

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Пасинок Максим Олександрович

УДК 539.3

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ НА АНІЗОТРОПНУ
ПОВЗУЧІСТЬ З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖЕНОСТІ ПЛОСКИХ
КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН**

Спеціальність 05.02.09 - Динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2000

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Теоретична механіка» Харківського державного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор,
Морачковський Олег Костянтинович,
Харківський державний політехнічний університет,
завідувач кафедри «Теоретична механіка».

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор,
Пошивалов Володимир Павлович,
Інститут технічної механіки НАН України,
м. Дніпропетровськ, провідний науковий
співробітник відділу надійності та довговічності
конструкцій;

кандидат технічних наук, доцент,
Романенко Леонід Григорович,
Харківський державний автомобільно-дорожній технічний університет,
доцент кафедри «Теоретична механіка та гідравліка»

Провідна установа - Інститут проблем машинобудування НАН України
ім. А.М.Підгорного; м. Харків;
відділ міцності тонкостінних конструкцій.

Захист відбудеться «26» квітня 2000 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Харківському державному політехнічному університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий «22» березня 2000 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Бортовой В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У світовому сучасному авіаційному, космічному й енергетичному машинобудуванні широко впроваджуються нові конструкційні матеріали, у тому числі металеві композитні сплави. Така тенденція найбільше характерна для країн дальнього зарубіжжя (Англії, Німеччини, Франції та ін.) і пояснюється як обмеженістю традиційних матеріалів у задоволенні вимог до нової високотемпературної техніки, так і широкою можливістю сучасних технологій до створення конструкційних матеріалів із заданими властивостями.

Водночас у теоретичних розробках з механіки композитних матеріалів і конструкцій сьогодні практично відсутні адекватні моделі й методи розрахунків на повзучість і тривалу міцність елементів конструкцій з композитних матеріалів, що дозволяє розробки за темою роботи вважати актуальними у науковому відношенні. Типовими властивостями нових матеріалів, як, утім, і поширених в авіаційному, космічному й енергетичному машинобудуванні конструкційних матеріалів, є: по-перше, - анізотропія властивостей повзучості і довготривалої міцності, а по-друге, - істотна їх неоднорідність. В елементах конструкцій це пояснюється технологіями їхнього виготовлення й неоднорідністю напруженого стану. Існуючі методи розрахунку, у тому числі і реалізовані в закордонних комерційних пакетах для ЕОМ, не дозволяють враховувати початкову анізотропію і неоднорідність тіл у розрахунках на повзучість і тривалу міцність. Таким чином, розробки за темою дисертації мають важливе практичне значення для проектування нової техніки. Отже, тема роботи актуальна у науковому та прикладному відношенні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках державної науково-технічної програми Міністерства освіти України з теми, що виконується в Харківському державному політехнічному університеті: «Побудова теоретичних основ розрахунків нелінійної повзучості та руйнування деформованих тіл за умови дії зовнішніх швидко осцилюючих полів навантаження» у 1997-99 р. р. (тема М1002 за наказом Міністерства освіти України №37 від 13.02.97 р., № Д.Р. 0197U001933).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є побудова теоретично й експериментально обґрунтованих моделей анізотропної повзучості з урахуванням пошкоджень матеріалів; розробка методів розрахунку на повзучість і довготривалу міцність трансверсально-ізотропних плоских тіл і створення програмного забезпечення до розрахунків деформування та прогнозування часу до руйнування цих тіл при повзучості; установлення закономірностей повзучості і руйнування анізотропних плоских тіл і їхньої залежності від ступеня анізотропії, орієнтації головних осей анізотропії, попередньої повзучості та інших факторів; розв'язання прикладних задач повзучості плоских елементів конструкцій з концентрацією напруження й пошкоджень поряд з малими отворами, а також

задач повзучості лопаток газотурбінних двигунів із металевих композитних матеріалів, що мають важливе значення для реакторного й енергетичного машинобудування.

Наукова новизна одержаних результатів. Новими науковими результатами, одержаними особисто автором, в роботі є:

- новий варіант визначальних рівнянь анізотропної повзучості трансверсально-ізотропних матеріалів з урахуванням пошкоджень за їх тензорною мірою;
- чисельний метод і алгоритм розрахунку на повзучість і довготривалу міцність трансверсально-ізотропних плоских елементів конструкцій;
- установлені чисельно нові закономірності анізотропної повзучості й руйнування плоских елементів конструкцій з концентрацією напруження й пошкоджень поряд з малими отворами.

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

- створеному методі розрахунку на анізотропну повзучість і довготривалу міцність плоских тіл;
- реалізованому програмному забезпеченні для виконання розрахунків на анізотропну повзучість плоских тіл, що дозволяє ефективно вирішувати проблеми повзучості і прогнозувати експлуатаційні якості широкого класу конструктивних елементів машин на етапі проектування;
- отриманих закономірностях з анізотропної повзучості й руйнування плоских елементів конструкцій з концентрацією напруження й пошкоджень поряд з малими отворами та повзучості лопаток газотурбінних двигунів із металевих композитних матеріалів, що мають важливу практичну цінність для реакторного й енергетичного машинобудування.
- висновках та рекомендаціях, що використанні у ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» при створенні проектів для нової реакторної техніки й у наданих результатах до науково-дослідницької роботи, що виконана у Харківському державному політехнічному університеті за координаційним планом державної науково-технічної програми Міністерства освіти України.

Особистий внесок здобувача полягає у наступному:

- автором розроблено новий варіант рівнянь стану повзучості матеріалів з початковою анізотропією, методика, алгоритм та програмне забезпечення для чисельного розв'язання задач анізотропної повзучості й довготривалої міцності плоских елементів конструкцій;
- виконано розрахунки за дослідженням з достовірності рівнянь стану з експериментальним їх обґрунтуванням та з тестування програмних розрахунків з порівнянням для окремих прикладів з відомими даними;
- отримано закономірності з анізотропної повзучості у плоских тілах та надано рекомендації до використання анізотропних матеріалів при повзучості з метою підвищення терміну експлуатації конструктивних елементів машин;

– встановлено закономірності повзучості трансверсально-ізотропних при повзучості пластин з малим отвором при плоскому розтязі й вигині, виконано розрахунки на повзучість робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати, наведені у дисертаційній роботі, були розглянуті та обговорювалися на наукових конференціях: «Информационные технологии, наука, техника, технология, образование, здоровье (MicroCad-System)», Харків, 1997-1998 рр.; 1-й міській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми сучасної науки у дослідженнях молодих вчених м. Харкова», Харків, 1997 р.; 6 th International Symposium on Creep and Coupled Processes, Bialowieza, Poland, 1998 р.; наукових семінарах кафедр «Динаміка та міцність машин» і «Теоретична механіка» ХДПУ, 1997-2000 рр.

Публікації. За результатами досліджень, наведених у дисертаційній роботі, опубліковано 8 наукових робіт, із них 6 статей і матеріали 2-х доповідей на науково-технічних конференціях.

Вірогідність та обґрунтованість висновків, отриманих при чисельних дослідженнях на основі створеного у роботі методу розрахунку та розробленого програмного забезпечення, підтверджена задовільною відповідністю отриманих результатів відомим аналітичним або чисельним даним для тестових прикладів, та експериментальним даним з повзучості анізотропних матеріалів.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел із 116 найменувань, 2 додатків, 71 рисунків, 14 таблиць. Загальний обсяг роботи - 193 сторінки, серед них - 122 сторінки друкованого тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано наукову актуальність та практичну цінність теми у зв'язку з потребою в розробці нових алгоритмів і програм для розрахунків анізотропної повзучості та довготривалої міцності плоских елементів відповідальних машинобудівних конструкцій. Визначено мету та задачі досліджень, надано дані з науково-технічної теми, у рамках якої виконувалася робота, а також наведено кваліфікаційні ознаки дисертації.

У **першому розділі** надано оцінку стану досліджень за темою дисертації на основі огляду літературних джерел, у якому обговорені результати проведених за кордоном і в Україні наукових досліджень у напрямку анізотропної повзучості матеріалів і конструкцій. Сформульовано основну мету і задачі нових досліджень, обґрунтовано їхню новизну і практичну цінність.

У **другому розділі** надано повну систему рівнянь для плоских початково-крайових задач теорії анізотропної повзучості на підставі загальних тензорно - лінійних рівнянь стану теорії повзучості ортотропних матеріалів. Прийнято, що пружні та незворотні деформації повзучості є ма-

лими, і повні деформації є їхньою сумою. Зв'язок пружних деформацій з напруженнями відповідає рівнянням теорії пружності ортотропних матеріалів, а лінійні переміщення пов'язані співвідношеннями Коші з повними деформаціями. Сформульовано варіаційну постановку плоских задач анізотропної повзучості тіл на підставі варіаційного функціоналу

$$J = \int_V \left(\frac{1}{2} \underline{\dot{\epsilon}}^T \underline{D} \underline{\dot{\epsilon}} - \underline{\dot{\epsilon}}^T \underline{\dot{\sigma}}^* \right) dV - \int_{S_1} \underline{\dot{u}}^T \underline{p} dS \quad (1)$$

та принципу Сандерса - Мак Комба -Шлехте. Рівняннями Ейлера для функціоналу (1), якщо виконані між відповідними швидкостями геометричні співвідношення та узагальнений закон Гуку з додатковими напруженнями від деформацій повзучості $\underline{\dot{\sigma}}^*$, є рівняння рівноваги в швидкостях переміщення.

На базі методу скінчених елементів у сполученні з методами покрокового інтегрування початкових задач у часі запропоновано алгоритми для виконання розрахунків на анізотропну повзучість плоских тіл.

Із застосуванням фізичних співвідношень у вигляді

$$\underline{\dot{\sigma}}^\beta = \Phi \underline{\epsilon}^\beta - \underline{\dot{\epsilon}}_T^\beta - \underline{\dot{c}}^\beta, \quad (2)$$

та за використанням симплекс - триангуляції МСЕ для плоских тіл отримано систему диференціальних рівнянь відносно глобального вектора переміщення вузлів $\underline{\delta}$ у вигляді

$$\mathbb{K} \underline{\dot{\delta}} = \underline{\dot{F}} + \underline{\dot{F}}_c. \quad (3)$$

У співвідношеннях (1-3) застосовано загальноприйняті означення векторних та матричних величин і позначено швидкості напруження та повної, теплової й незворотної внаслідок повзучості деформації $\underline{\dot{\sigma}}^\beta, \underline{\dot{\epsilon}}^\beta, \underline{\dot{\epsilon}}_T^\beta, \underline{\dot{c}}^\beta$ в елементі об'ємом $h\Delta_e$. Матриці жорсткості та вектори вузлових сил підраховуються за формулами:

$$\mathbb{K} = \sum_e \int_{V^e} \mathbb{B}^T \Phi \underline{B} dV, \quad \underline{\dot{F}} = \sum_e \underline{N}^T \int_{\Sigma_2^e} \underline{p} d\Sigma, \quad \underline{\dot{F}}_c = \sum_e \underline{B}^T \underline{D} \underline{\epsilon}_T + \underline{\dot{c}} h\Delta_e,$$

в яких позначено: $[B], [D]$ - матриці кінематичних та фізичних рівнянь, елементи яких підраховуються відповідно до випадків плоского напруженого або деформованого стану, $[N]$ - вектор функцій форм, \underline{p} - вектор поверхового навантаження. Рівняння стану для анізотропної повзучості конкретизовані у наступних розділах роботи з урахуванням накопичення прихованих пошкоджень

унаслідок повзучості.

Докладно розглянуто засоби реалізації основних етапів розрахунків і конкретизовано методи для чисельного інтегрування у часі рівнянь (3) та визначальних рівнянь стану за схемою прогнозу - корекції третього порядку. За цим алгоритмом на першому кроці τ_1 обчислюємо

$$(\underline{\delta}, \underline{\sigma}, \underline{\omega})^{1-} = (\underline{\delta}, \underline{\sigma}, \underline{\omega})^{0-} + \tau_1 (\dot{\underline{\delta}}, \dot{\underline{\omega}}, \dot{\underline{\sigma}})^{1-}.$$

Далі за прогнозом та корекцією на кроці τ_{k+1} розраховуємо величини

$$\begin{aligned} (\underline{\delta}, \underline{\sigma}, \underline{\omega})^{k+1-} &= (\underline{\delta}, \underline{\sigma}, \underline{\omega})^{k-1-} + 2\tau_k (\dot{\underline{\delta}}, \dot{\underline{\omega}}, \dot{\underline{\sigma}})^{k-}, \\ (\bar{\underline{\delta}}, \bar{\underline{\sigma}}, \bar{\underline{\omega}})^{k+1-} &= (\underline{\delta}, \underline{\sigma}, \underline{\omega})^{k-} + \frac{\tau_k}{2} \left((\dot{\underline{\delta}}, \dot{\underline{\sigma}}, \dot{\underline{\omega}})^{k-} + (\bar{\underline{\delta}}, \bar{\underline{\sigma}}, \bar{\underline{\omega}})^{k+1-} \right). \end{aligned}$$

На цій підставі обчислюємо кінцевий результат на кроці τ_{k+1} :

$$(\underline{\delta}, \underline{\sigma}, \underline{\omega})^{k+1-} = (\bar{\underline{\delta}}, \bar{\underline{\sigma}}, \bar{\underline{\omega}})^{k+1-} + \alpha \left((\underline{\delta}, \underline{\sigma}, \underline{\omega})^{k+1-} - (\bar{\underline{\delta}}, \bar{\underline{\sigma}}, \bar{\underline{\omega}})^{k+1-} \right), \quad (4)$$

з автоматичним вибором кроку. Розрахунками у подальшому в роботі встановлено, що ефективно за витратами часу на розрахунки значення параметру α у (4) дорівнює 0.2.

Для підрахунку елементів матриць жорсткостей і компонент векторів навантажень, зокрема, і тих, що обчислюються за даними про незворотні деформації анізотропної повзучості з урахуванням накопичених пошкоджень застосовано спеціальні алгоритми. При розв'язанні системи (3) відносно $\dot{\underline{\delta}}$ використано метод Холецького.

Розглянуто структуру і складові компоненти програмного комплексу, що реалізує подані у цьому розділі методи й алгоритми обчислень.

У третьому розділі надано моделі повзучості та пошкодження для початково - ортотропних та, зокрема, трансверсально-ізотропних при повзучості матеріалів.

Пошкодження у роботі модельовано тензором 2-го рангу, відповідно до фізичного уявлення про орієнтованість поверхневих мікрощілин, об'ємних кавітацій (пор), тощо. Базовою гіпотезою ізотропних та анізотропних моделей континуальної механіки пошкодження є припущення, за яким нехтують мікроскопічними деталями, та усереднене в об'ємі пошкодження розглядається як внутрішній параметр стану. Континуальна механіка пошкодження побудована на базі незворотної термодинаміки та утворює систематичний підхід до моделювання повзучості з урахуванням пошкодження унаслідок повзучості матеріалів. За цим підходом кінетичні рівняння еволюції деформацій повзучості та пошкодження отримують за градієнтним законом до відповідних дисипативних потенціалів. Дисипація, що відповідає незворотним деформаціям повзучості полікристалів та мета-

левих композитів, головним чином продукується рухом дислокацій під дією напруження. У той же час дисипація, що відповідає пошкодженню, продукується розвитком у матеріалі мікрощілин, пор та тощо. За цим уявленням, загальний потенціал дисипації складається з двох складових частин дисипації.

Потенціали повзучості й пошкодження прийнято опуклими, позитивними функціями еквівалентних напружень та залежними від внутрішніх параметрів стану і рівня температури. Для матеріалів з початковою анізотропією еквівалентні напруження визначено сумісними інваріантами тензорів матеріальних сталих (2-го й 4-го рангу) з напруженнями, асоційованими відповідно з деформаціями повзучості та пошкодженням. За рахунок симетрії властивостей матеріалів кількість незалежних компонент матеріальних тензорів зменшується. В роботі розглянуто ортотропні та трансверсально - ізотропні при повзучості матеріали. Менш симетричні, ніж ортотропні матеріали, при повзучості на теперішній час розглядати не реалістично.

За цими несуперечливими до термодинаміки припущеннями для матеріалів з початковою ортотропією в роботі отримано кінетичні рівняння стану у вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{c}_{ij} &= \frac{\dot{D}}{\sigma_V} \left(a_{ij} + \frac{b_{ijkl} \sigma_{kl}}{\sigma_2} \right), \\ \dot{\omega}_{ij} &= \frac{\dot{\omega}}{R_V} \left(g_{ij} + \frac{d_{ijkl} R_{kl}}{R_2} \right),\end{aligned}\tag{5}$$

де

c_{ij}, ω_{ij} -тензори незворотних деформацій повзучості й пошкодження;

$\dot{D} = \dot{c}_{ij} \sigma_{ij}$ -потужність дисипації внаслідок повзучості;

$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{ij} R_{ij}$ -потужність дисипації від пошкодження, яка віднесена до її граничного значення при макроруйнуванні ($0 \leq \omega \leq 1$);

$\sigma_V = \sigma_1 + \sigma_2$, $\sigma_1 = a_{ij} \sigma_{ij}$, $\sigma_2^2 = b_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl}$ -еквівалентне напруження та перший й другий сумісні інваріанти тензорів матеріальних сталих і напруження, асоційованого з деформаціями повзучості;

$R_V = R_1 + R_2$, $R_1 = g_{ij} R_{ij}$, $R_2^2 = d_{ijkl} R_{ij} R_{kl}$ -еквівалентне напруження та перший й другий сумісні інваріанти тензорів матеріальних сталих і напруження, асоційованого з пошкодженням.

Кінетичні рівняння (5) розглядаються як визначальні рівняння стану для матеріалів з початковою ортотропією та з асиметрією властивостей повзучості до виду навантаження (зокрема, при розтягу й стиску). В випадку відсутності ефектів асиметрії треба покласти $a_{ij} = g_{ij} = 0$.

Час до завершення прихованого руйнування t_* в роботі встановлено за рівністю $\omega(t_*) = 1$, тобто коли дисипація за рахунок пошкодження набуває своєї граничної величини.

За принципом еквівалентності деформацій повзучості тим, що мають місце бути для пошкодженого матеріалу, тензор σ_{ij} у рівностях (5) замінюється тензором R_{ij} , асоційованим з пошкодженням матеріалу внаслідок повзучості. Разом з цим зв'язок між цими тензорами встановлює так звані ефективні напруження, які повинні описувати ефект зростання напруження з ростом пошкодження. Помірний вплив тензору пошкодження на ефективні напруження в роботі враховано з застосуванням для ефективних напружень рівності $R_{ij} = \sigma_{ij} / (1 - \omega)$, в якій $\dot{\omega} = \dot{\omega}_{ij} R_{ij}$, $0 \leq \omega \leq 1$. За цим припущенням головні напрямки матеріальної ортотропії вважаються незмінними аж до початку макроруйнування, та поверхні дисипативних потенціалів у просторі напруження поширюються у часі пропорційно одному параметру, пов'язаному з прийнятою мірою пошкодження $0 \leq \omega \leq 1$.

Далі в роботі розглянуто трансверсально-ізотропні металеві сплави та композитні матеріали з спрямованою кристалізацією, для яких рівняння (5) було конкретизовано шляхом прийняття степеневі залежності \dot{D} й $\dot{\omega}$ від відповідних еквівалентних ефективних напружень.

У роботі було узагальнено для трансверсально-ізотропної повзучості співвідношення рівнянь стану типу Бейлі - Нортон, які отримано у такому вигляді:

$$\dot{\underline{\sigma}} = b_{1111}^{(n+1)/2} \frac{\bar{\sigma}_2^{n-1}}{(1-\omega)^n} \mathbf{B} \bar{\underline{\sigma}}, \quad \dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{k/2} \frac{\sigma_*^{k-2}}{(1-\omega)^{k+s-1}} \mathbf{D} \bar{\underline{\sigma}} \quad (6)$$

$$\dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{k/2} \frac{\sigma_*^k}{(1-\omega)^{k+s}}, \quad \omega \dot{\underline{\omega}} = 0, \quad \omega \dot{\sigma}_* = \omega_* \quad (7)$$

де

$$\bar{\sigma}_2^2 = \bar{\sigma}^T \mathbf{\Phi} \bar{\underline{\sigma}} = \sigma_{11}^2 + 2\beta_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + \beta_{22}\sigma_{22}^2 + 4\beta\sigma_{12}^2$$

$$\bar{\sigma}_*^2 = \bar{\sigma}^T \mathbf{\Phi} \bar{\underline{\sigma}} = \sigma_{11}^2 + 2\delta_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + \delta_{22}\sigma_{22}^2 + 4\delta\sigma_{12}^2,$$

$\beta, \beta_{12}, \beta_{22}, \delta, \delta_{12}, \delta_{22}, n, k, s$ - матеріальні сталі, якими враховано початкову анізотропію повзучості й пошкодження для трансверсально-ізотропних матеріалів при плоскому напруженому стані.

У роботі надано методику визначення функцій і матеріальних сталих для рівнянь стану (6), (7). Останні знайдено на підставі обробки експериментів з одноосьової повзучості зразків, вирізаних із листових заготовок у головних напрямках їхньої анізотропії та під кутом до них. У роботі надано залежності між компонентами тензорів матеріальних сталих та експериментальними даними.

Установлено властивості запропонованих моделей трансверсально-ізотропної повзучості на підставі їхнього застосування до опису повзучості титанового сплаву VT1-0 при 773К, легкого сплаву Д16АТ при 548К. Експериментальні дані для цих матеріалів отримано в лабораторії міцності кафедри динаміки та міцності машин Харківського державного політехнічного університету. За літературними експериментальними даними в роботі вивчено повзучість металевго композиту зі спрямованою кристалізацією Со-Ст-С при 1098К.

У дослідженнях закономірностей повзучості цих трансверсально-ізотропних матеріалів встановлено задовільний ступінь адекватності запропонованої в роботі моделі анізотропної повзучості з рівняннями стану у вигляді (6), (7) й достовірні чисельні розрахунки за цими рівняннями.

Далі в розділі встановлено залежності для перетворення законів повзучості при повороті головних осей матеріальної анізотропії. Так, для випадку, якщо у площині анізотропії матеріалу їх головні осі не співпадають із координатними на кут θ ($m = \cos\theta$, $n = \sin\theta$), рівняння стану (6), (7) перетворюються у наступні

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\sigma}} &= B_{11} \frac{n+1}{2} \frac{\bar{\sigma}_2^{-n-1}}{\bar{\omega}^{-n}} \bar{B} \bar{\sigma}, \quad \dot{\bar{\omega}} = D_{11} \frac{k}{2} \frac{\bar{\sigma}_{2*}^{-k-2}}{\bar{\omega}^{-k+s-1}} \bar{D} \bar{\sigma}, \\ \dot{\bar{\omega}} &= D_{11} \frac{k}{2} \frac{\bar{\sigma}_{2*}^{-k/2}}{\bar{\omega}^{-k+s}}, \quad \bar{\omega} \bar{\sigma} = 0, \quad \bar{\omega} \bar{\sigma}_{2*} = \bar{\omega}^*. \end{aligned} \quad (8)$$

де

$$\bar{B} = \begin{vmatrix} 1 & \bar{\beta}_{12} & \bar{\beta}_{13} \\ \bar{\beta}_{12} & \bar{\beta}_{22} & \bar{\beta}_{23} \\ \bar{\beta}_{13} & \bar{\beta}_{23} & \bar{\beta}_{33} \end{vmatrix} \quad \bar{D} = \begin{vmatrix} 1 & \bar{\delta}_{12} & \bar{\delta}_{13} \\ \bar{\delta}_{12} & \bar{\delta}_{22} & \bar{\delta}_{23} \\ \bar{\delta}_{13} & \bar{\delta}_{23} & \bar{\delta}_{33} \end{vmatrix}$$

$$\bar{\sigma}_2^2 = \sigma_{11}^2 + 2\bar{\beta}_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2\bar{\beta}_{13}\sigma_{11}\sigma_{12} + \bar{\beta}_{22}\sigma_{22}^2 + 2\bar{\beta}_{23}\sigma_{22}\sigma_{12} + \bar{\beta}\sigma_{12}^2,$$

$$\bar{\beta}_{12} = \frac{B_{12}}{B_{11}} = \frac{\varphi_{12} \bar{\omega}}{\varphi_{11} \bar{\omega}}, \quad \bar{\beta}_{13} = \frac{B_{13}}{B_{11}} = \frac{\varphi_{13} \bar{\omega}}{\varphi_{11} \bar{\omega}},$$

$$\bar{\beta}_{22} = \frac{B_{22}}{B_{11}} = \frac{\varphi_{22} \bar{\omega}}{\varphi_{11} \bar{\omega}}, \quad \bar{\beta}_{23} = \frac{B_{23}}{B_{11}} = \frac{\varphi_{23} \bar{\omega}}{\varphi_{11} \bar{\omega}},$$

$$\bar{\beta} = \frac{B_{33}}{B_{11}} = \frac{\varphi_{33} \bar{\omega}}{\varphi_{11} \bar{\omega}},$$

$$\varphi_{11} = m^4 + 2\bar{\beta}_{12}m^2n^2 + \bar{\beta}_{22}n^4 + 4m^2n^2\bar{\beta},$$

$$\varphi_{22} = n^4 + 2\bar{\beta}_{12}m^2n^2 + \bar{\beta}_{22}m^4 + 4m^2n^2\bar{\beta}, \quad \varphi_{33} = 4m^2n^2 - 8m^2n^2\bar{\beta}_{12} + \bar{\beta}_{22}4m^2n^2 + \bar{\beta}4m^2n^2 - n^2,$$

$$\varphi_{12} = n^2m^2 + m^4 + n^4\bar{\beta}_{12} + m^2n^2\bar{\beta}_{22} - 4m^2n^2\bar{\beta},$$

$$\varphi_{13} = 2m^3n + 2m^3n - mn^3\bar{\beta}_{12} - 2mn^3\bar{\beta}_{22} - 4m^3n - mn^3\bar{\beta},$$

$$\varphi_{23} = 2mn^3 - 2mn^3 - m^3n \bar{\beta}_{12} - 2m^3n\beta_{22} + 4m^3n - mn^3 \bar{\beta}.$$

$$\sigma_* = \sqrt{D_{11}} \bar{\sigma}_{2*}, \quad \bar{\sigma}_{2*}^2 = \sigma_{11}^2 + 2\bar{\delta}_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2\bar{\delta}_{13}\sigma_{11}\sigma_{12} + \bar{\delta}_{22}\sigma_{22}^2 + 2\bar{\delta}_{23}\sigma_{22}\sigma_{12} + \bar{\delta}\sigma_{12}^2,$$

$$\bar{\delta}_{12} = \frac{\Psi_{12} \bar{\theta}}{\Psi_{11} \bar{\theta}}, \quad \bar{\delta}_{13} = \frac{\Psi_{13} \bar{\theta}}{\Psi_{11} \bar{\theta}}, \quad \bar{\delta}_{22} = \frac{\Psi_{22} \bar{\theta}}{\Psi_{11} \bar{\theta}}, \quad \bar{\delta}_{23} = \frac{\Psi_{23} \bar{\theta}}{\Psi_{11} \bar{\theta}}, \quad \bar{\delta} = \frac{\Psi_{33} \bar{\theta}}{\Psi_{11} \bar{\theta}},$$

$$\delta_{12} = \frac{d_{1122}}{d_{1111}}, \quad \delta_{22} = \frac{d_{2222}}{d_{1111}}, \quad \delta = \frac{d_{1212}}{d_{1111}}$$

У четвертому розділі подані результати за дослідженнями з впливу попередньої повзучості на зміну анізотропних властивостей конструкційних матеріалів. Розглянуто дані унікальних експериментальних досліджень з анізотропної повзучості плоских зразків із сталі X8 Cr Ni Mo Nb 16, які виконано в Німеччині та опубліковано в літературі. Цими дослідженнями доведено суттєвий вплив попередньої повзучості на анізотропні властивості сталі. Експериментальні дані з повзучості ізотропної сталі свідчать, що за рахунок попередньої повзучості та внаслідок пошкодження матеріал набуває анізотропних властивостей. У роботі надано теоретичні та розрахункові дані для опису експериментально отриманих закономірностей із впливу попередньої повзучості на анізотропні властивості сталі. На основі зіставлення дослідних і розрахункових даних показано, що попередня повзучість матеріалу призводить до початкової анізотропії та її рівень істотно змінює ступінь анізотропії їхніх властивостей. Доведено, що у цьому випадку запропонований у роботі варіант рівнянь стану трансверсально-ізотропної повзучості цілком задовільно кількісно і якісно описує їхні нові анізотропні властивості аж до руйнування.

У п'ятому розділі наведено чисельні результати розрахункових досліджень із впливу анізотропії властивостей повзучості матеріалів на перерозподіл напруження поряд із малими отворами й на тривалість процесів пошкодження у плоских тілах при розтязі й вигині.

Надано результати розрахунків за тестовими прикладами, виконаними для обґрунтування достовірності методів і програмного забезпечення до розрахунків на анізотропну повзучість плоских тіл, що запропоновані в роботі. Достовірність чисельних розрахунків встановлена шляхом зіставлення їх з окремими аналітичними й наближеними результатами, відомими в літературі, які раніше отримано іншими авторами.

Описано розрахунки на анізотропну повзучість розтягнутих та при вигині квадратних і прямокутних пластин із малим отвором. Розглянуто пластини, які виготовлено з титанового сплаву VT1-0 при 773К, легкого сплаву Д16АТ при 548К і з металевого композиту зі спрямованою кристалізацією Co-Cr-C при 1098К. Як встановлено за попередніми дослідженнями, ці матеріали мають різні ступені початкової анізотропії та відповідають моделі трансверсально-ізотропної повзучості.

У дослідженнях уперше встановлено закономірності повзучості трансверсально-ізотропних пластин із малим отвором при розтязі й вигині в їхній площині. В роботі надано закономірності з перерозподілу напруження, накопичення пошкодження, зміни концентрації напружень за умов повзучості пластин та при руйнуванні. Для кожного випадку розглянуто вплив на процеси повзучості й пошкодження зміни орієнтації головних напрямків матеріальної анізотропії у площині пластин при збереженні дії навантаження.

У розділі розглянуто приклади за дослідженням зміни у часі при повзучості коефіцієнту концентрації напружень та пошкоджень поряд із малим отвором та в залежності від кута між головною віссю матеріальної анізотропії та поздовжньої осі трансверсально-ізотропних при повзучості пластин, що послаблені коловим отвором, при збереженні виду та рівня діючого навантаження (розтяг або вигин).

Ці дані можливо використати для вибору раціонального розташування головних осей матеріалу для підвищення тривалості елемента конструкції до руйнування при заданих умовах навантаження.

Наприклад, на рис. 1 надано розрахункові дані для часу до руйнування в залежності від кута між головною віссю матеріальної анізотропії та напрямком розтягу пластин із малим коловим отвором. Дані наведено у порівнянні для двох матеріалів: ВТ1-0 та Д16АТ.

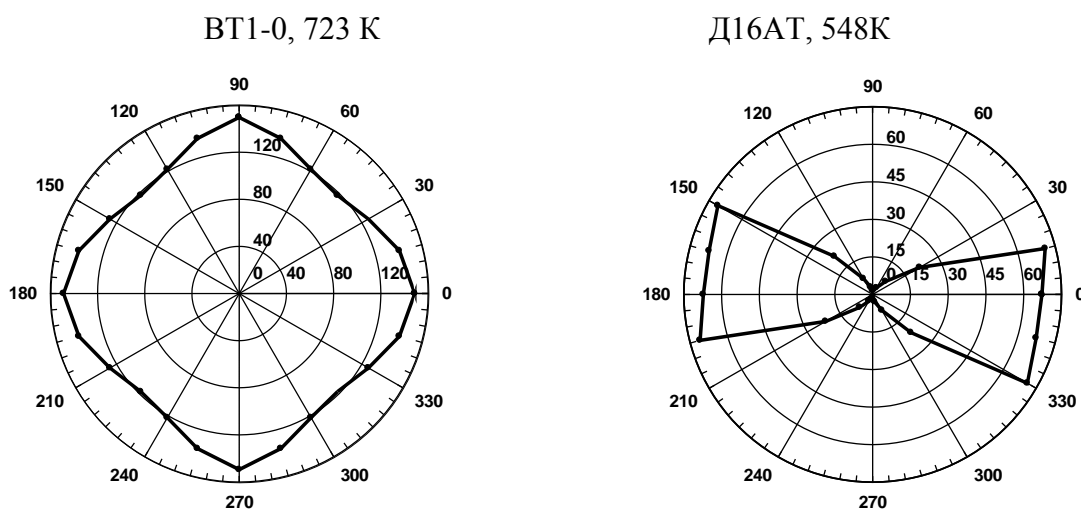
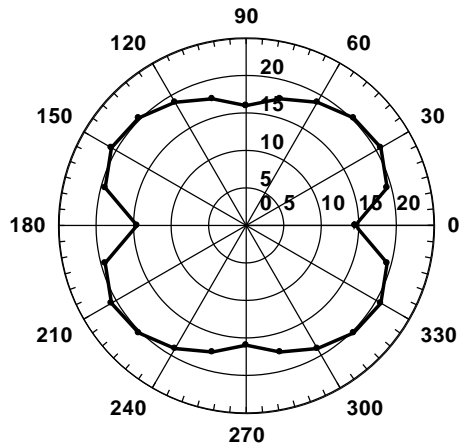


Рис. 1. Час до руйнування в залежності від кута між головною віссю матеріальної анізотропії та напрямком розтягу пластин з малим коловим отвором

Аналогічно, для прикладу, на рис. 2 надано розрахункові дані часу до руйнування в залежності від кута між головною віссю матеріальної анізотропії та координатною віссю вздовж пластини, також у порівнянні для двох видів матеріалів: ВТ1-0 та Д16АТ, але для випадку плоского вигину під тиском уздовж однієї зі сторін пластини з центральним коловим отвором, розташованим між жорстко закріпленими іншими її сторонами.

BT1-0, 723 K



Д16АТ, 548К

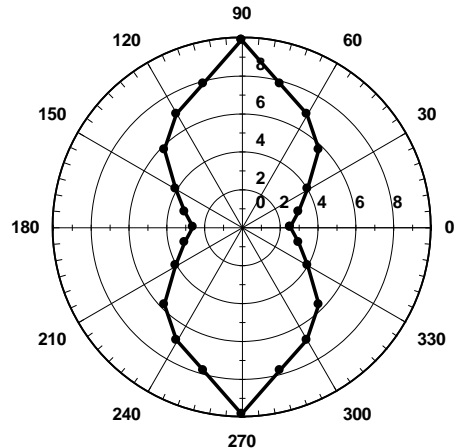


Рис. 2. Час до руйнування в залежності від кута між головною віссю матеріальної анізотропії та поздовжньої осі пластин з малим коловим отвором при вигині

У заключній частині розділу надано чисельні дані розрахунків на повзучість робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна. Розглянуто методику розрахунків лопаток при повзучості у полі відцентрових сил та розв'язані окремі приклади. Розрахункова модель була прийнята відповідною до одновимірної стержневої моделі з перемінним перерізом уздовж осі лопатки. Попередньо встановлювалась орієнтація осей матеріальної анізотропії за умов мінімальної повзучості уздовж осі лопатки. Порівняння розрахунків здійснено для лопаток із ізотропних жароміцних сталей та металевго композита.

На рис. 3 надано розрахункові дані для $t=300$ г (—●—), 3000 г (—○—), 6000 г (—△—) розподілу незворотних деформацій повзучості вздовж осі лопатки із жароміцної турбінної сталі EI 437 Б при 998 К (зліва) та для лопатки із металевго композита зі спрямованою кристалізацією Со-Сr-С при 1098 К (справа).

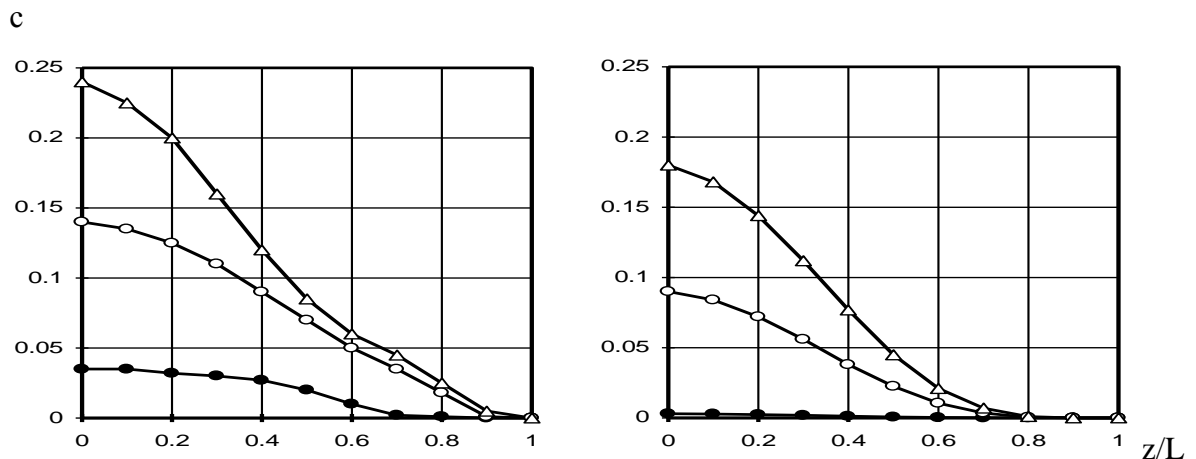


Рис. 3. Розподіл незворотних деформацій повзучості вздовж осі лопатки

Порівняння розрахункових даних термопружного $u_z(0)$ внаслідок повзучості Δl та сумарного переміщення вільного краю лопаток із жароміцних сталей і металевого композитного сплаву наведено в таблиці.

Таблиця

Температура	Матеріал	Ресурс 6000ч		
		$u_z(0)$, м	Δl , м	u_z
923К	ЭИ69	0.0142	0.0115	0.0257
998	ЭИ437Б	0.0110	0.0120	0.0230
1098К	Co-Cr-C	0.0100	0.0076	0.0176

Розрахунками встановлено, що застосування металевих композитів із спрямованою кристалізацією дозволяє підвищити температуру в газотурбінному двигуні без конструктивних ускладнень лопаток і систем додаткового їхнього охолодження.

Дисертаційна робота завершується такими **висновками**:

1. Проведено огляд наявних у літературі теоретичних, чисельних і експериментальних робіт з анізотропної повзучості. Зроблено висновок, що досліджень з актуальної для машинобудування проблеми анізотропної повзучості недостатньо. В окремих теоретичних розробках з механіки анізотропних матеріалів і конструкцій з них, зокрема, композитних матеріалів, сьогодні практично відсутні адекватні моделі й методи розрахунків на повзучість і довготривалу міцність.

2. Запропоновано тензорні визначальні рівняння ортотропної повзучості тіл із тензорною мірою пошкодження на основі несуперечливих до термодинаміки припущень про існування потенціалів для тензора швидкостей деформацій повзучості і тензора (другого рангу) швидкостей пошкодження.

3. Розв'язано нові задачі анізотропної повзучості плоских тіл на основі методу скінчених елементів (МСЕ) у сполученні з методом прогнозу-корекції для покрокового інтегрування початкових задач у часі. За схемою МСЕ на основі варіаційної рівності до принципу Сандерса - Мак-Комба -Шлехте надано рівняння, за якими чисельно розв'язані задачі анізотропної повзучості плоских тіл. Для розв'язання основного рівняння МСЕ задачі термповзучості на кожному кроці методу прогнозу-корекції застосовано метод Холецького. Запропоновано алгоритм розрахунку та програмне забезпечення, що дозволяють виконувати повний аналіз напружено-деформованого стану анізотропної повзучості плоских конструктивних елементів машин, аж до завершення нако-

пичення прихованого пошкодження в точці тіла.

4. Ефективність, ustalеність і достовірність розрахунків установлено порівнянням знайдених розв'язків окремих задач з аналітичними й експериментальними, що відомі у літературі або чисельно отриманими іншими методами.

5. Створено методика для визначення функцій і матеріальних сталей при конкретизації визначальних рівнянь повзучості трансверсально-ізотропних матеріалів за експериментальними даними з одноосьової повзучості зразків, вирізаних із матеріалу в головних напрямках анізотропії та під кутом до них. За даними експериментальних досліджень повзучості металевому композиту зі спрямованою кристалізацією Co-Cr-C при 1098 К, легкого сплаву D16AT при 548 К й титанового сплаву BT1-0 при 773 К установлені властивості моделей повзучості, запропонованих у даній роботі.

6. Надано результати дослідження з впливу попередньої повзучості на зміну анізотропних властивостей конструкційних матеріалів. На підставі зіставлення дослідних і розрахункових даних доведено, що внаслідок попередньої повзучості матеріали істотно змінюють ступінь анізотропії їхніх властивостей і запропонований у роботі варіант рівнянь стану цілком задовільно кількісно і якісно описує їх нові анізотропні властивості до руйнування матеріалів унаслідок повзучості.

7. Надано розрахунки з анізотропної повзучості квадратних і прямокутних пластин із малим отвором при розтязі та вигині в їхньої площині. Чисельно установлено закономірності анізотропної повзучості пластин із титанового сплаву BT1-0 при 773К, легкого сплаву D16AT при 548К і з металевому композиту зі спрямованою кристалізацією Co-Cr-C при 1098К. Уперше вивчені закономірності трансверсально-ізотропних при повзучості пластин із малим отвором. Установлено, що в залежності від орієнтації осей анізотропії матеріалу пластин відносно напрямку діючого навантаження й ступеня початкової анізотропії повзучість пластин відбувається по різному і може мати мінімальну або максимальну тривалість до завершення в них накопичення прихованого пошкодження. Доведено, що за кількісними та якісними даними процесів повзучості й пошкодження в елементах конструкцій з різним ступенем анізотропії їхніх матеріалів методом розрахунку можливо встановити важливі для проектування оцінки довговічності виробів.

8. Виконано прикладні розрахунки на повзучість робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна. За цими розрахунками, що мають важливе прикладне значення в галузі проектування сучасних ГТД, доведено, що застосування металевих композитів із спрямованою кристалізацією дозволяє підвищити температуру в газотурбінному двигуні без конструктивних ускладнень лопаток і систем їхнього додаткового охолодження.

9. Основні результати, висновки й рекомендації з наданих у роботі досліджень використано при виконанні науково - технічної програми Міністерства України в галузі фундаментальних досліджень

джені та у ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» при проектуванні реакторної техніки.

Додатки А та Б мають документи про застосування результатів роботи.

НАУКОВІ ПРАЦІ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пасынок М.А. К постановке и разработке эффективных методов решения плоских задач ползучести и разрушения // Республиканский межведомственный научно-технический сборник “Динамика и прочность машин”. - Харьков: ХГПУ. - 1997. - Вып.55. - С.47-55.

2. Пасынок М.А. Термодинамическое обоснование уравнений состояния разрушающихся при ползучести анизотропных сплавов // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1998. - Вып.17. - С.73-75.

3. Морачковский О.К., Пасынок М.А. Расчеты анизотропных плоских тел, разрушающихся вследствие ползучести // Сборник научных трудов ХГПУ “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. - Часть1. - Харьков: ХГПУ. - 1998. - Вып.6. - С. 100-104.

Автором одержані чисельні результати та наведені закономірності анізотропної повзучості та руйнування плоских тіл.

4. Morachkovsky O., Altenbach H., Pasynok M. Computational modeling of creep damage evolution in transversally-isotropic structures // Республиканский межведомственный научно-технический сборник “Динамика и прочность машин”. - Харьков: ХГПУ. - 1998. - Вып.56. - С. 9-18.

Автору належать дані розрахунку на ползучість плоских тіл при розтязі та з тестування розрахунків.

5. Морачковский О.К., Пасынок М.А. Исследование влияния на ползучесть материалов приобретенной анизотропии вследствие предварительной ползучести // Вестник ХГПУ.-Харьков: ХГПУ.- 1998.-Вып.27.-С.197-203.

Автору належать дані розрахунку, висновки з порівняння експериментальних даних з чисельними.

6. Морачковский О.К., Пасынок М.А. Ползучесть изотропных и анизотропных плоских тел // Труды международной научно-технической конференции “ Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”.-Часть1.-Харьков: ХГПУ. - 1997.- С. 127-131.

Автору належать рівняння стану, метод та алгоритм розрахунку на повзучість плоских трансверсально-ізотропних тіл і наведені чисельні дані щодо розв’язання початково-крайових задач повзучості і тривалої міцності плоских елементів машин на базі МСЕ.

7. Morachkovsky O., Pasynok M. The Creep - Damage Model of Transversally - Isotropic Metals // 6 th International Symposium on Creep and Coupled Processes, Bialowieza, Poland, 1998. - P.367-375.

Автором отримано теоретичне обґрунтування рівнянь стану та порівняння результатів з

експериментальними даними для трансверсально-ізотропних матеріалів ВТ1-0, Д16-АТ, МКМ Со-Сr-С.

8. Пасынок М.А. Новые модели композитных сплавов для описания ползучести с разрушением // Сборник докладов первой городской научно-практической конференции “ Актуальные проблемы современной науки в исследованиях молодых ученых г.Харькова”. - Харьков: ХГПУ. - 1997. - С. 70-72.

АНОТАЦІЇ

Пасынок М.О. Розробка методів розрахунку на анізотропну повзучість з урахуванням пошкодженості плоских конструктивних елементів машин. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. - Харківський державний політехнічний університет, Харків, 2000.

Наукова новизна роботи полягає у запропонованому новому варіанті визначальних рівнянь анізотропної повзучості з урахуванням пошкоджень за тензорною їхньою мірою стосовно до трансверсально-ізотропних матеріалів та у розробленому чисельному методі з програмним забезпеченням до розрахунків на повзучість і тривалу міцність плоских елементів конструкцій.

Надано теоретичне обґрунтування методу. Вірогідність результатів підтверджено задовільною відповідністю знайдених чисельних даних із відомими аналітичними та експериментальними. Установлені чисельно й експериментально обґрунтовані нові закономірності анізотропної повзучості й руйнування плоских елементів конструкцій з концентрацією напруження й пошкоджень поряд із малими отворами. Метод орієнтований та використаний для розрахунків на анізотропну повзучість матеріалів і плоских елементів конструкцій на етапі проектування.

Ключові слова: повзучість, пошкодженість, руйнування, анізотропія, трансверсально-ізотропні матеріали, плоскі тіла, пластини з малими отворами, метод скінчених елементів, експеримент.

Pasynok M. Development of methods for calculation anisotropic creep - damage of plane structural members. - Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of engineering science in speciality 05.02.09 - dynamics and strength of machines. - Kharkiv State Politechnical University, Kharkiv, 2000.

The scientific novelty of the work is presented in developing new methods and software for calculating anisotropic creep - damage and durable strength of plane structural members. New constitutive laws of the transversally - isotropic creep - damage of materials have been established. The theoretical bases of the method have been given. Reliability of the results has been confirmed by satisfactory correspondence of the numerical solutions found and the analytical and experimental data obtained. Essential influence of the degree of anisotropic on the couple process of stress - damage concentration near the small holes in the plates and time to fracture has been shown. The method is aimed at and used for anisotropic creep - damage analysis of plane structural members at the design stage.

Key word: creep, damage, fracture, anisotropy, transversally-isotropic materials, plane solid, plates with small holes, finite element method, experiment.

Пасынок М.А. Разработка методов расчета на анизотропную ползучесть с учетом повреждаемости плоских конструктивных элементов машин. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 - динамика и прочность машин. - Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 2000.

Диссертационная работа посвящена разработке методов описания анизотропной ползучести материалов с учетом повреждаемости и расчета на ползучесть плоских конструктивных элементов машин, выполненных из трансверсально-изотропных металлических сплавов. В работе созданы теоретически и экспериментально обоснованные модели трансверсально-изотропной ползучести и повреждаемости материалов. Разработаны методы расчета и создано их программное обеспечение для прогнозирования деформирования и разрушения плоских тел при ползучести. Установлены закономерности ползучести и разрушения в анизотропных плоских телах. Решены прикладные задачи анизотропной ползучести о концентрации напряжений около малых отверстий в плоских телах и ползучести лопаток газотурбинных двигателей из металлических композитных материалов, имеющие важное значение для реакторного и энергетического машиностроения.

В работе представлен обзор существующих теоретических, численных и экспериментальных исследований по анизотропной ползучести. Сделан вывод, что исследования по актуальной для машиностроения проблеме анизотропной ползучести малочисленны. В теоретических разработках по механике анизотропных материалов и конструкций из них, в частности, композитных материалов, в настоящее время практически отсутствуют адекватные модели и методы расчетов на ползучесть и длительную прочность.

Предложены тензорно-линейные определяющие уравнения ортотропной ползучести тел с тензорной мерой повреждаемости на основе термодинамически не противоречивых допущений о

существовании потенциалов для тензора скоростей деформаций ползучести и тензора (второго ранга) скоростей повреждаемости.

Создана методика определения функций и материальных постоянных для конкретизации определяющих уравнений трансверсально-изотропных материалов при ползучести по опытным данным об одноосной ползучести образцов, вырезанных из материала в главных направлениях анизотропии и под углом к ним. По данным экспериментальных исследований ползучести эвтектического сплава с направленной кристаллизацией Co-Cr-C при $T=825^{\circ}\text{C}$, сплава D16AT при $T = 275^{\circ}\text{C}$ и титанового сплава BT1-0 при $T=500^{\circ}\text{C}$ установлены свойства моделей ползучести, предложенных в данной работе.

Представлен вывод разрешающих уравнений для задач ползучести по схеме МКЭ на основе вариационного равенства для принципа Сандерса - Мак-Комба -Шлехте. Предложен метод решения задач анизотропной ползучести плоских тел на основе метода конечных элементов (МКЭ) в сочетании с методом прогноза-коррекции для пошагового интегрирования начальных задач по времени. Для решения основного разрешающего уравнения задачи термоползучести на каждом шаге метода прогноза-коррекции применялся метод Холецкого. Алгоритм расчета, реализованный в программном комплексе для ПЭВМ, позволяет выполнить полный анализ напряженно-деформированного состояния плоских тел при анизотропной ползучести вплоть до завершения процесса накопления скрытой повреждаемости в точке тела.

Эффективность, устойчивость и достоверность расчетов установлены сравнением найденных решений с аналитическими и экспериментальными, известными в литературе, или численно полученными другими методами.

Представлены результаты исследования по влиянию предварительной ползучести на изменение анизотропных свойств конструкционных материалов. На основе сопоставления опытных и расчетных данных показано, что вследствие предварительной ползучести материалы существенно изменяют степень анизотропии их свойств, и показано, что в этом случае предложенный в работе вариант уравнений состояния вполне удовлетворительно количественно и качественно описывает их новые анизотропные свойства вплоть до разрушения вследствие ползучести.

Проведены расчеты на анизотропную ползучесть квадратных и прямоугольных пластин с малым отверстием при растяжении и изгибе в их плоскости. Численно установлены закономерности анизотропной ползучести пластин из титанового сплава BT1-0 при 773K, легкого сплава D16AT при 548K и из металлического композита с направленной кристаллизацией Co-Cr-C при 1098K. В исследованиях впервые изучены закономерности трансверсально-изотропных при ползучести пластин с малым отверстием. Установлено, что в зависимости от ориентации осей анизотропии материала пластин по отношению к направлению действующей нагрузки и от степени ис-

ходной анизотропии ползучесть пластин происходит по разному и может обладать минимальной и максимальной продолжительностями до завершения в них скрытого разрушения. Показано, что по представленным количественным и качественным данным для характеристик процессов ползучести и поврежденности в элементах конструкций с различной степенью анизотропии их материалов расчетом можно устанавливать важные для проектирования оценки долговечности изделий.

Выполнены прикладные расчеты на ползучесть рабочих лопаток авиационного газотурбинного двигателя. В этих расчетах, имеющих важное прикладное значение в области проектирования современных ГТД, показано, что применение металлических композитов с направленной кристаллизацией позволяет повысить температуру в газотурбинном двигателе без конструктивных усложнений лопаток и систем дополнительного их охлаждения

Основные результаты, выводы и рекомендации по представленным в работе исследованиям использованы при выполнении научно-технической программы в области фундаментальных исследований и при проектировании реакторного оборудования.

Ключевые слова: ползучесть, повреждаемость, разрушение, анизотропия, трансверсально-изотропные материалы, плоские тела, пластины с малыми отверстиями, метод конечных элементов, эксперимент.

Пасинок Максим Олександрович

**Розробка методів розрахунку на анізотропну повзучість з
урахуванням пошкодженості плоских конструктивних елементів
машин**

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Спеціальність 05.02.09 - динаміка та міцність машин

Підп. до друку 16.03.2000 р. Формат 60×84/16. Папір CopyRex.

0,8 а.а. Тираж 100. Зам. 9-10.

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