, p_2, p_3 – компоненти вектору навантаження;

Таким чином, рівняння (13) – (15) представляють повну систему рівнянь задачі визначення напружено-деформованого стану конічної оболонки в умовах повзучості.

Компоненти вектору деформацій повзучості у співвідношенні (14) визначаються за сформульованими у другому розділі рівняннями стану статичної чи циклічної повзучості (10).

Далі, у зв'язку з використанням МСЕ, на основі функціоналу типу Лагранжа сформульовано варіаційну постановку задачі

$$\delta \Pi = 0, \quad (16)$$

де δu_i - варіації компонент повних деформацій серединної поверхні оболонки;
 $\delta \kappa_i$ - варіації компонент зміни кривизни; δv_i - варіації компонент дійсного вектору переміщення, $q=1,2,3$; δ_{ij} - символ Кронекера;

$$\begin{aligned} & ; \\ & ; \\ & ; \\ & ; \\ & ; \end{aligned}$$

Прийнято, що оболонку обертання з довільною твірною при неосесиметричному напружено-деформованому стані розбито на скінчені елементи, які утворені двома поперечними перерізами та двома перерізами, що проходять через вісь обертання конічної оболонки. Схематично цей елемент зображено на рис.3.

Функції, які апроксимують поле переміщень в точці скінченого елемента, мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} & ; \\ & ; \end{aligned}$$

де u_i та v_i – відносні переміщення локальних координат вільної точки елемента (r, z) .

Рис. 3. Двовірний конічний елемент

У зв'язку з тим, що кожна вузлова точка має сім ступенів свободи, до вектору вузлових переміщень входять наступні члени:

Використання МСЕ дозволяє варіаційну рівність (16) звести до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР)

$$K \bar{\Delta} = P^v + P^c + P^p + P^n, \quad (17)$$

де $[K]$ – глобальна матриця жорсткості; $\{P^v\}$ – узагальнений вектор зовнішніх вузлових сил, ; $\{P^c\}$ – узагальнений вектор вузлових сил, обумовлений незворотними деформаціями повзучості, , $\{P^p\}$ – узагальнений вектор вузлових зусиль від проекції узагальнених сил на нормаль, ; $\{P^n\}$ – узагальнений вектор вузлових зусиль, обумовлений нелінійною складовою пружних деформацій, .

Значення компонентів вектору вузлових навантажень обчислюються чисельно, використовуючи n – точкову формулу Гауса.

Система рівнянь (17) доповнюється рівняннями стану (10), які описують процеси повзучості матеріалу та зв'язаного з нею накопичення пошкоджуваності.

Для визначення амплітудних значень компонентів напружено-деформованого стану для кожної гармоніки, які необхідні для знаходження коефіцієнтів в рівняннях (10), попередньо розв'язуються системи рівнянь (11), (12). Їхнє скінчено-елементне формулювання має вид:

$$K \bar{\Omega}_k M \bar{\Delta}^{ak} = P^{ak} ; K \bar{\Omega}^2 M \bar{\Delta}^a = P^a, \quad (18)$$

де $[M]$ – матриця мас системи, $M = \sum_e \int_{S^e} \Phi^T \rho \Phi dS$; Ω_k, Ω – частоти зовнішнього

навантаження та P^{ak}, P^a - вектори амплітудних значень при полігармонійному навантаженні в межах циклу й вимушених коливаннях відповідно.

Для розв'язку систем (17), (18) використовується метод Холецького. Задача вимушених коливань розв'язується фронтальним методом.

Таким чином, у роботі для аналізу процесів циклічної повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності в оболонкових конструкційних елементах використовується система (17). За її розв'язком для будь-якого моменту часу можна визначити вектор вузлових переміщень, а за ним - значення деформацій, силових факторів та параметру пошкоджуваності у скінчених елементах. Значення компонентів вектору деформацій повзучості $\{c\}$ та параметру пошкоджуваності для кожного кроку інтегрування визначається інтегруванням диференціальних рівнянь (10) методом прогнозу-корекції третього порядку.

При досягненні параметром пошкоджуваності його критичного значення ($\omega_* \leq 1$) вважаємо процес прихованого руйнування закінченим. Цим часом у постановці, що використовується у роботі, й визначається довговічність конструкції чи її окремого елемента. Місце виникнення першої макротріщини визначається місцем розташування скінченого елемента, в якому параметр пошкоджуваності досяг свого критичного значення.

За описаним вище алгоритмом розроблено інтегроване програмне середовище для розв'язання задач циклічної повзучості оболонкових конструкцій.

З метою отримання даних з достовірності розрахункового методу розв'язано низку тестових прикладів: пружне деформування циліндричної оболонки під дією кільцевого навантаження, під дією внутрішнього тиску, повзучість циліндричних оболонок з різними типами граничних умов. На рис.4 – 5 наведено дані з повзучості циліндричної оболонки з жорстко закріпленим та вільним краями. Тут крива 1 відповідає даним, отриманим в момент часу $t=0$, крива 2 – даним, отриманим в момент завершення прихованого руйнування $t=t_*$. Точками надано дані роботи ¹.

Рис. 4. Нормальний прогин циліндричної оболонки

Рис. 5. Зміна параметру пошкоджуваності в точці оболонки, де завершується приховане руйнування

Співставлення результатів показало добру узгодженість розв'язків розглянутих задач. В задачах пружного деформування значення прогинів, мембранних сил та моментів визначаються з точністю 2-3%, в задачах повзучості значення прогинів та часу до руйнування - з точністю 5-10%, що є достатнім для моделювання. Таким чином, розроблений програмний комплекс може бути рекомендовано для розрахунків повзучості та довговічності тонкостінних оболонкових конструкцій.

У четвертому розділі наведено результати дослідження прикладних задач конструкційної міцності та довговічності циклічно навантажених елементів конструкцій на базі розробленого програмного забезпечення. На прикладах високотемпературного деформування оболонкових конструкцій, що застосовуються в авіа- та ракетобудуванні, показано важливість урахування циклічності навантаження при аналізі циклічної довговічності.

Розглянуто результати моделювання циклічної повзучості камери згорання рідкісного ракетного двигуна. В результаті розрахунків визначено напружено-деформований стан серединної поверхні камери згорання, що знаходиться в умовах динамічної повзучості. Запропоновано методику розрахункових досліджень з точним визначенням площі критичних перерізів сопел ракетних двигунів, яка є необхідною при проектуванні таких конструктивних елементів.

¹ Бурлаков А.В. Ползучесть тонких оболочек. / А.В. Бурлаков, Г.И. Львов, О.К. Морачковский. - Харьков: ХГУ, 1977. - 123 с.

Результати виконаних в роботі чисельних досліджень циклічної повзучості жарової труби двигуна АІ-20 дозволили виявити основні закономірності її деформування та накопичення пошкоджень при складному напруженому стані.

За допомогою розробленого програмного комплексу жарова труба, що розглядається, змодельована комбінацією циліндричних та конічних оболонок.

На рис. 6 представлено її скінченноелементне розбиття. Для розрахунків використано сітку з 650 елементів.

Рис. 6. Скінченноелементна модель жарової труби двигуна АІ-20

Рис. 7. Типовий польотний цикл

До моделювання залучено дані з повзучості сталі ЕІ437Б : $B=1.31 \times 10^{-6}$ МПа⁻ⁿ/год., $n=k=4.12$, $D=2.08 \times 10^{-5}$ МПа^{-r}/год., $r=l=4.5$. Довжина оболонки 2 м, початковий діаметр зони горіння 0.4 м, кут конусності 37°, діаметр циліндричної частини первинної зони – 0.8 м; кут конусності 7°, діаметр вихідної частини вторинної зони 0.7 м. Товщина стінок дорівнює 0.001 м.

Розподіл тиску в камерах згорання сучасних літальних апаратів, якісно відповідає формі циклу, яка наведена на рис.7. При роботі двигуна також можуть виникнути вібрації стінок жарових труб внаслідок динамічних впливів інших складових частин та впливу газового потоку, що діє на стінки цих труб.

Отже, для розрахунків напружено-деформованого стану та довговічності жарової труби ГТД в умовах повзучості розглядається сумісна дія статичного навантаження, навантаження, що змінюється за формою циклу, наведеного на рис.7, та навантаження від вібрації стінок труби у первинній зоні горіння.

Проведені розрахунки на довготривалу міцність та знайдено час до руйнування жарової труби, який склав 660 годин.

Результати наведені на рис. 8 – 11. На рис. 8 зображено розподіл нормального прогину вздовж жарової труби. Крива 1 містить дані, отримані в початковий момент часу, крива 2 – дані, отримані для моменту закінчення прихованого руйнування. На рис.9 наведено розподіл повздовжньої сили, де крива 1 відповідає пружному деформуванню, а крива 2 – стану на момент 660 годин. На рис.10, 11 наведено розподіл параметру пошкоджуваності на зовнішній поверхні жарової труби двигуна для моменту 10 годин та в момент руйнування відповідно.

Рис.8. Розподіл нормального прогину
вздовж жарової труби

Рис.9. Розподіл повздовжньої сили

Рис. 10. Розподіл параметру
пошкоджуваності на зовнішній
поверхні жарової труби двигуна через
10 годин

Рис. 11. Розподіл параметру
пошкоджуваності на зовнішній
поверхні жарової труби двигуна в
момент руйнування

Таким чином, в результаті чисельного моделювання задачі циклічної повзучості визначені параметри довговічності жарової труби ГТД та місце, де відбувається руйнування – зона горіння (рис.11). Аналіз розподілу параметру пошкоджуваності показує, що в оболонковій конструкції є інша зона з його досить великими значеннями – область переходу між первинною та вторинною зонами ($\omega = 0.58 - 0.65$). При зміні деяких конструктивних параметрів та величин, що характеризують навантаження, дуже ймовірним є виникнення макротріщини й в цьому місці.

В роботі також створено інженерну методику для вибору параметрів технологічного процесу з метою отримання мінімально пошкоджених внаслідок повзучості бронзових заготовок на технологічному обладнанні безперервного лиття.

Згідно з умовами технологічного процесу, заготовки циклічно навантажені силами витягування. Час руху визначається швидкістю витягування заготовки. В умовах реального виробництва, коли часто необхідно переналагоджувати обладнання, необхідною є наявність спрощених методик. Побудова такої методики у даному випадку можлива завдяки тому, що при попередніх розрахунках з використанням двовимірних моделей було встановлено, що характер напруженого стану в заготовці близький до однорідного. У зв'язку з цим розглянуто аналіз пошкоджуваності в заготовках з використанням одновимірних моделей.

В роботі розглянуті різні режими навантаження, для кожного з яких отримані свої функції асиметрії циклу напружень, які використані в рівняннях (7) для розрахункового аналізу полів пошкоджуваності, набутих внаслідок високотемпературної повзучості заготовок. За допомогою цієї методики знайдені оптимальні характеристики циклів, при яких досягається найменший рівень пошкоджуваності заготовки.

Продемонстровано можливість залучення розроблених у роботі методів розрахунку для моделювання інших за фізичною природою, але подібних за математичним виглядом рівнянь стану процесів багатоциклової втоми у конструктивних елементах сучасної сільськогосподарської техніки. Встановлено небезпечні рівні навантаження та надано рекомендації щодо зміни конструктивних параметрів для забезпечення нормативного ресурсу за умов багатоциклової втоми.

Результати досліджень, висновки та рекомендації використовувалися: при проектуванні нової техніки на підприємстві «Укр.Агро-Сервіс» та при проектуванні технологічного процесу безперервного лиття бронзових заготовок у ВАТ «Енергопром».

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-практичної задачі динаміки та міцності машин щодо оцінювання довговічності тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій, які експлуатуються при циклічному навантаженні. Основні наукові, практичні результати виконаних досліджень є наступними.

1. Запропоновані нові рівняння стану та кінетичні рівняння для параметру пошкоджуваності циклічної повзучості матеріалів при простому та складному напруженому стані. Проведено їхню верифікацію шляхом порівняння розрахункових даних з відомими експериментальними результатами, що отримані іншими авторами, та встановлено необхідну ступінь достовірності.

2. Надано розвиток методів аналізу конструкційної міцності та довговічності в динаміці та міцності машин за рахунок створення розрахункового методу для оцінювання довговічності неосесиметричних тонких оболонкових елементів машин, що експлуатуються при циклічному навантаженні в умовах повзучості.

3. Сформульовано узагальнену математичну та скінченноелементну постановку задачі циклічної повзучості тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій, створено метод та програмний комплекс для оцінювання показників їхньої довговічності. Виконані дослідження з достовірності результатів, які одержані із застосуванням програмного комплексу. Встановлено високу ступінь достовірності розрахункових результатів при їхньому порівнянні з відомими чисельними та аналітичними даними інших авторів.

4. Встановлені закономірності циклічної повзучості та руйнування матеріалів при простому напруженому стані та неосесиметричних оболонкових конструкцій при складному напруженому стані: інтенсифікацію чи уповільнення процесів повзучості при циклічному навантаженні з малою частотою; прискорення процесів незворотного деформування та пошкоджуваності при комбінованій дії статичного та циклічних навантажень з великим та малим періодами циклу; руйнування лише внаслідок дії механізмів пошкоджуваності внаслідок циклічної повзучості у жаровій трубі ГТД.

5. Розроблений метод для оцінювання довговічності оболонкових елементів конструкцій поширено для його застосування при аналізі багатоциклової втоми конструктивних елементів машинобудівної техніки. Встановлено небезпечні рівні навантаження та надано рекомендації щодо зміни конструктивних параметрів кришки та шнеку жатки.

6. Створено інженерну методику для вибору параметрів технологічного процесу з метою отримання мінімально пошкоджених внаслідок повзучості бронзових заготовок на технологічному обладнанні безперервного лиття, за допомогою якої знайдені оптимальні характеристики циклів навантаження силами витягування, при яких досягається найменший рівень пошкоджуваності заготовки.

7. Результати досліджень, висновки та рекомендації використовувані: при проектуванні нової техніки на підприємстві «Укр.Агро-Сервіс» та при проектуванні технологічного процесу безперервного лиття бронзових заготовок у ВАТ «Енергопром».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Уварова О. А. (Татарінова О.А.) Метод асимптотических разложений в задачах мало- и многоциклового ползучести материалов. / Д. В. Бреславский, О.К. Морачковский, О.А. Уварова // Вісник НТУ «ХПІ» - Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 19. – С. 23 – 32.

Здобувачем розроблено метод отримання усереднених рівнянь.

2. Татарінова О. А. Аналіз деформацій і напружень ретчетінгу при багатоцикловому деформуванні залізничних рейок./ Д. В. Бреславський, О.К. Морачковський, О. А. Татарінова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – №21. - С. 29-36.

Здовучачем виконано постановку задачі, створено метод розрахунку та проведено моделювання циклічного деформування.

3. Татарінова О.А. Уравнения состояния циклической ползучести бронзовых сплавов. / Д.В. Бреславский, О.М. Хорошилов, О.А. Татарінова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, НТУ «ХПІ», 2007. – № 38. – С. 36-41.

Здобувачем запропоновані рівняння стану циклічної повзучості бронзових заготовок та виконані розрахунки.

4. Татарінова О. А. Высокотемпературная ползучесть и длительная прочность элементов конструкций при циклическом нагружении./ Д.В. Бреславский, О.К. Морачковский, О.А. Татарінова // Проблемы прочности. – Киев, 2008. – № 5. – С.45-53.

Здобувачем розроблено метод щодо розв'язування задач повзучості та пошкоджуваності елементів конструкцій при циклічному навантаженні.

5. Татарінова О. А. Анализ повреждаемости бронзовых заготовок, получаемых в процессах непрерывного литья. / Д. В. Бреславский, Ю.М. Корытко, О.А. Татарінова, О.Н. Хорошилов // Механика и машиностроение. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2008. - №1. - С. 234 – 243.

Здобувачем виконано моделювання повзучості та довготривалої міцності бронзових заготовок за допомогою нових рівнянь стану циклічної повзучості з

урахуванням пошкоджуваності.

6. Уварова О. А. Ползучесть элементов конструкций при статическом и циклическом нагружении./ Д. В. Бреславський, Д. В. Карабут, Н. В. Ширяева, О. А. Уварова // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 8-й Международной научно-технической конференции, 9-10 декабря 2003г. – Харьков, ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 299-302

Здобувач виконала чисельні розрахунки на циклічну повзучість елементів конструкцій.

7. Татарина О.А. Моделирование процессов ползучести и разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении. / Д.В. Бреславский, Е.А. Бреславская, Д.В. Карабут, О.А. Татарина, А.А. Чупрынин // Прикладні завдання математики та механіки: Матеріали XIV міжнар. наук. конф. вчених України, Білорусії, Росії, м. Севастополь, 11-15 вересня 2006р. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2006.- С.55 – 56.

Здобувачем проведено моделювання задач повзучості елементів конструкцій при циклічному навантаженні.

8. Татарінова О.А. Циклічне деформування залізничних рейок. / О.А. Татарінова // Тези доповідей науково-технічної конференції інженерно-фізичного факультету, присвяченої 120-річчю НТУ «ХПІ» і 45-річчю першого пілотованого космічного польоту. – Харків, 2006. – с.53-54.

Здобувачем створено метод та виконані чисельні розрахунки задачі циклічного деформування залізничних рейок.

9. Татарина О.А. Высокотемпературная ползучесть и длительная прочность элементов конструкций при циклическом нагружении./ Д.В. Бреславский, Д.В. Карабут, О.А. Татарина // Проблемы динамики і міцності в газотурбобудуванні: Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ: Ін-т проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2007. - С. 33-34.

Здобувач виконала чисельні розрахунки на циклічну повзучість камери згоряння РРД.

10. Tatarinova O. Software and numerical simulation of cyclic 2D creep-damage problems./ D.Breslavsky, A.Chuprynin, Yu.Korytko, O.Tatarinova.// Труды 2й Международной конференции по нелинейной динамике. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2007. – С. 45-48.

Здобувач розробила алгоритм та програму щодо розв'язання задач циклічної повзучості та руйнування тонкостінних елементів конструкцій.

11. Татарина О. А. Прогнозирование аварийных ситуаций при высоких температурах в циклически нагруженных тонкостенных конструкциях./ Д. В. Бреславский , В. Н. Конкин, О. А. Татарина , А. А. Чупрынин // Матеріали 6-ї міжвузівської науково-практичної конференції «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій». - Харків: Ун-т цивільного захисту України, 2007. – С.6.

Здобувачем виконані чисельні розрахунки циклічно навантажених тонкостінних елементів конструкцій при високих температурах.

АНОТАЦІЇ

Татарінова О. А. Розробка розрахункового методу оцінювання довговічності циклічно навантажених неосесиметричних тонкостінних елементів конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

Роботу присвячено розробці розрахункового методу для оцінювання довговічності циклічно навантажених тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій, які експлуатуються за умов незворотного деформування при повзучості.

Запропоновані нові рівняння стану циклічної повзучості матеріалів при простому та складному напруженому стані. Сформульовано узагальнену математичну та скінченноелементну постановку задачі циклічної повзучості тонкостінних неосесиметричних оболонкових конструкцій, створено метод та програмний комплекс для оцінювання показників їхньої довговічності.

Визначено довговічність та встановлені закономірності циклічної повзучості й руйнування матеріалів та неосесиметричних оболонкових конструкцій.

Результати досліджень, висновки та рекомендації використовувалися при проектуванні нової техніки на підприємстві «Укр.Агро-Сервіс» та при проектуванні технологічного процесу безперервного лиття бронзових заготовок у ВАТ «Енергопром».

Ключові слова: довговічність, конструкційна міцність, циклічне навантаження, асимптотичні розкладання, циклічна повзучість, пошкоджуваність, тонкостінні оболонкові елементи конструкцій.

Татарінова О.А. Разработка расчетного метода оценивания долговечности циклически нагруженных неосесимметричных тонкостенных элементов конструкций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2009.

Диссертационная работа посвящена разработке расчетного метода для оценивания долговечности тонкостенных неосесимметричных оболочечных конструкций и расчетным оценкам долговечности циклически нагруженных элементов авиационной и машиностроительной техники, эксплуатирующихся в условиях необратимого деформирования при ползучести.

Предложены новые уравнения состояния и кинетическое уравнение для параметра повреждаемости циклической ползучести при простом и сложном напряженном состоянии. Проведена их верификация путем сравнения расчетных данных с известными экспериментальными результатами, полученными другими авторами.

Сформулирована общая математическая и конечноэлементная постановки задачи циклической ползучести тонкостенных неосесимметричных оболочечных конструкций, создан метод и программный комплекс для оценивания показателей их долговечности.

Выполнены исследования по достоверности результатов, полученных с помощью программного комплекса. Установлена высокая степень достоверности расчетных результатов при их сравнении с известными аналитическими и численными данными других авторов.

Установлены закономерности циклической ползучести и разрушения материалов при простом напряженном состоянии и неосесимметричных оболочечных конструкций при сложном напряженном состоянии: интенсификация или замедление процессов ползучести при циклическом нагружении с малой частотой; ускорение процессов необратимого деформирования и повреждаемости при комбинированном действии статического и циклических нагружений с разными периодами циклов; разрушение только вследствие циклической ползучести в жаровой трубе ГТД.

Создана инженерная методика для выбора параметров технологического процесса с целью получения минимально поврежденных вследствие ползучести бронзовых заготовок на технологическом оборудовании непрерывного литья.

Модифицирован разработанный метод для его применения при анализе многоциклового усталости конструктивных элементов жатки – крышки и шнека. Установлены опасные уровни нагружения и даны рекомендации по изменению конструктивных параметров.

Ключевые слова: долговечность, конструкционная прочность, циклическое нагружение, асимптотические разложения, циклическая ползучесть, повреждаемость, тонкостенные оболочечные элементы конструкций.

Tatarinova O.A. – Manuscript. Development of the numerical method for estimation of durability of cyclically loaded non-symmetric thin-walled structural members.

Thesis for a candidate of technical sciences degree by the speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkiv, 2009.

The dissertation is devoted to the development of the numerical method for estimation of durability of cyclically loaded non-symmetric thin-walled structural members, which are working under conditions of irreversible creep deformation.

The new constitutive equations for cyclic creep in materials under uniaxial and complex stress states are proposed. The generalized mathematical and finite element problem statements for cyclic creep problem of thin-walled non-symmetric shell structures were formulated, the method of simulation and software for the evaluation of durability's characteristics were developed.

The service life and cyclic creep-damage laws of materials and non-symmetric shell structures were determined.

Key words: durability, structural strength, cyclic loading, constitutive equations, asymptotic expansions, cyclic creep, damage, thin-walled shell structural members.

Татарінова Оксана Андріївна

**РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ ЦИКЛІЧНО НАВАНТАЖЕНИХ
НЕОСЕСИМЕТРИЧНИХ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск: к.т.н., доц. Шипуліна Л.В.

Підписано до друку 14.09.2009 р. Формат 60x90/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк.0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 592772

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16