

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Аніщенко Галина Оттівна

РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
ПОВЗУЧОСТІ З РУЙНУВАННЯМ СТАТИЧНО ТА ЦИКЛІЧНО
НАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН

05.02.09. - динаміка, міцність машин,
приладів та апаратури

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Харків - 1996

021.01



00344198 (Т)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Опір матеріалів" Харківського
Державного політехнічного університету

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Морачковський Олег Костянтинович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Фомічов Петро Олександрович

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Сукіасов Володимир Георгієвич

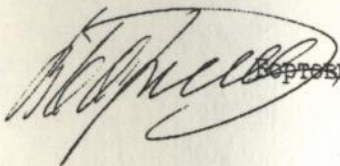
Провідна організація - Інститут проблем машинобудування
НАН України (м. Харків)

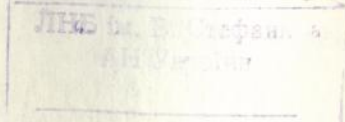
Захист відбудеться "24" квітня 1996 р. о 14³⁰ год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.16
у Харківському державному політехнічному університеті
за адресою: (310002, Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського
державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий "23" березня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

 Кертовий В.В.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. У багатьох галузях машинобудування деталі машин і конструкції сучасної техніки експлуатуються при високих температурах та спільної дії статичних та циклічних навантажень. Суттєвими факторами щодо оцінки міцності таких конструкцій є процеси динамічної повзучості, інтенсивне нагромадження незворотних деформацій повзучості та пошкоджень, які ведуть до руйнування, що необхідно враховувати у розрахунках.

Методи досліджень напружено-деформованого стану (н.д.с.) тіл при пружних коливаннях, як і повзучості в умовах статичних навантажень, розроблені досить повно. Дія вібрацій на елементи конструкцій машин, приладів та апаратури, що знаходяться в умовах повзучості, практично не вивчалась. Між іншим, як відомо з досвіду та експериментів, навіть малі вібрації тіла, що навантажено статично, можуть суттєво підвищити швидкість повзучості, вплинути на розподіл напружень та скоротити час до руйнування.

Для багатьох відповідальних деталей та елементів енергетичних машин, що експлуатуються в умовах підвищених температур, застосовують розрахункові схеми, що відповідають плоским задачам теорії повзучості. До них належить велика кількість елементів турбомашин, наприклад диски, бандажні полиці з отворами та надрізами, замкові з'єднання лопаток, елементи двигунів, стінки корпусів та багато іншого. Підвищені вимоги, що пред'являються до таких відповідальних елементів машинобудівних конструкцій, потребують методів достовірного аналізу н.д.с., оцінки довготривалої міцності виробів, що мають бути придатними для розрахунків при проектуванні та модернізації, або прогнозу експлуатаційних якостей.

У зв'язку з цим, розробка ефективних методів розрахунку, проведення досліджень по повзучості з руйнуванням циклічно

навантажених елементів енергетичних машин на підставі їх чисельного моделювання - актуальна наукова та технічна проблема. Цім проблемам присвячена дисертаційна робота, що виконувалась у рамках державних науково-технічних програм "Розробка теоретичних основ дослідження міцності матеріалів та конструкцій в умовах високотемпературного навантаження" у 1991-1993 роках (N держ.реєстрації 0193U027870), "Розв'язок проблем деформування та руйнування тіл внаслідок статичної та динамічної повзучості з метою розрахунків тривалої міцності та технологій теплового складання конструкцій" у 1994-1996 роках (N держ.реєстрації 0195 U 009046).

Метою роботи є розробка методів, алгоритмів та програмного забезпечення до розрахункових досліджень повзучості плоских тіл, що знаходяться в умовах підвищених температур та спільної дії статичних та циклічних навантажень, а також розв'язок нових задач, що становлять практичний та теоретичний інтерес.

Наукова новизна. В даній роботі досліджується маловивчений напрямок у динаміці та міцності машин і нелінійній механіці твердого деформованого тіла - динамічна повзучість матеріалів і машинобудівних конструкцій. Новими науковими результатами, що отримані в роботі, є:

-запропонований метод розрахунку на динамічну повзучість з руйнуванням деталей машин, приладів та апаратури при плоских напруженому або деформованому станах, реалізований у вигляді програмного комплексу, орієнтованого на використання сучасних чисельних методів;

-отримані дані з динамічної повзучості та руйнування плоских тіл з концентраторами напружень (отворами, викружками, надрізами) замкових з'єднань лопаток турбомашин;

-запропонований метод та алгоритм чисельного аналізу розповсюдження фронту руйнування в тілах з концентраторами

напружень для пошуку часу їх повного руйнування;

- встановлені нові закономірності щодо впливу динамічної повзучості на н.д.с, формування та руйнування плоских тіл.

Методи дослідження. В роботі використані методи теорії повзучості та механіки пошкоджень, аналітичні та чисельні методи математичної фізики при формулюванні початково-крайових задач повзучості тіл, що навантажені циклічно; метод скінчених елементів у швидкостях вузлових переміщень для роз'язку початково-крайових задач динамічної повзучості.

Вірогідність результатів, отриманих на підставі розроблених методів та алгоритмів, підтверджена результатами розрахунків тестових прикладів, чисельні або аналітичні розв'язки яких є відомими, а також прийнятним збігом чисельних даних з експериментальними.

Теоретична цінність роботи полягає у розробці та обґрунтуванні методик розв'язку початково-крайових задач динамічної повзучості деталей машин при спільній дії статичних та циклічних навантажень.

Практична цінність полягає у використанні методів, алгоритмів та програмного забезпечення для розрахунків на повзучість з метою оцінки конструктивної міцності елементів енергетичних машин. Отримані результати розрахунків пластин з надрізами та отворами, замкових з'єднань лопаток турбомашин дозволяють рекомендувати напрямки до поліпшення їх конструктивної міцності на стадіях проектування, виготовлення й експлуатації. Програмні засоби дозволяють виконувати розрахунки на динамічну повзучість та довготривалу міцність різноманітних елементів енергетичного обладнання за розрахунковими схемами плоских тіл в умовах підприємств та організацій.

Впровадження. Методика, програмні засоби, та результати

розрахунку на міцність елементів енергетичних машин впроваджені у практиці НВО "Турбоатом" (1995 р.), та частково використані при проєктуванні шахтного обладнання у СКБ заводу "Світло шахтаря" (1992-1993 р.р). Методики та програми розрахунку на повзучість деталей енергетичних машин використані у учбовому та науково-дослідницькому процесі ХДПУ у 1992-1995 роках.

Публікації. З теми дисертації опубліковано 5 друкованих робіт.

Особистий вклад здобувача полягає у наступному: наукові результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. Здобувачем розроблено методику, алгоритми та програми розв'язку початково-крайових задач динамічної повзучості на підставі схем методу скінчених елементів, розв'язані тестові приклади, виконані чисельні дослідження елементів конструкцій енергетичних машин.

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи доповідались на IV Міжреспубліканській конференції "Проблеми підвищення прочності елементів машиностроительних конструкцій (Харьков, 1986); Міжнародній науково-технічній конференції "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье" (Харьков, 1993); науково-технічній конференції "Исследования вибраций машин, механизмов и конструкций" (Севастополь, 1993); науково-технічній конференції "Проблеми подъемно-транспортной техники" (Алушта, 1993); Міжнародній науково-технічній конференції "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье" (Харьков, 1995); 2-му Міжнародному симпозіумі українських інженерів механіків у Львові (1995).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, заключення, списку літератури з 100 найменувань. Загальний обсяг роботи 196 сторінок, у тому числі 71 рисунок, 11 таблиць, 130 сторінок друкарського тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі надається характеристика дисертаційної роботи, обґрунтовується актуальність теми, її наукова новизна та практична цінність, сформульовані мета та основні задачі досліджень, які пов'язані з науковими програмами та планами.

В першому розділі надається характеристика стану проблеми на підставі огляду публікацій, пов'язаних з темою даної роботи.

Розглянуті теоретичні підходи та методи розрахунку тривалої міцності елементів машинобудівних конструкцій, постановки нелінійних плоских задач та окремі результати по повзучості плоских тіл з вирізами, плоскі та осесиметричні задачі теорії повзучості з пошкодженням матеріалу. Зазначено, що розв'язок початково-крайових задач повзучості виконується за допомогою сучасних чисельних методів, серед яких найбільш універсальним є метод скінчених елементів. Відсутні результати систематичного вивчення процесів взаємодії повзучості та руйнування при статичних та циклічних навантаженнях, зокрема при динамічній повзучості.

Одержані висновки дозволили сформулювати основні цілі та задачі даної дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений постановці та методу розрахунку початково-крайових задач повзучості з руйнуванням статично та динамічно навантажених тіл складної геометрії, в яких реалізується плоско-напружений або плоско-деформований стан.

На підставі загальної схеми розв'язків початково-крайових задач повзучості циклічно навантажених тіл за методом асимптотичних розкладів двох масштабів за часом задача зведена до розв'язання двох початково-крайових задач. Перша з них відповідає задачі термповзучості, що розвивається у масштабі "повільного часу" з початковими умовами, отриманими на підставі пружного деформування тіла при статичному навантаженні (збережені

загально визначені позначення):

$$\sigma_{i,j,j}^0 + r_i = \rho \dot{u}_i^0; \quad \dot{\varepsilon}_{i,j}^0 = C_{ijkl} \dot{\sigma}_{kl}^0 + \alpha_{ij} \Delta T + \dot{c}_{ij}^0;$$

$$\sigma_{i,j}^0 n_j = P_{i,n}^0; \quad \varepsilon_{i,j}^0 = 1/2 (u_{i,j}^0 + u_{j,i}^0); \quad (1)$$

$$u_i = u_i^*/s_i;$$

$$u_i^0(x_1, x_2, 0) = u_{i,0}(x_1, x_2);$$

$$u_i^0(x_1, x_2, 0) = c_{i,j}^0(x_1, x_2, 0) = 0.$$

Друга система, з точністю до нехтування другого ступеню малого параметра μ , відповідає вимушеним коливанням пружного тіла під дією гармонійного навантаження $P_i^1 = P_{i,*}^1 \varphi(\xi)$, та має вигляд:

$$\sigma_{i,j,j}^1 = \rho \dot{u}_{i,j}^1 \xi \xi; \quad \varepsilon_{i,j}^1 = \frac{1}{2} (u_{i,j}^1 + u_{j,i}^1) = C_{ijkl} \sigma_{kl}^1;$$

$$\sigma_{i,j}^1 n_j = P_{i,n}^1 \varphi(\xi); \quad u_i^1 = 0/s_i; \quad (2)$$

$$u_i^1(x_1, x_2, 0) = \dot{u}_i^1(x_1, x_2, 0) = 0.$$

У масштабі "швидкого часу" ξ : $\langle \sigma^1 \rangle = \langle u^1 \rangle = \langle c^1 \rangle = 0$, де $\langle (*) \rangle = \int_0^{2\pi} (*) d\xi$, $\xi = t/\mu$, μ - малий параметр.

Після розподілу змінних по координатах та за часом ξ : $\sigma_{i,j}^1 = \sigma_{i,j,*}^1(x_1, x_2) \varphi(\xi)$, $u_i^1 = u_{i,*}^1(x_1, x_2) \varphi(\xi)$, система (2) перетворюється у крайову задачу для амплітудних значень "швидких" невідомих:

$$\sigma_{i,j,*}^1 + \Omega^2 \rho u_{i,*}^1 = 0; \quad \frac{1}{2} (u_{i,*}^1 + u_{j,*}^1) = C_{ijkl} \sigma_{kl,*}^1;$$

$$\sigma_{i,j,*}^1 n_j = P_{i,n,*}^1; \quad u_{i,*}^1/s_i = 0. \quad (3)$$

Підкресленими складовими в (1), (2), (3) у розрахунках можливо нехтувати, розглядаючи плоскі коливання тіла вдалі від резонансу. Зауважимо, що для конкретизації системи (1) потрібно визначити тензор незворотних деформацій повзучості $c_{i,j}^0 = \langle c_{i,j} \rangle$ з залученням рішення системи (3).

При конкретизації визначального рівняння у вигляді зв'язку тензора незворотних деформацій повзучості з напруженням був використаний варіант теорії повзучості зі структурними параметрами. Після чого необхідна конкретизація набуває вигляду:

$$\dot{c}_{i,j}^0 = \frac{3}{2} \frac{c_i^0}{\sigma_i^0} S_{i,j}^0;$$

$$\dot{\sigma}_i^0 = \Lambda(\sigma_i^0, \omega) F(\sigma_i^0) H(A); \quad \dot{\omega}^0 = Q(\sigma_0^0) G(A); \quad (4)$$

$$\omega^0(0) = \sigma^0(0) = 0; \quad \omega^0(t_c) = 1,$$

де $H(A) = \int_0^1 F(1+A(t)\phi(\xi))d\xi$, $G(A) = \int_0^1 Q(1+A(t)\phi(\xi))d\xi$, $A(t) = \sigma_{i,j}^1 / \sigma_i^0$ - коефіцієнт асиметрії циклу напруження, $\sigma_i^1 = (2/3 S_{i,j}^1 S_{i,j}^1)^{1/2}$, $\sigma_i^0 = (2/3 S_{i,j}^0 S_{i,j}^0)^{1/2}$ - інтенсивності відповідних напружень, $\sigma_0 = \alpha \sigma_1 + (1-\alpha)\sigma_i$ - еквівалентне напруження, t_c - час закінчення прихованого руйнування. У разі відсутності осциляційної складової навантаження, $A=0$, співвідношення (4) становлять звичайні співвідношення теорії повзучості, що враховують руйнування внаслідок повзучості. Система рівнянь (1) разом з (4) за певною конкретизацією усіх функцій й параметрів цілком визначає початково-крайову задачу повзучості основного "повільного" руху плоских тіл при накладених осциляціях.

Для розв'язку сформульованих задач повзучості використаний метод скінчених елементів (МСЕ). Прийнят трьохвузловий плоский скінчений елемент з лінійною апроксимацією переміщень. Задача повзучості плоского тіла, що відповідає (1) та (4), звалась до розв'язку системи диференціальних рівнянь:

$$[K] \dot{u} = \dot{F} + \dot{F}_c, \quad (5)$$

де $[K]$ - глобальна матриця жорсткості системи; \dot{u} - вектор швидкостей переміщень вузлів дискретизованого тіла; \dot{F} - вектор швидкостей вузлових навантажень; \dot{F}_c - вектор швидкостей додаткових навантажень, що підраховується по компонентах тензора швидкостей незворотних деформацій повзучості $\dot{\sigma}^0$. Початкові умови визначаються розв'язком відповідної задачі о пружному деформуванні тіла при статичному навантаженні та задачі о вимушених пружних плоских коливаннях тіла.

Для розв'язку системи (3) за допомогою МСЕ отримані рівняння:

$$([K] - \rho \Omega^2 [M_*]) u_*^1 = R_*, \quad (6)$$

де $([K] - \rho \Omega^2 [M_*])$ - матриця, що співпадає з матрицею динамічної

жорсткості; R_* - вектор, що підраховується по амплітудних значеннях гармонійної складової поверхневого навантаження. За значенням u_*^1 визначаються σ_*^1 , а також для кожного скінченного елемента - коефіцієнт $A(x_1, x_2, t) = \sigma_*^1(x_1, x_2) / \sigma_1^0(x_1, x_2)$ для процесу повзучості, що повільно змінюється у часі.

На кожному кроці за часом повзучості за допомогою методу Холєцького визначаються швидкості \dot{u} з системи лінійних рівнянь (5) з незмінною для даної задачі матрицею жорсткості та змінною правою частиною. Для інтегрування невідомих задачі використаний метод прогнозу-корекції третього порядку. Система рівнянь (6) розв'язувалась за допомогою модифікованого фронтального методу, призначеного для проведення розрахунків з дійсними матрицями.

У третьому розділі розглянуті чисельні дослідження.

З метою встановлення точності та ефективності запропонованої в роботі методіки, розроблених алгоритмів та програмних засобів розглянуті тестові задачі, чисельні або аналітичні розв'язки яких відомі. У тестових прикладах вивчалась повзучість та довготривала міцність пластин при розтязі та сгині. Проведені тестові розрахунки свідчать про високу адекватність моделей, методів та алгоритмів розрахунку, програмного забезпечення, що дозволяє виконувати дослідження в більш складних випадках повзучості плоских тіл.

Подальші дослідження присвячені впливу спільної дії статичного та циклічного навантаження на повзучість пластин при розтязі за законом $S = S_0 + S_a \sin \Omega t$, де S_0 , S_a - стала та амплітудна складові зовнішнього навантаження. Встановлено, що суттєвий вплив на кількісні дані динамічної повзучості має характер навантаження: рівень $A = S_a / S_0$ - коефіцієнта асиметрії циклу - зовнішнього навантаження та частота Ω циклічної складової навантаження. В інтервалі Ω до першої власної частоти більш впливовою на значення

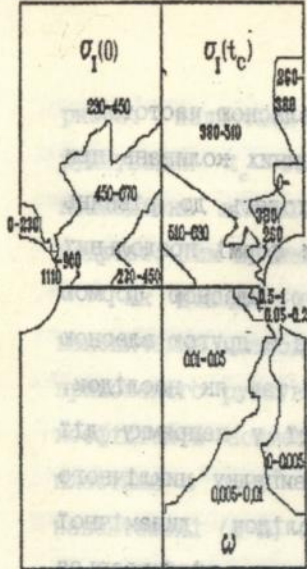


Рис. 1

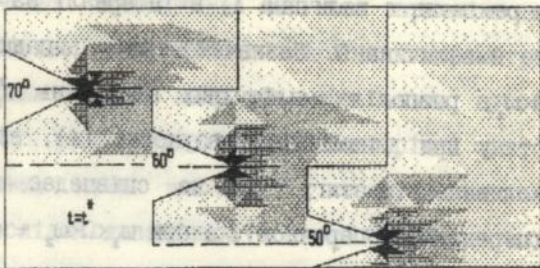


Рис. 2

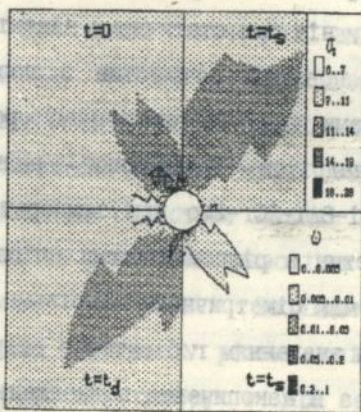


Рис. 3

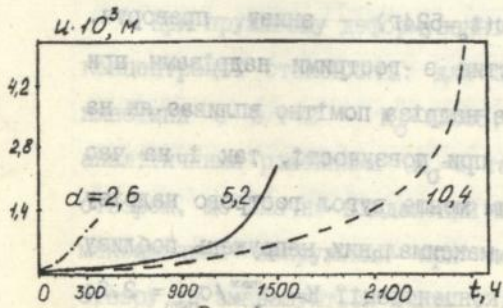


Рис. 4

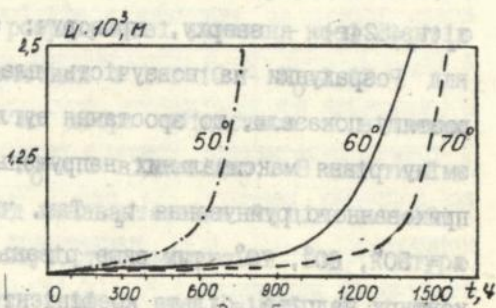


Рис. 5

перемішень є величина A , в інтервалі за першою власною частотою — це й величина Ω . Зазначимо, що у випадку вимушених коливань при $\Omega < \omega_1$, розподіл амплітудних напружень σ^* , що входять до рівнянь стану при динамічній повзучості (4), відповідає формі продольних коливань (розтягу) та не співпадає з першою власною формою (переважно поперечною), а при $\omega_1 < \Omega < \omega_2$ — співпадає з другою власною формою вільних коливань (переважно продольною) та, як наслідок, пластина опиняється довантаженою силами інерції у напрямку дії сталої складової зовнішніх сил. Між іншим, у випадку циклічного навантаження не тільки формозмінення внаслідок динамічної повзучості, а й процес перерозподілу напружень відбувається суттєво інтенсивніше, ніж при статичному навантаженні.

Далі вивчалась повзучість пластин з гострими та круговими симетричними надрізами при їх статичному розтязі у напрямку, поперечному лінії надрізів. Розрахунки виконані для пластин з титанового сплаву Ti-6Al-2Cr-2Mo при температурі 675K.

Розрахунки пластин з різноманітними співвідношеннями радіусу надріза до відстані між симетричними надрізами $d=H-2r$ доводять, що в пластинах з різним значенням r/d суттєво відрізняються не тільки розподіл напружень, а й накопичення пошкоджень та час прихованого руйнування t_c . На рис.1. для пластини з круговими надрізами при $r/d=1/5.2$ представлені рівні: $\sigma_x(t=0)$ — зверху, ліворуч; $\sigma_x(t_c=524г)$ — зверху, праворуч; $\omega(t_c=524г)$ — знизу, праворуч.

Розрахунки на повзучість пластин з гострими надрізами при розтягу показали, що зростання вугла надріза помітно впливає як на зміну рівня максимальних напружень при повзучості, так і на час прихованого руйнування t_c . Так, чим менше вугол гострого надрізу $\alpha = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$, тим вище рівень максимальних напружень поблизу контуру надріза, більше коефіцієнт концентрації $K = \sigma_{\max}^* / \sigma_{ном} = 2.2; 2.096, 2.085$ та менш час $t_c = 160г, 191г, 198г$, відповідно. На

рис.2. надається накопичення пошкоджень за час прихованого руйнування t_c біля надрізів, максимальні значення параметра пошкоджень локалізовані біля вершин надрізів. Чим менше вугол надріза, тим на меншу область розповсюджуються суттєві рівні ω .

Як доводять розрахунки, вплив циклічного навантаження на накопичення пошкоджень внаслідок динамічної повзучості та на час прихованого руйнування є суттєвим та залежить від величини A - коефіцієнта асиметрії цикла зовнішнього навантаження. Так, для пластини з $\alpha=60^\circ$ встановлений час до руйнування при статичному навантаженні ($A=0$) становить $t_c=191г$, в умовах циклічної повзучості при $A=0.25$ - вже дорівнює $109г$, при $A=0.3$ - $88.5г$, а при $A=0.5$ - $59г$. Отже, навіть при малих значеннях амплітудних складових циклічного навантаження, необхідно враховувати його вплив на повзучість, що підвищить адекватність оцінок міцності.

Довговічність багатьох деталей машин залежить від процесів деформування в послаблених областях. Подалі в роботі досліджено концентрацію напружень та руйнування внаслідок повзучості пластин, послаблених круговими отворами. Досліджено повзучість з руйнуванням прямокутних пластин з різним співвідношенням сторін a/b та однаковим радіусом отвору r при статичному розтягу. Матеріал пластин - сталь ЭИ-481, що використовується при виготовленні турбінних дисків та деталей газових турбін.

При пружному деформуванні розрахункові значення коефіцієнтів концентрації становлять: для пластини з $b/r=10$ - $K_O=2.92$, для пластини з $b/r=2$ - $K_O=4.065$, що добре збігається з відомими аналітичними рішеннями ($K_O=3$ та $K_O=4.3$ відповідно). В пластині з отвором, що значно віддалений від ненавантажених торців ($b/r=10$), максимальні напруження при повзучості зніщуються від контура отвору та зменшуються майже у два рази за час $t_c=1686г$ ($K_O=1.46$). При наблизненні отвору до торців ($b/r=2$), час до руйнування при

тому ж навантаженні скорочується до $t_c=58.5г$, коефіцієнт концентрації напружень при повзучості залишається високим ($K_G=2.3$) та зберігається суттєво неоднорідне поле напружень пластини. Максимальні значення параметра пошкоджень в обох випадках до моменту $t=t_c$ локалізуються біля точок перетинення контурів вирізів с віссю симетрії, нормальною до напрямку розтягу. Зазначимо, що руйнування пластин за розрахунковими даними починається на деякій відстані від контуру отвору.

Встановлено, що час прихованого руйнування пластин, послаблених отворами, залежить не тільки від первісного рівня напружень, а й від відстані до ненавантажених торців. Так, для пластини з $b/r=2$ - $t_c=1114г$, що на третину менш, ніж для пластини, отвор якої віддалений від ненавантажених торців ($b/r=10$, $t_c=1686г$) при однаковому первісному рівні максимальних напружень.

При використанні еквівалентного напруження у кінетичному рівнянні для пошкоджень $\sigma_e = \alpha\sigma_1 + (1-\alpha)\sigma_2$, $\alpha \in [0,1]$, із зростанням α зменшується й час до руйнування. Так для пластин $a/b=10$ при $\alpha=0$ - $t_c=1686г$, $\alpha=0.5$ - $t_c=1345г$, $\alpha=1$ - $t_c=1070г$.

У подальшому досліджено вплив циклічного навантаження на повзучість та руйнування пластини з круговим отвором. Розрахунки доводять, що циклічне навантаження (рівень S_n та значення Ω) суттєвим чином впливають на час до прихованого руйнування. Встановлено, що значення коефіцієнтів асиметрії цикла напружень $A_i(x_1, x_2, t) = \sigma_i^m / \sigma_1^m$ в розглянутому випадку розподілені неоднорідно. З часом ця неоднорідність стає помітною та прагне до локалізації у точках перетинення контура отвору з віссю симетрії, нормальною до напрямку розтягу. На рис.3. надані розподіли інтенсивностей напружень $\sigma_i \cdot 10^{-3}$, МПа наприкінці прихованого руйнування при статичному навантаженні $P_0=100$ МПа ($t_c=1686г$ - зверху, праворуч) та при накладенні циклічної складової $P_n=0.25P_0$ з частотою, що

наближена до другої власної ($t_c=145\text{r}$ - знизу, ліворуч) у порівнянні з первісним станом ($t=0$ - зверху, ліворуч), а також розподіл параметру пошкоджень ω .

У таблиці 1 наведені розрахункові дані часу прихованого руйнування t_c при циклічному навантаженні та статичному розтязі максимальним навантаженням за циклом: $S=S_0(1+A)$. Зауважимо, що незначна за рівнем складова циклічного навантаження ($A=0.25$) у діапазоні частот $0 < \Omega < \omega_1$ скорочує час до руйнування приблизно у 2.5 рази, а при вищому її рівні ($A=0.4$) з цього ж діапазону частот - вже в шість разів, в порівнянні зі статичним навантаженням ($A=0$). В інтервалі частот до першої власної частоти більший вплив на скорочення t_c чинить величина A , а в інтервалі за нею - нарівні з A й частота Ω . Чим ближче Ω до другої власної частоти, тим більше скорочується час t_c . Заміна циклічного навантаження статичним з максимальним його значенням за циклом, знижує значення часу прихованого руйнування порівняно з динамічною повзучістю при частотах циклічного навантаження нижче другої власної ($k = 1/3, 1/2$), а при $k=2/3$ - завищує у порівнянні з відповідними розрахунковими даними динамічної повзучості.

Таблиця 1.

A	$S = S_0 (1+A)$	$S = S_0 (1+A \sin \Omega t)$		
	t_c, r	Ω	k	t_c, r
0	1686			
0.25	210	$\Omega = k\omega_1$	1/3	691
			1/2	673
			2/3	647
		$\Omega = \omega_1 + k(\omega_2 - \omega_1)$	1/3	357
			1/2	256
			2/3	145
0.4	63	$\Omega = k\omega_1$	1/3	285
			1/2	272
			2/3	255
		$\Omega = \omega_1 + k(\omega_2 - \omega_1)$	1/3	111
			1/2	68
			2/3	29

Час повного руйнування розглянутих пластин значно більше, ніж час їх прихованого руйнування. У роботі запропоновані наближені методи чисельного аналізу розповсюдження фронту руйнування на прикладі пластин з надрізами. Час повного руйнування t_{cr} можна визначити, вивчаючи розвиток щілиноутворення в тілі після закінчення прихованого руйнування. Наближений опис процесу макроруйнування при $t > t_0$ виконано шляхом введення фронту руйнування, що рухається. Припускається, що у момент $t = t_c$ коли $\omega = \omega_*$, створюється фронт руйнування. У цей час в області, де приховане руйнування завершено, нестійкість мікропошкоджень веде до процесу злиття останніх у макропошкодження — дрібні щілини, що мають розсіяний характер. Таке щілиноутворення продовжує процес руйнування та завершується повним руйнуванням пластини. При цьому $t_{cr} = t_c + t_{fr}$, де t_{fr} — час розповсюдження фронту руйнування. Для останнього наведено рівняння:

$$\left[1 - \omega_c(u(\tau)) \right]^{n+1} = (n+1) \int_0^\tau V \sigma_e^n(\tau', u(\tau')) d\tau', \quad (7)$$

де $u(t)$ — параметр фронту руйнування; $\omega_c(u(\tau)) = \omega(t_c, x_*)$ — розподіл пошкоджень у пластині вздовж координати x_1 , нормальній до лінії фронту, який підраховується у момент завершення прихованого руйнування t_c ; $x_*(x_{1*} + u(\tau), x_{2*}(t_c))$ — координати, що визначають фронт руйнування; $0 \leq \tau \leq t_{fr}$ — час руху фронту руйнування; $\sigma_e(\tau', u(\tau))$ — еквівалентне напруження, що змінюється за часом $0 \leq \tau' \leq \tau$ внаслідок повзучості при руйнуванні (щілиноутворенні). Інтегрування (7) відносно параметру фронту $u(\tau)$ виконувалось методом чисельного інтегрування Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичним вибором кроку за часом. На рис. 4, 5 проілюстровано розповсюдження за часом фронту щілини в пластинах з гострими та круговими надрізами

Порівняні дані розрахункових значень t_c , t_{fr} , t_{cr} пластин з різними типами надрізів та співвідношеннями конструктивних

параметрів наведені у таблиці 2. Тривалість руйнування за умови суттєвої неоднородності н.д.с. при концентрації напружень біля надрізів виявляється значною. Про це свідчать розрахунки та експериментальні дані (Walczak J, Sieniawski J, Bathe K, 1983).

Таблиця 2

Тип надрізу	Конструктивні параметри		Час руйнування, год.			Експеримент
			t_c	t_{lr}	t_{cr}	
Кругові надрізи	r/d	1/2.6	336	337	713	2120
		1/5.2	524	1482	2006	
		1/10.4	504	2663	3167	
Гострі надрізи	α°	50°	160	789	949	1760
		60°	191	1428	1619	
		70°	198	1577	1775	

Четвертий розділ присвячений прикладним задачам повзучості та довготривалої міцності елементів енергетичних машин. Ці дослідження особливо актуальні для енергомашинобудування у зв'язку з підвищенням потужності турбоагрегатів й ускладненням умов їх експлуатації. Відомі випадки руйнування вузлів та агрегатів у турбінобудуванні за підстави недовершеності їх розрахунків на довготривалу міцність. Запропонований метод розрахунку на довготривалу міцність базується на сучасних уявленнях про повзучість та руйнування тіл та поширює можливості розрахунків щодо високочастотного циклічного навантаження.

У роботі виконані чисельні дослідження по повзучості та руйнуванню ялинкового з'єднання лопатки другого ступеня турбореактивного двигуна. Розглянуто випадок статичного навантаження центробіжними зусиллями. Встановлено, що у початковий момент часу найбільші значення осевих та окружних напружень на контурі мають місце поблизу переходу від радіусної ділянки западини до прямолінійної робочої грані першого зубу, рахуючи від

кореню лопатки. В усіх зуб'ях максимальні напруження локалізуються на деякій відстані від дна западини, а по мірі віддалення від кореню лопатки їх значення зменшуються. Внаслідок повзучості до моменту її встановлення спостерігається зниження рівня максимальних напружень у западинах усіх зуб'їв.

Розрахунками встановлено час до завершення прихованого руйнування: $t_c = 6760 \text{г}$. На рис.6 надається розподіл інтенсивності напружень $\sigma \cdot 10^{-3}, \text{МПа}$: праворуч - при $t = 0$, ліворуч - при $t = t_c$. Накопичення пошкоджень відбувається при суттєвому перерозподілі напружень у тілі замка до $t = t_c$, що не відповідає розподілу сталих напружень повзучості, як це припускається.

Руйнування з'єднання починається у западині першого зуба, де найбільшого значення набуває параметр пошкоджень $\omega_{\text{max}} = 0.994$. Розрахований час розповсюдження фронту руйнування першого зуба, що дозволяє оцінити строк "життя" замкового з'єднання. Значення t_{fr} по відношенню до часу зародження макрощелини t_c ($t_{fr}/t_c \approx 0.4$) пояснюється як якість матеріала (значною в'язкістю), та суттєво неоднорідним розподілом напруженого стану, що зберігається при повзучості та у якому розповсюджується фронт руйнування. Розрахункові дані порівняні з висновками експериментального моделювання повзучості та руйнування замкового з'єднання, що виконані W. Siegfried у 1955р. Повного розрахункового моделювання цієї проблеми ще досі немає. Така спроба виконана у даній роботі.

При експлуатації лопатки та їх замкові з'єднання знаходяться під дією високочастотних циклічних навантажень, які у традиційних розрахунках не враховуються. В роботі розглянуті результати досліджень впливу циклічного навантаження у корені лопатки $P = P_0 + P_a \sin \Omega t$ на н.д.с., накопичення пошкоджень та руйнування внаслідок динамічної повзучості алянкового замка на підставі запропонованої у роботі методики. Розподіл $\sigma \cdot 10^{-3}, \text{МПа}$ по зуб'ях

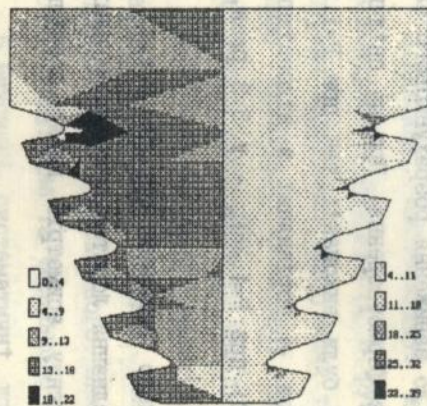


Рис. 6

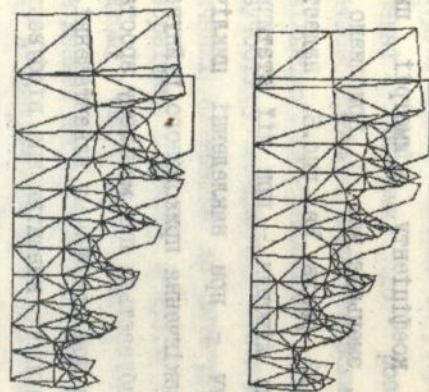


Рис. 7



$p_a=0$



$p_a=0.1p$



$p_a=0.25p$



$p_a=0.5p$

Рис. 8

при різноманітних значеннях амплітудної складової навантаження проілюстровано на рис.7. При циклічному навантаженні накладення навіть незначної амплітудної складової на відцентрові сили P_0 скорочує час t_c . Збільшення коефіцієнту асиметрії циклу навантаження, наприклад до $A=0.25$, зменшує час t_c приблизно у 3 рази, а до $A=0.5$ - майже у 12 разів. На рис.8. надається формозмінення замкового з'єднання: ліворуч - при дії статичного навантаження у час t_c , праворуч - при накладенні циклічної складової $A=0.25$. Завначимо, що закінчення прихованого руйнування при циклічному навантаженні відбувається при меншому зростанні вузлових переміщень за час t_c , ніж при статичному навантаженні. Це пояснюється тим, що в умовах циклічного навантаження відбувається більш інтенсивне накопичення пошкоджень, що скорочує час до руйнування, хоча швидкість динамічної повзучості є значно більшою, ніж статична.

Заміна розрахунків на динамічну повзучість розрахунками на статичну повзучість з навантаженням, що дорівнює максимальному його значенню за цикл, приводить до заниження розрахункового часу прихованого руйнування та завищує формотворення. Про це свідчить велика кількість розрахунків, що були виконані: так при $P=1.1P_0$ час t_c менший приблизно у 2 рази, в порівнянні з відповідними розрахунками циклічної повзучості; при $P=1.25P_0$ - у 3.3 рази, а при $P=1.5P_0$ - вже у 4.4 рази.

Таким чином, вплив циклічного навантаження на н.д.с. та міцність ялинкового замкового з'єднання лопаток турбомашин навіть при невеликих значеннях коефіцієнту асиметрії циклу зовнішніх навантажень A є досить суттєвим.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У заключній частині надані основні висновки дисертації, короткий зміст яких можна сформулювати так:

1. Розроблений метод розрахунку на повзучість та довготривалу міцність статично й циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій щодо плоских їх розрахункових схем. Метод базується на зведенні проблеми до розв'язку взаємопов'язаних двох початково-крайових задач за асимптотичним наближенням у масштабах "повільного" та "швидкого" часу. Перша з них відповідає задачі повзучості у швидкостях невідомих та зведена за схемою методу скінчених елементів до інтегрування за повільним часом систем алгебраїчних рівнянь, а друга - задачі о вимушених коливаннях у швидкому часі, яка інтегрується на підставі МСЕ. Спільне розв'язання задач, виконується на підставі запропонованих рівнянь стану з урахуванням континуальних пошкоджень внаслідок повзучості та розподілів амплітуд напружень при вимушених коливаннях.

2. Запропоновані чисельні алгоритми та програмне забезпечення щодо реалізації методу розрахунку на повзучість з руйнуванням плоских тіл, навантажених спільно діючими зовнішніми статичними та циклічними складовими поверхових сил.

3. Виконані систематичні дослідження та встановлені нові закономірності повзучості й руйнування елементів конструкцій з гострими надрізами, викружками та отворами. Отримані нові дані по впливу циклічної складової зовнішніх сил на формотворення, накопичення пошкоджень та час до руйнування.

4. Розв'язані нові задачі, в яких отримані дані часу до повного руйнування плоских тіл з концентраторами на підставі запропонованого наближеного інтегро-диференційного рівняння руху фронту руйнування та чисельного методу його розв'язання.

5. Виконані систематичні дослідження проблеми довготривалої міцності замкового з'єднання лопаток з диском на прикладі турбореактивного двигуна. На відміну від існуючих прикладних методів розрахунку у роботі враховується накопичення пошкоджень

внаслідок повзучості, рух фронту руйнування від першого зубу до другого, та вплив високочастотної циклічної складової навантаження, що спільно діє з відцентровими силами у корені лопатки. Вперше отримані на сучасних уявленнях кількісні дані по проблемі повзучості та руйнування замкових з'єднань, що дозволяє сформулювати рекомендації щодо проектування замкових з'єднань.

6. Вірогідність методів та розрахункових досліджень, висновків, сформульованих у роботі, підтверджується збігом при порівнянні у випадках, для яких раніше були отримані чисельні або експериментальні кількісні дані за рахунок інших методів.

7. Розроблені методи, результати досліджень та програмне забезпечення є придатними до впровадження у дослідницьку практику підприємств або організацій. Впровадження результатів роботи, що виконано на підставі розробленого програмного забезпечення, здійснено на підприємствах НВО "Турбоатом", АО "Світло шахтаря".

ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Григорова Г.О., Стрельченко А.И. Расчет собственных колебаний составных тел сложной формы // Тез. докл.: IV Межреспубликанская конференция "Проблемы повышения прочности элементов машиностроительных конструкций". - Харьков, 1986. - С. 16.

2. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Программные средства для проектирования машиностроительных конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях статической и динамической ползучести // Тез. докл.: Международная научно-техническая конференция: "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье", Харьков, 1993. - С. 6-8.

3. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Расчеты долговечности плоских деталей ПТМ, подверженных коррозии и проблемы материалоемкости шахтного оборудования // Тез. докл.: Научно-техническая конференция с международным участием "Проблемы

подъемно-транспортной техники", Алушта, 1993.-Секция 1.-С. 5-6.

4. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В., Бурлаенко В.Н., Морачковский О.К., Чупрынин А.А., Шипулин С.А. Пакет прикладных программ для расчетов ползучести и длительной прочности элементов машиностроительных конструкций // Тез. докл.: Международная научно-техническая конференция: "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье", Харьков, 1995, -С.18.

5. Анищенко Г.О., Морачковский О.К. Числовой анализ накопления повреждений та розповсюдження фронту руйнування внаслідок повзучості // Тези доп.: 2 Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові, 1995.-С. 32.

Summary

Anishenko G.O. The elaboration of methods for creep and damage simulation and investigation of statically and cyclically loaded power machine elements. The thesis is intended for earning the degree of candidate of technical sciences on speciality 05.02.09 - dynamics, strength of machines, devices and equipment. Kharkov State Polytechnical University, Kharkov 1996. The thesis contained theoretical and numerical creep and durable strength investigations of statically and cyclically loaded power machine elements are supported. The suggested method has been realized as a computer software which efficiency was confirmed for test and practical problems for such structural members as notched plates, plates with holes, turbine blade roots. The times of hidden and total fracture with consideration of macro-rupture front propagation were obtained. The influence of cyclic external loading components on creep and durable strength of structural members was estimated.

Аннотация

Анищенко Г.О. Разработка методов расчета и исследования ползучести с разрушением статически и циклически нагруженных элементов энергетических машин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 - динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры, Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1996. Защищается диссертация, в которой содержатся теоретические и численные исследования ползучести, длительной прочности статически и циклически нагруженных элементов энергетических машин. Предлагаемый метод реализован в комплексе алгоритмов и программ, эффективность которых подтверждена решением ряда тестовых и практических задач для деталей машин в виде пластин с надрезами и отверстиями, замковых соединений лопаток турбомашин. Определяются времена скрытого и полного их разрушения с учетом распространения фронта макроразрушения. Оценено влияние циклической составляющей внешнего нагружения на ползучесть и длительную прочность конструктивных элементов.

Ключові слова: циклічне навантаження, повзучість, руйнування, метод скінченних елементів, розрахунок конструкцій.

Підп. до друку 22.03.96. Формат 60x84/16. Папір друк.
Ум. друк. арк. 1.0. Тираж 100. Зам. 16-10.

Харківський державний політехнічний університет,
редакційно-видавничий відділ.
Надруковано на ризографі ХДПУ.
310002, м.Харків, вул. Фрунзе, 21.

AB 34.419