

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Соболь Володимир Миколайович

УДК 539.3

**ПОВЗУЧИСТЬ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ
КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Морачковський Олег Костянтинович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,
завідувач кафедри теоретичної механіки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Курпа Лідія Василівна,
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,
завідувач кафедри прикладної математики;

кандидат технічних наук, ст.н.с.,
Матюхін Юрій Іванович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,
старший науковий співробітник
відділу вібраційних та термоміцностних досліджень.

Провідна установа:

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться “ **24** ” **січня** 2007 р. о **14³⁰** год. 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 ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “**12**” **грудня** 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.10

В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У розрахунках на міцність сучасної високотемпературної техніки, наприклад, авіаційної і ракетно-космічної, ядерних і хімічних реакторів, газотурбінних двигунів і іншої техніки, особливе місце займають розрахунки на повзучість і тривалу міцність. Більшість конструктивних елементів такої техніки в розрахунках моделюють тілами обертання і досліджують при осесиметричному деформуванні. Традиційно, у розрахунках на повзучість конструктивних елементів машин визначають сталі поля напружено-деформованого стану і за критеріями еквівалентних напружень виконують оцінку конструкційної міцності та довговічності. Але для більш достовірної оцінки довговічності конструктивних елементів машин, які експлуатуються в умовах повзучості, необхідно враховувати розподілення у часі полів напружень та незворотних деформацій, що супроводжуються накопиченням пошкоджуваності матеріалу та завершуються прихованим руйнуванням. Існуючі розробки по темі роботи переважно присвячені чисельним розв'язанням задач термповзучості на основі методу скінчених елементів на базі класичних теорій повзучості та критеріїв тривалої міцності, які не враховують пошкоджуваність матеріалів унаслідок повзучості. Тому створення ефективних методів розв'язання задач повзучості та пошкоджуваності тіл обертання має важливе теоретичне значення для спеціальності динаміки та міцності машин та є практично важливим для сучасного машинобудування.

Про актуальність теми роботи свідчить зацікавленість багатьох вітчизняних та закордонних наукових шкіл у галузі динаміки та міцності машин щодо розрахункових методів оцінки конструкційної міцності та довговічності конструкцій, які деформуються в умовах повзучості із пошкоджуваністю, та існуючі потреби у методах визначення впливу повзучості на експлуатаційні властивості конструкцій на етапі проектування сучасної авіаційної, ракетно-космічної, енергетичної та ядерної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота підготовлена на кафедрі теоретичної механіки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ") при виконанні робіт з держбюджетних тем відповідно до координаційного плану МОН України: «Створення методів аналізу нелінійних динамічних процесів, біфуркацій та повзучості в тонкостінних конструкціях» (№ Д.Р. 0103U001486); «Створення методів аналізу нелінійної динаміки і повзучості деформованих тіл та дискретних систем» (№ Д.Р. 0106U001465), та за грантом Президента України «Розробка теоретичних основ для розв'язування задач повзучості із пошкоджуваністю матеріалів й конструкцій щодо прогнозування тривалої міцності та ресурсу енергетичного і реакторного обладнання» (№ Д.Р. 0105U004297), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка розрахункового методу оцінки

конструкційної міцності й довговічності осесиметричних елементів технологічних та енергетичних машин, які експлуатуються при високій температурі й повзучості.

Поставлена мета визначає ряд основних задач:

- сформулювати теоретично обґрунтовану варіаційну постановку задач пружності та повзучості осесиметричних тіл обертання при дії зовнішніх тисків та об'ємних відцентрових сил;
- створити чисельно-аналітичний метод і програмне забезпечення для розрахунків на міцність та довговічність, з урахуванням повзучості та пошкоджуваності, осесиметричних елементів технологічних та енергетичних машин;
- визначити оцінки конструкційної міцності двошарових матриць для пресування тугоплавких сполучень й довговічності труб тиску, роторів і дисків турбомашин, ущільнень для герметизації затворів, що є поширеними елементами технологічних й енергетичних машин та експлуатуються при дії зовнішніх тисків та об'ємних відцентрових сил при високій температурі й повзучості.

Об'єкт дослідження. Осесиметричні конструктивні елементи технологічних та енергетичних машин, такі як матриці для пресування циліндрових брикетів із тугоплавких сполучень, циліндричні труби тиску, ротори і диски турбомашин, ущільнення для герметизації затворів.

Предмет дослідження. Конструкційна міцність й довговічність та процеси деформування і пошкоджуваності внаслідок повзучості осесиметричних елементів технологічних та енергетичних машин, що експлуатуються при високих тисках й температурах.

Методи дослідження містять теоретичні методи континуальної механіки і теорії повзучості, а також чисельні методи для розв'язання початково-крайової задачі повзучості на ЕОМ: варіаційно-структурний метод теорії R-функцій (RFM) для знаходження точок стаціонарності змішаного варіаційного функціоналу, метод Рунге-Кута-Мерсона для чисельного інтегрування рівнянь стану повзучості, метод Гауса для розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, методи Гауса і Сімпсона для чисельного інтегрування коефіцієнтів систем Рітца.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- надано подальшого розвитку методам розрахунку конструкційної міцності та довговічності з урахуванням повзучості та пошкоджуваності осесиметричних конструктивних елементів машин, за рахунок математичної постановки задач повзучості просторових тіл, уперше запропонованої в роботі, на основі змішаного варіаційного функціоналу;
- створено, теоретично й чисельно обґрунтовано новий чисельно-аналітичний метод розв'язання задач повзучості осесиметричних конструктивних елементів машин, що заснований на

сполученні чисельного методу продовження рішення за часом й аналітичного рішення варіаційної рівності для змішаного функціоналу на кроці часу варіаційно-структурним методом теорії R-функцій;

- створено програмні розробки для ЕОМ, які на новій теоретичній основі реалізують розрахунковий метод оцінки конструкційної міцності й довговічності осесиметричних конструктивних елементів технологічних та енергетичних машин, включаючи аналіз процесів повзучості та пошкоджуваності, визначення часу до руйнування;

- виконано дослідження з точності розв'язків, одержуваних на основі запропонованого методу розрахунку конструкційної міцності та довговічності з урахуванням повзучості та пошкоджуваності осесиметричних конструктивних елементів машин за рахунок використання, як апостеріорних оцінок точності розв'язків варіаційних рівностей по близькості значень функціоналів типу Рейснера, Кастіліано й Лагранжа в точках стаціонарності, так і даних про внутрішню збіжність розв'язків при варіюванні кількістю базисних функцій у структурах рішень і параметрами дискретизації просторової області й часу при інтегруванні;

- одержано практично важливі оцінки конструкційної міцності та довговічності поширених конструктивних елементів технологічних та енергетичних машин, встановлено закономірності впливу властивостей матеріалів на міцність двошарової матриці пристрою для пресування циліндрових брикетів із тугоплавких сполучень, процесів повзучості та пошкоджуваності на час до руйнування труб тиску, дисків і роторів турбін та зміну контактного тиску в ущільненнях для герметизації затворів.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення результатів, які одержані в дисертаційній роботі, полягає в запропонованому розрахунковому методі оцінки конструкційної міцності й довговічності осесиметричних елементів технологічних та енергетичних машин, що експлуатуються при високих тисках й повзучості, який можна використовувати в наукових та прикладних дослідженнях при проектуванні відповідальної авіаційної, космічної й реакторної техніки.

Результати роботи використано в НТУ «ХП» при виконанні держбюджетних науково-дослідних тем, координованих Міністерством освіти і науки України, та в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут" при обґрунтуванні вибору за умов міцності матеріалів матриці пристрою для пресування циліндрових брикетів із тугоплавких сполучень.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що надані в дисертації, одержано здобувачем особисто. Серед них: виконано математичні постановки задач повзучості та пошкоджуваності просторових тіл на базі змішаного варіаційного функціоналу; створено

чисельно-аналітичний метод розв'язання нелінійних задач повзучості та пошкоджуваності конструктивних елементів машин, для реалізації якого застосоване програмне забезпечення; вирішено тестові приклади; проведено чисельні дослідження міцності матриці пристрою для пресування циліндрових брикетів із тугоплавких сполучень, довговічності при повзучості та пошкоджуваності дисків і роторів турбін, труб та кільцевих ущільнень; зроблено аналіз одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися й одержали позитивну оцінку на міжнародних науково-технічних конференціях: «Фізичні та комп'ютерні технології в народному господарстві» (м. Харків, 2003 р.), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2003, 2004, 2005, 2006 р.), «Nonlinear Dynamics» (м. Харків, 2004 р.); на наукових семінарах кафедри теоретичної механіки НТУ «ХП» протягом 2002-2006 р.р.

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень по темі дисертаційної роботи опубліковано в 10 друкованих працях, серед яких 6 статей у фахових виданнях ВАК України, 2 статті в матеріалах Міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації складає 142 сторінки, з них 115 сторінок основного тексту, 57 ілюстрацій по тексту й 18 ілюстрацій на 8 сторінках; 5 таблиць по тексту, 4 додатки на 8 сторінках і 107 найменувань використаних літературних джерел на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну цінність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження роботи, охарактеризовано новизну і практичну значимість наукових результатів, представлено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, наведено інформацію про апробацію роботи та публікації основних результатів.

У **першому розділі** надано огляд літературних джерел по темі роботи. Відзначено праці вітчизняних та закордонних науковців, серед яких: Х. Альтенбах, І.А. Біргер, Дж. Бойл, М.І. Бобир, Д.В. Бреславський, А.В. Бурлаков, О.З. Галішин, В.П. Голуб, О.О. Золочевський, Л.М. Качанов, А.О. Лебедев, Дж. Леметра, О.М. Локощенко, Г.І. Львов, М.М. Малінін, Д.Л. Марріот, М.С. Можаровський, О.К. Морачковський, С. Мураками, К.В. Науменко, А.М. Підгорний, Ю.М. Работнов, О.В. Соснін, Дж. Спенс, С. Тайра, Ю.М. Теміс, Д. Хейхерст, Г.М. Хажинський, Дж.Л. Чебоша, Ю.М. Шевченко, С.О. Шестериков та інші.

Розглянуто визначальні рівняння, механізми руйнування матеріалів, для моделювання яких

у рамках континуальної механіки вводиться скалярний параметр пошкоджуваності (суцільності), що раніше запропонований Л.М. Качановим й Ю.М. Работновим, та основні рівняння стану континуальної теорії повзучості й пошкоджуваності. Наведено основні методи досліджень повзучості та пошкоджуваності конструктивних елементів машин, де переважно застосовують чисельне розв'язання задач термповзучості на основі методу скінчених елементів на базі класичних теорій повзучості та критеріїв тривалої міцності, які не враховують пошкоджуваність внаслідок повзучості матеріалів та конструкцій.

Висновки, які зроблено з аналізу вітчизняної та зарубіжної літератури за темою дисертації, дозволили сформулювати наукове завдання зі створення розрахункового методу оцінки конструкційної міцності й довговічності осесиметричних елементів технологічних та енергетичних машин, які експлуатуються при високій температурі й повзучості, на базі змішаного варіаційного принципу й чисельно-аналітичного методу, що засновано на сполученні чисельного методу продовження рішення за часом й аналітичного рішення варіаційної рівності для змішаного функціоналу на кроці часу варіаційно-структурним методом теорії R-функцій.

У другому розділі розглянуто математичну постановку задач повзучості й пошкоджуваності просторових тіл, закріплених на частині поверхні – S_u і навантажених об'ємними та на частині поверхні - S_t поверхневими силами. У загальноприйнятих означеннях надано повну систему рівнянь початково-крайової задачі повзучості тіл щодо невідомих компонентів тензорів напружень, деформацій і переміщень:

$$\begin{aligned} \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \varepsilon_{ij} = 1/2(\nabla_j u_i + \nabla_i u_j), \quad \varepsilon_{ij} = d_{ijkl} \sigma^{kl} + C_{ij}, \\ \sigma^{ij} n_j - t^i = 0 - S_t, \quad u_i - u_i^* = 0 - S_u, \end{aligned} \quad (1)$$

де припущено, що вихідний напружено-деформований стан тіла відповідає пружному, за відсутністю деформацій повзучості C_{ij} .

Система рівнянь (1) доповнюється рівняннями стану повзучості. Відомо, що для ізотропного при повзучості матеріалу мезо-пошкодження адекватно описуються кінетичним рівнянням для параметру пошкоджуваності, що входить у рівняння стану повзучості. Найбільш обґрунтованим для високотемпературної повзучості виявляється закон типу Бейлі-Нортон, за яким:

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_e = \alpha \sigma_l + (1 - \alpha) \sigma_i, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t^*) = \omega^*,$$

де σ_l - максимальне головне напруження, σ_i - інтенсивність напружень, ω^* , t^* - критичне значення параметра пошкоджуваності і час до руйнування, B , D , n , m , k , l , r , α - матеріальні константи, що визначаються за даними базових експериментів.

Далі у цьому розділі сформульовано варіаційну постановку задач повзучості на основі змішаного варіаційного функціоналу

$$R_{u\sigma} = \iiint_V \left[\frac{1}{2} \sigma^{ij} \nabla_i u_j + \nabla_j u_i - \sigma^{ij} C_{ij} - \Lambda(\sigma_{ij}) - f^i u_i \right] dV - \iint_{S_t} t^i u_i dS - \iint_{S_u} n_i \sigma^{ij} (u_j - u_j^*) dS. \quad (3)$$

Варіаційний функціонал (3), який задано на незалежних функціях напружень та переміщень, відноситься до змішаних функціоналів, причому для вихідного стану при нульових деформаціях повзучості цей функціонал точно відповідає відомому у теорії пружності функціоналу Рейснеру. У разі коли тензор C_{ij} є відомим ($\delta C_{ij}=0$) перша варіація змішаного функціоналу (3) набуває вигляду

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0$$

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0' \quad (4)$$

Далі встановлено, що для відомого в деякий час тензору C_{ij} "функції, що відповідають полям напружень та переміщень тіла, надають функціоналу (3) стаціонарного значення"

$$\forall (t+\tau) \in [0, t_*): \quad \delta R(\sigma^{ij}, u_i) = 0. \quad (5)$$

Рівняння Ейлера-Остроградського впливають з варіаційної рівності (5) і відповідають системі рівнянь (1) при $1/2(\nabla_i u_j + \nabla_j u_i) = d_{ijkl} \sigma^{kl} + C_{ij}$.

Далі у розділі основні співвідношення (1-4) конкретизовано у циліндричних координатах.

Також у другому розділі запропоновано інтегральні оцінки наближених розв'язків задач повзучості, що мають вигляд

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0' \quad (6)$$

Значення порівнюваних величин обчислюються на одержаних у кожен момент часу рішеннях по формулах:

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0 \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0'$$

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0'$$

Рівності (6) узагальнюють для повзучості відомі в теорії пружності апостеріорні оцінки точності рішень варіаційної рівності (5), раніше одержані Ю.В. Ромашовим і В.А. Сало. Абсолютні значення зазначених тут величин збігаються на точно знайдених рішеннях варіаційної рівності, і по нормі їхньої відмінності дозволяють оцінити наближені рішення.

Докладно розглянуто чисельно-аналітичний метод розв'язання задач повзучості, що представляє сполучення методу продовження рішення за часом з рішенням варіаційної рівності на кроці часу. Для визначення деформацій повзучості та пошкоджуваності на кроці часу застосоване

чисельне інтегрування рівнянь (2) методом Рунге-Кутта-Мерсона з автоматизованим вибором кроку у часі, а для пошуку стаціонарних точок змішаного функціоналу (3) - варіаційно-структурний метод теорії R- функцій.

У розділі для широкого класу двовимірних крайових задач запропоновано структури рішення:

$$u_i = u_i(\omega, \Phi), \quad \Phi_i = \sum_{k,l} a_{kl}^i \varphi_{kl}^i, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\omega, P), \quad P_{ij} = \sum_{k,l} b_{kl}^{ij} \psi_{kl}^{ij},$$

які дозволили у загальному випадку записати розв'язки крайових задач повзучості в аналітичному вигляді:

$$u_i = u_{i*} + \sum_{r=1}^n a_i^r \varphi_i^r, \quad \sigma^{ij} = \sigma_*^{ij} + \sum_{r=1}^n b_r^{ij} \psi_r^{ij}, \quad (7)$$

де $\omega\{\omega_i\}$ – R-функції, завдяки яким точно задовольняються крайові умови, $\Phi\{\Phi_i\}$, $P\{P_{ij}\}$ – вільні компоненти структур, u_{i*} , σ_*^{ij} - задані компоненти вектора переміщень і тензора напружень, $a_i^{(r)}$, $b_{(r)}^{ij}$ - коефіцієнти вільних компонентів структур, що підлягають визначенню, $\varphi_i^{(r)}$, $\psi_{(r)}^{ij}$ - координатні функції, що мають володіти властивістю повноти.

Систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно коефіцієнтів вільних компонентів структур одержано в матрично-блоковому вигляді

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_\sigma \\ q_u \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} p_\sigma + p_c \\ p_u \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

де $q_u\{a_i^{(r)}\}$, $q_\sigma\{b_{(r)}^{ij}\}$ – вектори, що складено з коефіцієнтів вільних компонентів структур, $[R_{ij}]$ – блокові матриці, p_σ , p_u , p_c - вектори, що відповідають заданим значенням шуканих функцій на границях тіла і деформаціям повзучості в розглянутий момент часу.

Елементи блокових матриць і векторів правих частин

$$R_{11}^{11} = -\iiint_V \frac{1}{E_r} \psi_1 \psi_1 dV, \quad \dots, \quad R_{21}^{24} = -\iiint_V \varphi_2 \left(\frac{\partial}{\partial r} \psi_4 + \frac{\psi_4}{r} \right) dV;$$

$$p_1^\sigma = \iiint_V \psi_1 \left(\frac{\partial}{\partial r} u_r^* - \frac{1}{E_r} \sigma_{rr}^* + \frac{v_{\theta r}}{E_r} \sigma_{\theta\theta}^* + \frac{v_{zr}}{E_z} \sigma_{zz}^* \right) dV, \quad \dots, \quad p_4^c = -\iiint_V \psi_4 C_{rz} dV$$

знаходяться шляхом чисельного інтегрування по формулах квадратур Гауса або Сімпсона. Коефіцієнти вільних компонентів структур (7) визначаються рішенням СЛАР (8) методом Гауса.

У роботі створено програмні розробки, що реалізують чисельно-аналітичний метод аналізу напружено-деформованого стану, визначення пошкоджуваності й часу до руйнування внаслідок повзучості осесиметричних конструктивних елементів машин.

Далі, у розділі, наведено дані з дослідження точності рішень, які одержані на основі запропонованого методу розрахунку. Із цією метою вирішено тестові приклади, для яких відомі

аналітичні, експериментальні або наближені рішення, раніше одержані іншими авторами. На рис. 1 порівняно аналітичні (Δ, O) і наближені (суцільні й пунктирні криві) розв'язки задачі повзучості циліндра з Д16АТ ($T=300^0C$) під внутрішнім тиском.

Рис. 1. Розподіл σ_{rr} и $\sigma_{\theta\theta}$ в перетині циліндра

На рис. 2 зіставлені розрахункові (суцільні криві) осьові деформації повзучості циліндрів з дюралевого сплаву Д16АТ ($T=300^0C$) для трьох рівнів осьової сили й осереднені за експериментальними даними (\square, Δ, O), які одержано в Лабораторії кафедри динаміки і міцності машин НТУ „ХП”. Розбіжність порівняних даних відповідає припустимій для повзучості.

Рис. 2. Осьові деформації повзучості розтягнутих циліндрів

При порівнянні цих рішень використано дані про внутрішню збіжність розв'язків за рахунок варіювання кількістю базисних функцій – N^2 , початковим кроком – Δt_0 і точністю інтегрування за часом – ϵps , параметрами дискретизації просторової області при інтегруванні коефіцієнтів СЛАР – $k=k_r k_z$, апостеріорні оцінки точності рішень варіаційної рівності (6). При апроксимації вільних компонент структур степеневими поліномами й утриманні 8-ми доданків різниця між порівняними даними складає менш ніж 3%.

Результати представлених досліджень дозволяють вважати обґрунтованим використання, запропонованого в даній роботі, методу розрахунку на повзучість осесиметричних конструктивних елементів машин.

Третій розділ присвячено розрахунку циліндрів та труб під дією кусково-постійних вздовж

довжини тисків. Розглянуто циліндричні тіла, у загальному випадку шарувато-неоднорідні, наприклад ті, що складаються з кінцевого числа шарів, навантажені кусочно-постійним тиском – p_1 , p_2 на внутрішній і зовнішній поверхні, як показано

Рис. 3. Циліндр під внутрішнім і зовнішнім тиском

на рис. 3. Прийнято, що загальна довжина циліндра – $2h$, довжини ділянок розподілу тиску по зовнішній і внутрішній поверхні $2b$ і $2c$, відповідно. Структури рішень прийнято у вигляді:

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0,$$

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0 \tag{9}$$

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0,$$

- для циліндра з нерухомими торцями;

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0,$$

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad (10)$$

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0,$$

- для циліндра з вільними торцями,

де

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0$$

- R – функції, завдяки яким точно задовольняються крайові умови,

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \quad \nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0 \quad (11)$$

- степеневі функції в апроксимації вільних компонент структур.

Спочатку розглянуто результати аналізу міцності двошарової товстостінної матриці для пресування циліндрових брикетів з порошкових тугоплавких з'єднань. Пресування виробів з порошків тугоплавких з'єднань типу карбід вольфраму, кобальту, нікелю при температурі $\sim 1800^{\circ}\text{C}$ і тисках 30 - 40 МПа у відомих пристроях проводиться в матрицях з тугоплавких матеріалів. Встановлено, що для пресування таких виробів з підвищеним тиском від 40 до 80 МПа можна для шарів матриці використати графіт та вуглець-вуглецевий композит, що має високі механічні властивості при таких температурах. Ці висновки рекомендовано для використання при проектуванні пристрою для пресування брикетів з порошків тугоплавких з'єднань в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства й технології Національного наукового центра "Харківський фізико-технічний інститут".

Далі у прикладах визначено закономірності повзучості та часу до завершення прихованого руйнування циліндрів та труб тиску. Наприклад, вибором розрахункових параметрів: $\Delta\tau_0 = 0.002$ год., $\epsilon_{ps} = 10^{-5}$, $k_r = k_z = 51$ щодо повзучості з пошкодженням циліндра ($R_1 = 0.1$ м, $R_2 = 0.5$ м, $h = 0.3$ м, $c = h$, $b = 0$) з дюралевого сплаву Д16АТ ($T = 300^{\circ}\text{C}$) під внутрішнім тиском $p_1 = 25$ МПа, дані збіжності за часом до руйнування відповідають таблиці 1.

Таблиця 1. Дані збіжності за часом до руйнування

N^2	1	9	25	49
t_* , ч	89	87.9	90.5	109
δ_* , %	18,3	19,4	16,9	-

Закономірності повзучості аж до закінчення прихованого руйнування представлено на рис. 4 у вигляді розподілів радіальних та окружних напружень для моментів часу: $t_0=0$ год. - вихідне пружне деформування, $t_1=69$ год. ($\omega_*=0.3$) – повзучість, $t_2=109$ год. ($\omega_*=0.8$) – повзучість перед руйнуванням.

Рис. 4. Розподіл радіальних та окружних напружень

Встановлено, що за час до встановлення повзучості напруження помітно перерозподіляються по перетині циліндра при малому рівні накоплення пошкоджуваності ($\omega_* < 0.1$). Пошкоджуваність збільшується практично без зміни напружень аж до руйнування, інтервал часу від установаження напружень до руйнування становить 84,4%.

Далі, в цьому розділі розглянуто повзучість труб, навантажених кусочно-постійним внутрішнім тиском. Окремі чисельні результати наведено на рис. 5.

Рис. 5. Зміна радіальних напружень і осьових переміщень уздовж циліндра

На рис. 5 для різних моментів часу: t_0 – вихідне пружне деформування, $t_1 = 237$ год. ($\omega_*=0.3$), $t_2 = 425$ год. ($\omega_*=0.8$) – перед руйнуванням, надано розподіли радіальних напружень й осьових переміщень на поверхні $r=(R_1+R_2)/2$ вздовж циліндра з Д16АТ, на який діє розподілений уздовж ділянки $c=h/2$ внутрішній тиск $p_1=25\text{МПа}$ при $T=300^\circ\text{C}$, $R_1=0.1$ м, $R_2=0.5$ м, $h=0.3$ м.

Попередніми розрахунками визначено раціональні значення параметрів просторово-часової дискретизації, які забезпечують збіжність рішень. Встановлено, що при кусочно-постійному тиску напружено-деформований стан є досить неоднорідним по довжині циліндра, та набуває суттєвих змін у часі як по перетині, так і по довжині циліндра. Найбільше змінюються радіальні напруження, так що у точках серединної поверхні циліндра за часом аж до руйнування поза зоною тиску спостерігається релаксація напружень, а в зоні тиску стиск підвищується. Осьові переміщення точок серединної поверхні циліндра косо-симетрично розподілені по довжині циліндра, і саме у межах ділянки прикладеного тиску їхні значення у часі суттєво зростають.

У **четвертому розділі** наведено результати чисельних досліджень закономірності повзучості роторів та дисків турбін. У багатьох випадках розрахункові схеми роторів і дисків турбомашин приймають у вигляді типових фрагментів, перетини яких показано на рис. 6.

Рис. 6. Перетини ротора й диска турбіни

Елемент ротора, що показаний на рис. 6, моделює ротор з одним диском, або фрагмент ротора з дисками, періодично продовжений в обидва боки по осі z . Зовнішній тиск p на ділянці

ротора відповідає розподіленям силам від приєднаного до ротора диска з урахуванням контактних сил посадки й відцентрових сил диска.

У даному розділі використано надані в розділі 3 структури розв'язків, однак, для обліку відцентрових сил компонента вектора p_u в правій частині СЛАР підрахована з проєкціями вектору об'ємних сил $f_r = \rho \Omega^2 r$, $f_z = 0$. Змінність товщини диска в межах розглянутих структур розв'язків враховано за попереднім поділенням області перетину тіла на фрагменти із границями, що наближають їх до реальної геометрії тіла, а інтегрування коефіцієнтів і компонентів векторів правих частин СЛАР виконувались в межах кожного виділеного фрагмента.

Чисельно-аналітичним методом, запропонованим у роботі, розв'язано задачі аналізу напружено-деформованого стану обертових роторів і дисків, змінної товщини.

Рис. 7. Інтенсивності напружень, радіальні й осьові переміщення у часі

Чисельні дані розрахунків одержано для ротора з матеріалу 30ХМА ($T=500^{\circ}C$). На рис. 7 зіставлені криві залежності зміни інтенсивності напружень у часі в точках, де інтенсивність напружень у вихідному стані максимальна й мінімальна, – в точці $A(R_1, 0)$, розрахункова - крива 1 і дані, наведені в літературі й одержані методом скінчених елементів - крива 2 з маркером \square . Тут же, аналогічно, представлено криві для зміни інтенсивності напруження у часі в точці $B(R_2, h)$, розрахункова - крива 3 і дані МСЕ - крива 4 з маркером Δ . Помітимо, що якісно ці залежності не відрізняються, а деяке розходження кількісних даних, менш 10%, має місце для точки A ротора, що пояснюється наявністю погрішностей методів. За представленими даними можна зробити висновок про те, що час встановлення інтенсивності напружень у роторі становить приблизно 10 годин. Наведено розрахункові дані про зміну на інтервалі 10 годин радіальних переміщень у точці A - крива 1, а також осьових переміщень у точках B - крива 2 і $C(R_1, h)$ - крива 3. Тут же, маркерами позначено дані, які одержані методом скінчених елементів.

Для визначення експлуатаційного ресурсу ротора з матеріалу 30ХМ ($T=500^{\circ}C$) розрахунки виконано з урахуванням пошкоджуваності внаслідок повзучості, аж до закінчення прихованого руйнування. Окремі результати цих досліджень приведено на рис. 8, де ліворуч надано розподіли радіальних та окружних напружень у центральному поперечному перерізі (I - I) і на краю ротора (II - II) при $t = 0$ год., а праворуч – перед руйнуванням: $t_2 = 44\ 589$ год. ($\omega^* = 0.8$).

Рис. 8. Розподіл напружень по перерізам ротора

Розрахунками встановлено час до закінчення прихованого руйнування – $t_2 = 44\ 589$ год., місце руйнування в околиці точці $A(R_1, 0)$ й закономірності в перерозподілі напружень за часом.

Далі, у розділі представлено нові результати для несталої повзучості обертових дисків, змінної товщини, включаючи закономірності в зміні напружено-деформованого стану, внаслідок пошкоджуваності матеріалу, і часу до завершення прихованого руйнування. Дані розрахунків свідчать про значний вплив форми перетину диска на час до руйнування.

Так, наприклад, при збереженні об'єму дисків, час до руйнування диска двохступеневої товщини практично втриє більший, ніж для диска постійної товщини. Окремі чисельні результати для диска турбіни з матеріалу ХН77ТЮР (700°C) при $\rho=8200 \text{ кг/м}^3$, частоті обертання – $n=11620 \text{ об/хв.}$ та контактного тиску від лопаток – $p=122.6 \text{ МПа}$ наведені на рис. 9 – 11. Для диска постійної товщини при $R_1=0.0765 \text{ м}$, $R_2=0.2379 \text{ м}$, $h=0.0216 \text{ м}$ розрахункові дані представлено на рис. 9, а для диска двохступеневої товщини при $R_1=0.0765 \text{ м}$, $R_2=0.1425 \text{ м}$, $R_3=0.2379 \text{ м}$, $2h=0.06 \text{ м}$, $2c=0.0263 \text{ м}$ в межах $R_1 \leq r \leq R_2$, $-h \leq z \leq h$ – на рис. 10, а в межах $R_2 \leq r \leq R_3$, $-c \leq z \leq c$ – на рис. 11.

Рис. 9. а) $t = 0$ год., б) перед руйнуванням, $t_2=125$ год.

Рис. 10. а) $t = 0$ год., б) перед руйнуванням, $t_2=342$ год.

Рис. 11. а) $t = 0$ год., б) перед руйнуванням, $t_2=342$ год.

Деформування в умовах повзучості супроводжується перерозподілом напружень у перетині і уздовж радіуса диска, що призводить до якісної і кількісної зміни максимальних окружних напружень у часі. Перерозподілу осьових і дотичних напружень практично не відбувається. Рівень абсолютних значень осьових напружень не перевищує 60 МПа , а дотичних – 100 МПа . Спостерігається значний ріст переміщень у радіальному напрямку диска, що сприяє вибороти зазору між кінцевим перетином лопаток і корпусом турбіни. Точка, у якій значення параметра пошкоджуваності максимальні, спочатку міститься на внутрішньому радіусі диска і з часом декілька зміщується до центру. Розрахункові дані дозволяють: встановити незворотне формоутворення роторів і дисків турбомашин, спрогнозувати термін служби.

У **п'ятому розділі** розглянуто повзучість і релаксацію контактних напружень ущільнювальних елементів, що забезпечують герметичність корпусу, та є складовою частиною затвору, призначеного для зборки і розбирання з'єднань. Кріпильні елементи затвору сприймають зовнішні навантаження, наприклад, дію робочого середовища, і утримують складові частини затвору в робочому положенні. При високих температурах в ущільнювальних з'єднаннях має місце релаксація контактних напружень і руйнування внаслідок повзучості, що впливає на герметичність з'єднань.

У дослідженнях розглянуто повзучість ущільнювальних з'єднань із прокладками у вигляді ущільнювальних кілець прямокутного і трикутного перетинів з алюмінієвих сплавів, міді і сталі, що найбільше використовуються у техніці. Вивчено питання повзучості і релаксації контактних напружень ущільнювальних кілець прямокутного перетину в умовах взаємодії зі стінками затвору при повному і частковому зчепленні точок контактуючих поверхонь.

Закономірності повзучості представлено у вигляді змін полів напружень і переміщень за часом аж до закінчення прихованого руйнування. Ці дані дозволяють встановити, що повне зчеплення точок контактуючих поверхонь значно скорочує час до руйнування (практично втричі) ущільнювального кільця.

Далі розглянуто розрахунки повзучості ущільнювальних з'єднань з ущільнювальним кільцем трикутного перетину, що надано на рис. 12.

Спочатку досліджено збіжність рішень за порівнянням з відомими даними для пружного

Рис. 12. Кільце трикутного перетину деформування.

Далі досліджено повзучість прокладок зі сталі 20 ($T=500^{\circ}\text{C}$) під тиском $p=100\text{ МПа}$. Розрахунки повзучості ущільнювальних кілець з урахуванням пошкоджуваності приведено на рис. 13 у вигляді перерозподілу нормальних та дотичних напружень.

Рис. 13. Релаксація нормальних та дотичних напружень

Аналіз одержаних результатів дозволив зробити висновок про істотний перерозподіл полів нормальних і дотичних напружень, ослаблення з'єднань за рахунок зниження рівня контактних напружень за часом, особливо на краях кільця, що сприяє розгерметизації затвору. Повзучість сприяє значному росту переміщень у крайніх точках внутрішньої поверхні кільця. З аналізу результатів зроблено висновок про вплив форми і матеріалу ущільнювального кільця на перерозподіли напружень і час до руйнування. Ущільнювальні кільця з компенсованою площею трикутного перетину в порівнянні з плоскими при рівності площ поперечного переріза мають більший ресурс.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі щодо розробки розрахункового методу оцінки конструкційної міцності та довговічності осесиметричних конструктивних елементів технологічних та енергетичних машин, які деформуються в умовах повзучості з пошкоджуваністю при дії зовнішніх тисків та об'ємних відцентрових сил. Основні результати дисертаційної роботи:

1. Запропоновано розрахунковий метод оцінки конструкційної міцності та довговічності, з урахуванням повзучості та пошкоджуваності, осесиметричних конструктивних елементів машин, який містить покрокове інтегрування рівнянь стану у часі з розв'язанням на кожному кроці варіаційної рівності для змішаного варіаційного функціоналу, що дозволяє на етапі проектування визначити вплив експлуатаційних властивостей матеріалів та конструкцій, процесів повзучості та пошкоджуваності на час до руйнування та зміну контактного тиску в ущільненнях для герметизації затворів;

2. Створено, теоретично і чисельно обґрунтовано чисельно-аналітичний метод розв'язання двовимірних крайових задач повзучості осесиметричних конструктивних елементів машин, який засновано на сполученні чисельного методу продовження рішення за часом і аналітичним рішенням варіаційної рівності для змішаного функціонала на кроці часу варіаційно-структурним методом теорії $R - \text{функцій}$.

3. Створено програмні розробки, що реалізують метод розрахунку пружного деформування та повзучості з пошкоджуваністю, включаючи визначення оцінок конструкційної міцності і довговічності осесиметричних конструктивних елементів технологічних й енергетичних машин.

4. Одержано оцінки конструкційної міцності двошарових матриць для пресування тугоплавких сполучень, часу до руйнування для поширених елементів енергетичних машин: труб тиску, роторів і дисків турбомашин та зміну контактного тиску ущільнень для герметизації затворів, які експлуатуються при дії зовнішніх тисків та об'ємних відцентрових сил при високій температурі й повзучості.

5. Результати роботи впроваджено на практиці в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут" при обґрунтуванні вибору за умов міцності матеріалів матриці пристрою для пресування циліндрових брикетів із тугоплавких сполучень.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Морачковский О.К., Соболев В.Н. Решения задач ползучести тонкостенных стержней и оболочек на базе смешанного вариационного принципа // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2002.– № 10, Т.2–С. 82-86.

Здобувач розробив метод щодо розв'язування варіаційної задачі.

2. Морачковский О.К., Соболев В.Н. Метод решения задач ползучести тел на основе смешанного вариационного принципа // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – № 12, Т.1– С. 84-89.

Здобувач розробив чисельно-аналітичний метод розв'язання задач нелінійної повзучості осесиметричних просторових тіл.

3. Морачковский О.К., Соболев В.Н. Исследования сходимости решений задач ползучести тел вращения вариационным методом // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 20. – С. 75-80.

Здобувач одержав чисельні розрахунки і дані зі збіжності розв'язків задач нелінійної повзучості осесиметричних просторових тіл.

4. Ромашов Ю.В., Соболев В.Н. Расчеты повреждающихся при ползучести толстостенных цилиндров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 47. – С. 52-56.

Здобувач одержав розв'язки задач повзучості товстостінних циліндрів.

5. Морачковский О.К., Дружинін Є.І., Ромашов Ю.В., Соболев В.М. Моделирование и анализ динамических высокотемпературных процессов в элементах энергетического оборудования // Збірник наукових праць Полтавського державного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – Вип. 16. – С. 160-164.

Здобувач створив програмні засоби щодо дослідження процесів повзучості.

6. Морачковский О.К., Ромашов Ю.В., Соболев В.Н. Ползучесть и повреждаемость контактных уплотнений затворов высокого давления // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 21. – С. 91-96.

Здобувач одержав розв'язки задач повзучості контактних ущільнень.

7. Ромашов Ю.В., Соболев В.Н. Методы расчета посадки цилиндра // Вісник Інженерної Академії України. – К., 2000. – Спеціальний випуск. – С. 395-398.

Здобувач розробив структури розв'язків задачі пружності для розрахунків посадки циліндрів.

8. Ромашов Ю.В., Соболев В.Н. Моделирование свободных колебаний тонких стержней на базе смешанного вариационного принципа Рейсснера // Вісник Інженерної Академії України. – К., 2001. – ч. 2, № 3. – С. 21-25.

Здобувач розробив метод розв'язування варіаційних задач вільних коливань.

9. Морачковский О.К., Соболев В.Н. Вариационный принцип для решения задач ползучести пространственных тел // Труды 8-й Международной конференции «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве». – ХНПК «ФЭД». – Харьков, 2003. – С. 272-275 .

Здобувач надав обґрунтування змішаному функціоналу та одержав чисельні розрахунки з довговічності осесиметричних просторових тіл.

10. Morachkovsky O., Sobol V., Zamula A. The methods for solution of static and dynamic creep problems for bodies of revolution // Тезисы докладов Международной конференции «Nonlinear Dynamics». – Харьков, 2004. – С. 59.

Здобувач одержав розв'язки задач повзучості осесиметричних тіл обертання.

АНОТАЦІЇ

Соболев В.М. Повзучість та пошкоджуваність осесиметричних конструктивних елементів машин. - 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, 2006.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-практичної задачі щодо розробки розрахункового методу оцінки конструкційної міцності та довговічності осесиметричних конструктивних елементів технологічних та енергетичних машин, які деформуються в умовах повзучості з пошкоджуваністю при дії зовнішніх тисків та об'ємних відцентрових сил.

Запропоновано розрахунковий метод оцінки конструкційної міцності та довговічності з урахуванням повзучості та пошкоджуваності осесиметричних конструктивних елементів машин, що дозволяє на етапі проектування визначити вплив експлуатаційних властивостей матеріалів та конструкцій, процесів повзучості та пошкоджуваності на час до руйнування та зміну контактного тиску в ущільненнях для герметизації затворів.

Створено, теоретично і чисельно обґрунтовані, чисельно-аналітичний метод та програмні розробки щодо визначення оцінок конструкційної міцності і довговічності осесиметричних конструктивних елементів технологічних й енергетичних машин, який засновано на сполученні чисельного методу продовження рішення за часом і аналітичним рішенням варіаційної рівності для змішаного функціонала на кроці часу варіаційно-структурним методом теорії R – функцій.

Одержано оцінки конструкційної міцності двошарових матриць для пресування тугоплавких сполучень, часу до руйнування: труб тиску, роторів і дисків турбомашин та зміну контактного тиску ущільнень. Результати роботи впроваджено в Інституті фізики твердого тіла,

матеріалознавства та технологій Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут".

Ключові слова: конструкційна міцність, довговічність, повзучість з пошкоджуваністю, час до руйнування, труби тиску, ротори та диски турбін, ущільнювальні кільця, двошарові матриці.

Соболь В.Н. Ползучесть и повреждаемость осесимметричных конструктивных элементов машин. - 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, 2006.

Диссертационная работа посвящена разработке расчетного метода оценки конструкционной прочности и долговечности осесимметричных конструктивных элементов технологических и энергетических машин, деформирующихся в условиях ползучести при действии внешних давлений и объемных центробежных сил.

На базе смешанного вариационного функционала, который при известных в произвольный момент времени деформациях ползучести задан на независимо варьируемых функциях перемещений и напряжений, сформулирована вариационная постановка задач об упругом деформировании и ползучести, с учетом повреждаемости, пространственных тел.

Созданы численно-аналитический метод и программные разработки, реализующие на шаге времени вариационно-структурный метод теории R – функций для отыскания аналитического решения вариационного равенства для смешанного функционала и метод численного продолжения решений во времени, что позволяет на этапе проектирования получить оценки конструкционной прочности и долговечности осесимметричных конструктивных элементов технологических и энергетических машин.

Выполнены исследования по оценке точности решений, полученных на основе предложенного метода расчета конструкционной прочности и долговечности осесимметричных конструктивных элементов машин. Использованы как апостериорные оценки точности решений вариационных равенств путем сопоставления значений функционалов типа Рейсснера, Кастильяно и Лагранжа в точках стационарности, так и данные о внутренней сходимости решений при варьировании количеством базисных функций в структурах решений и параметрами дискретизации пространственной области и времени при интегрировании. Данные расчетов сравнивались с численными, аналитическими и экспериментальными данными, предложенные другими авторами.

Получены практически важные оценки конструкционной прочности и долговечности распространенных конструктивных элементов технологических и энергетических машин. Установлены закономерности процессов ползучести и повреждаемости на время до разрушения труб давления, дисков и роторов турбин. Представлены результаты численных расчетов прочности двухслойной пресс-формы устройства для прессования полых брикетов из порошков тугоплавких соединений. Установлено, что для повышения давления от 40 до 80 МПа можно для слоев матрицы использовать графит и углерод-углеродный композит, что рекомендовано для использования в Институте физики твердого тела, материаловедения и технологий Национального научного центра "Харьковский физико-технический институт".

Изучены вопросы ползучести и релаксации контактных напряжений уплотнительных колец прямоугольного и треугольного сечений из алюминиевых сплавов, меди и стали, наиболее часто используемых в технических приложениях, в условиях взаимодействия со стенками затвора при полном и частичном сцеплении точек контактирующих поверхностей.

Ключевые слова: Конструкционная прочность, долговечность, ползучесть с повреждаемостью, время до разрушения, трубы давления, роторы и диски турбин, уплотнительные кольца, двухслойные матрицы.

Sobol V.N. Creep and damage of the axisymmetrical constructive machine elements. - Manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree by the speciality 05.02.09 - dynamics and strength of machines. - National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkiv, 2006.

The calculation method of strength of the axisymmetrical constructive machine elements is presented. The mathematical statement include the variation principle for the mixed functional, which is formulated on independently varied functions of displacements and stresses for known creep strains at arbitrary moment of time, and the numerical method based on methods of Runge-Kutta-Merson and Rvachov's Functions, for solution of the initial-boundary creep problem. The integral estimations on the basis of Lagrange, Reissner and Castilliano functionals are used for the investigations of convergence and reliability of the obtained test results. On a new theoretical basis the program complex, which realize the solution method of creep-damage problems for the axisymmetrical constructive machine elements have been done.

The test examples are presented. Numerical data demonstrate the convergence of approximate solutions.

Practically important numerical estimations of strength and durability of axisymmetrical constructive machine elements, such as two-layer matrixes, disks and rotors of turbines, tubes and high-pressure vessels seals, are given.

Key words: constructional strength, durability, creep damage, time to fracture, tubes of pressure, rotors and disks of turbines, seals-rings, two-layer matrixes.

Соболь Володимир Миколайович

**ПОВЗУЧІСТЬ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ
КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН**

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск: к.т.н., доц. Ю.В. Ромашов

Підписано до друку 5.12.2006 р. Формат видання 145x215.

Формат паперу 60×90/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.

Обсяг 0,9 авт. арк. Наклад 100 прим. Замовлення № 507682

Надруковано СПД ФО Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10.
