

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ
ім. А.М. ПІДГОРНОГО**

Метельов Володимир Олександрович



УДК 539.3

**КОРОТКОЧАСНА ОРТОТРОПНА ПОВЗУЧИСТЬ
ПРИ ПЛОСКОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютерного моделювання процесів та систем Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бреславський Дмитро Васильович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри комп'ютерного моделювання
процесів та систем

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

доктор технічних наук, ст. наук. співробітник
Склепус Сергій Миколайович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
ст. наук. співробітник відділу математичного
моделювання й оптимального проектування

Захист відбудеться «24» травня 2018 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий «__» квітня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.180.01, д.т.н., проф.



О.О. Стрельнікова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Деформування й приховане руйнування матеріалів та складних об'єктів, якими є елементи конструкцій, є важливими чинниками, кількісні та якісні характеристики яких можуть істотно обмежувати ресурс у авіаційно-космічному, енергетичному, хімічному машинобудуванні, металургійній промисловості тощо. У багатьох випадках властивості матеріалу є такими, що обумовлюють не лише короточасний, миттєвий відгук на прикладене навантаження, але й довготривалу реакцію на нього. У цьому випадку мова йде про повзучість матеріалів, з якою пов'язане накопичення прихованих пошкоджень. Отримання знань щодо закономірностей плинності процесів повзучості та накопичення прихованих пошкоджень надає можливість оцінювання поточного стану напружено-деформованого стану конструкції, та на його основі робити висновки щодо її довговічності.

Значний обсяг металевих матеріалів, включно з конструкційними сталями, виявляє властивості повзучості й при кімнатних температурах. Часто її перебіг, особливо у технологічних процесах виробництва металевих листових заготовок, є обмеженим у часі та складає лічені хвилини. При цьому рівень набутих деформацій є співмірним з отриманим миттєво. Таке деформування отримало назву короточасної повзучості. При аналізі фізико-механічних властивостей листових матеріалів, наприклад отриманих прокаткою, часто виявляють їхню істотну анізотропію у формі трансверсальної ізотропії чи ортотропії. Це ж стосується повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності, які можуть йти з різними швидкостями у різних напрямках матеріалу навіть при початковій ізотропії інших властивостей. Отримання закономірностей процесів тривалого анізотропного деформування листових матеріалів та розробка методу його розрахункового аналізу при плоскому напруженому стані є важливим та актуальним завданням механіки деформівного твердого тіла, розв'язання якого надає можливості аналізу довговічності тонкостінних елементів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютерного моделювання процесів та систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») при виконанні держбюджетних тем МОН України «Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки» (Д.Р. № 0113U000448, 2013-2014 рр.) та «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017 р.), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є створення методу чисельного розрахунку та експериментальне дослідження короточасної ортотропної (трансверсально-ізотропної) повзучості в тонких листах при плоскому напруженому стані.

Для досягнення сформульованої мети в роботі поставлені такі задачі:

- розробка рівнянь стану ортотропної повзучості з урахуванням пошкоджуваності при плоскому напруженому стані та навантаженні, що змінюється стало та періодично;

- створення методу розв'язку та модернізація програмного забезпечення для розрахункового оцінювання деформування та рівня пошкоджуваності при повзучості за умов початкового пружно-пластичного напружено-деформованого стану та періодичного змінювання навантажень;

- експериментальне дослідження короткочасної повзучості сталі 3 при кімнатній температурі при простому і двовимірному напруженому стані та статичній й періодичній дії навантаження;

- встановлення закономірностей впливу ортотропії властивостей повзучості та періодичного навантаження на процес деформування;

- оцінювання впливу повзучості матеріалу на формоутворення листових матеріалів в технологічному процесі прокатки.

Об'єкт дослідження – ортотропна повзучість при плоскому напруженому стані та спільній дії статичного та періодичного навантажень.

Предмет дослідження – тонкостінні елементи при плоскому напруженому стані та спільній дії статичного та періодичного навантажень.

Методи дослідження. Роботу побудовано з використанням методів механіки деформівного твердого тіла, насамперед теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності. Для отримання виду рівнянь стану при періодичному змінюванні навантажень застосовано асимптотичні методи. Початково-крайова задача повзучості розв'язується методом скінченних елементів, що застосовується на кожному кроці інтегрування за часом методом Ейлера чи прогнозу-корекції. Для отримання розв'язку задачі теорії пластичності метод скінченних елементів застосовано разом з інкрементальним методом «приріст-початкова деформація». Отримані при цьому системи лінійних алгебраїчних рівнянь розв'язуються методом Холецького. Для отримання кривих повзучості застосовано експериментальні методи – розтягу зразків на машині для досліджень АІМА-5-2, вимірювання переміщень за допомогою екстензометрів, мірних сіток та відеофіксації.

Наукова новизна одержаних результатів:

- запропоновано нове рівняння стану ортотропної повзучості при періодичному навантаженні для матеріалів, що виявляють суттєву першу ділянку неусталеної повзучості;

- розроблено нову форму кінетичного рівняння для випадку періодичного навантаження з тензорним параметром пошкоджуваності, запропонованим О.К. Морачковським;

- отримані нові експериментальні дані та закономірності короткочасної ортотропної повзучості одновісних зразків та пластин з отворами зі сталі 3 при кімнатній температурі та статичному й періодичному змінюванні навантаження;

- на випадок деформування з початковими деформаціями пластичності та для кінетичного рівняння з тензорним параметром пошкоджуваності розвинуто розрахунковий метод та програмний комплекс для визначення напружено-

деформованого стану та пошкоджуваності у двовимірних задачах теорії повзучості. Шляхом порівняння чисельних та експериментальних результатів проведено верифікацію модернізованого програмного забезпечення;

- встановлено нові закономірності деформування з урахуванням деформацій короткочасної повзучості при прокатці сталевих листів.

Практичне значення одержаних результатів. Модернізований при виконанні дисертаційної роботи програмний комплекс для розрахункового аналізу повзучості та пошкоджуваності при плоскому напруженому стані може бути застосованим при чисельному моделюванні та проектуванні в енергетичному, авіаційно-космічному, хімічному машинобудуванні та у металургійній промисловості.

Рекомендації щодо вибору потрібних режимів при прокатці листів труб зі сталі 3 використано в Публічному акціонерному товаристві «Дніпропетровський металургійний завод ім. Комінтерну» (м. Дніпро), про що свідчить відповідний акт. Результати дисертаційної роботи використано при виконанні держбюджетних тем МОН України «Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки» (Д.Р. № 0113U000448, 2013-2014 рр.) та «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017 р.), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які надано в дисертації, отримані здобувачем самостійно. Ним запропоновано рівняння стану ортотропної повзучості та пошкоджуваності при періодичному навантаженні для матеріалів, що виявляють суттєву першу ділянку неусталеної повзучості. Створено метод розрахунку ортотропної повзучості при плоскому напруженому стані з урахуванням початкових пластичних деформацій. Отримано експериментальні результати з короткочасної ортотропної повзучості одновісних зразків та пластин з отворами зі сталі 3 при кімнатній температурі. Проведено чисельне моделювання як при аналізі достовірності результатів, так й для встановлення закономірностей деформування та прихованого руйнування.

В роботах написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботах [1, 2, 5, 11] авторові належать метод розрахунку та отримані результати. В роботах [3, 10, 13] автором розроблено експериментальне устаткування, рівняння стану та отримано результати експериментів. В [6] здобувачу належить розробка програмних модулів розв'язання пружно-пластичних задач та задач ортотропної повзучості з застосуванням тензорного параметру пошкоджуваності. В роботах [7, 9] здобувачеві належить метод розрахунку двовимірних задач. В роботах [8, 14, 16] автором розроблено рівняння стану та отримані результати. В роботах [15, 17, 18] здобувачу належать розробка алгоритмів розрахунку та отримані результати.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на: X науково-практичній конференції студентів та аспірантів інженерно-фізичного факультету НТУ «ХП» «До 50-річчя першого

пілотованого польоту людини у космос» (Харків, 2011 р.); міжнародній науковій конференції «Математические методы в технике и технологиях» (Харків, 2012 р.); 4-й міжнародній конференції «Nonlinear dynamics» (Севастополь, 2013 р.) та 5-й міжнародній конференції «Nonlinear dynamics» (Харків, 2016 р.); XXI Всеросійській школі-конференції молодих вчених та студентів «Математическое моделирование в естественных науках» (Перм, 2013 р.); 5-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки та міцності у турбомашинобудуванні» (Київ, 2014 р.); XXI, XXII, XXIII та XXIV міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2013-2016 рр.); науково-технічній конференції «До 100-річчя з дня народження академіка В.Г. Сергєєва та 50-річчя створення в ХПІ спеціальності «Динаміка польоту та управління» (Харків, 2014 р.); науковій конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики» (Львів, 2015 р.).

Робота, в тому числі і в повному обсязі, розглядалась та обговорювалась в НТУ «ХПІ» на семінарах кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем НТУ «ХПІ» (2014-2017 рр.) та на засіданні семінару НТПР Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України.

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 18 наукових працях [1-18], серед яких 4 статті у фахових виданнях за переліком ДАК МОН України, 1 одна стаття у виданні, що індексується науково-метричною базою Scopus, 1 свідоцтво на авторське право на програмний комплекс та 12 матеріалів конференцій, в тому числі й міжнародних.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 162 сторінки, включаючи 84 рисунки, 4 таблиці, 3 додатки на 5 сторінках, 224 найменування використаних джерел на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та практичну цінність дисертаційної роботи. Сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів роботи.

У **першому** розділі проаналізовано результати, які отримано на шляху досліджень короткочасної та анізотропної повзучості, що відображені у класичних та сучасних публікаціях у вітчизняній та світовій науковій літературі. Проаналізовано підходи до опису короткочасної повзучості матеріалів, розглянуто матеріали, що виявляють анізотропні властивості повзучості. Приділено увагу методам та результатам розрахунків деформування та міцності при такому напружено-деформованому стані, коли фізичні співвідношення є нелінійними. Розглянуто процеси деформування, в яких суттєву роль відіграють механізми пластичності та повзучості, в тому числі в задачах механіки формоутворення.

У розділі наголошується, що на практиці достатньо часто зустрічаються такі умови навантаження, в яких деформування відбувається за достатньо короткий проміжок часу. Таке явище отримало назву короткочасної повзучості. Ю.М. Работнов зі своїм співавтором С.Т. Милейко визначають короткочасну повзучість як такий процес повзучості металів, коли значна деформація, що порушує конструктивну функцію витвору, накопичується за відносно короткий проміжок часу. В роботах К.-Ю. Бате, Д. Бойла, А.В. Бурлакова, Г. Генкі, М.К. Кучера, В.С. Гудрамовича, М. Касснера, Л.М. Качанова, Г.І. Львова, М.М. Малініна, С.Т. Милейко, О.К. Морачковського, Н.С. Можаровського, А. Надаї, Ф. Одквіста, Е. Орована, А.М. Підгорного, В.П. Пошивалова, Ю.М. Работнова, С.М. Склепуса, К. Содерберга, Д. Спенса, В.О. Стрижала, Д. Хейхерста, Н. Хоффа, Ю.М. Шевченка та інших вчених міститься великий внесок до експериментального дослідження повзучості, в тому числі й короткочасної й анізотропної, та розробку методів її опису.

У більшості випадків повзучість супроводжується накопиченням прихованої пошкоджуваності, розвиток якої призводить до руйнування. Її теоретичний опис на сьогодні є найбільш повним у континуальній механіці пошкоджуваності, яку розвинено працями Й. Беттена, Дж. Джу, Д. Крайчиновича, Л.М. Качанова, Ж. Леметра, С. Мураками, Ю.М. Работнова, Я. Скжипека, Ф. Циглера, Ж.Л. Шабоша та багатьох інших.

Часто на практиці має місце періодичне, чи циклічне, навантаження при підвищених температурах. Розвиток напрямку теоретичного опису циклічного деформування та пов'язаного з ним руйнування матеріалів та конструктивних елементів з урахуванням фізичної нелінійності здійснено в роботах багатьох науковців, серед яких слід виділити Х. Альтенбаха, М.І. Бобиря, М.В. Бородія, Д.В. Бреславського, В.П. Голуба, Ж. Леметра, Д. Маріотта, М.С. Можаровського, О.К. Морачковського, В.В. Москвітіна, К. Науменка, Р. Пенні, Ю.М. Работнова, В.О. Стрижала, Д. Хейхерста, С. Тайра, Ж.Л. Шабоша, Ю.М. Шевченка, С.М. Шукаєва.

Теоретичні основи й практичні рекомендації для дослідження деформування й пошкоджуваності при повзучості за допомогою методу скінченних елементів розроблено у роботах Х. Альтенбаха, Дж. Аргіріса, К.-Ю. Бате, Дж. Бонета, Д.В. Бреславського, Дж. Одена, О. Зенкевича, І. Кормю, М. Крисфілда, О.К. Морачковського, К.В. Науменка, А.М. Підгорного, К.М. Рудакова, С.Е. Уманського, Ю.М. Шевченка та інших науковців.

За результатами літературного огляду зроблено висновок щодо недостатньої розробленості методів оцінювання повзучості, яка характеризується анізотропним характером протікання, та кількості проведених відповідних експериментальних досліджень при простому та складному напруженому стані. Наголошується, що потребують подальшого розвитку методи розрахунку повзучості та пошкоджуваності при періодичному навантаженні.

Змістом **другого розділу** є розроблення рівнянь стану, які застосовуються до опису ортотропної повзучості матеріалів, що супроводжується накопиченням прихованої пошкоджуваності. Розглянуто варіант рівнянь, що описують ділянку неусталеної повзучості.

Отримано узагальнення закону зміцнення (закону первісної повзучості), для ортотропних (трансверсально-ізотропних) при повзучості матеріалів

$$\dot{\underline{c}} = \tilde{B} c_{vM}^{-\alpha} \sigma_V^{n-1} [\overline{B}] \underline{\sigma}, \quad (1)$$

де $\dot{\underline{c}} = (\dot{c}_{11}, \dot{c}_{22}, 2\dot{c}_{12})^T$, $\underline{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$ – вектори деформацій повзучості та напружень;

$$[\overline{B}] = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} & 0 \\ \beta_{12} & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\beta \end{bmatrix}, \text{ матриця, що містить матеріальні константи закону}$$

ортотропної повзучості матеріалу при двовимірному напруженому стані, при цьому b_{ijkl} – компоненти тензору, що містять властивості повзучості матеріалу;

$$\beta_{12} = -\frac{1}{2} b_{1111}, \beta_{22} = \frac{b_{2222}}{b_{1111}}, 4\beta = \frac{b_{1212}}{b_{1111}};$$

$$c_{vM} = \sqrt{\frac{2}{3}} c_{ij} c_{ij} - \text{інтенсивність деформацій повзучості; } \tilde{B}, n, \alpha - \text{матеріальні}$$

константи закону зміцнення;

$\sigma_V = \underline{\sigma}^T [B] \underline{\sigma}$ – еквівалентне напруження, яке є спільним інваріантом тензорів напружень та матеріальних констант,

$$\sigma_V = (b_{1111} \sigma_{11}^2 + 2b_{1122} \sigma_{11} \sigma_{22} + b_{2222} \sigma_{22}^2 + 4b_{1212} \sigma_{12}^2)^{1/2}.$$

До опису пошкоджуваності, яка супроводжує ортотропну повзучість, залучено запропоноване О.К. Морачковським кінетичне рівняння для тензору пошкоджуваності другого рангу. Рівняння стану повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності при плоскому напруженому стані представлено у такому вигляді:

$$\dot{\underline{c}} = \tilde{B} \frac{\bar{\sigma}_V^{n-1}}{(1-\eta)^n} [\overline{B}] c_{vM}^{-\alpha} \underline{\sigma}, \quad \dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{p/2} \frac{\sigma_D^{p-2}}{(1-\eta)^{p+s-1}} [\overline{D}] \underline{\sigma}, \quad (2)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{p/2} \frac{\sigma_D^p}{(1-\eta)^{p+s}}, \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1,$$

де $\dot{\underline{\omega}} = (\dot{\omega}_{11}, \dot{\omega}_{22}, 2\dot{\omega}_{12})^T$ – вектор, що складений з компонентів швидкостей параметру пошкоджуваності; η – скалярна міра пошкоджуваності, яка обчислюється за компонентами ω_{ij} ; p та s – константи, що визначаються в експериментах на руйнування при повзучості; σ_D – еквівалентне напруження до визначення пошкоджуваності; до матриці $[\overline{D}]$ входять компоненти тензору, що містять властивості пошкоджуваності матеріалу d_{ijkl}

$$[\overline{D}] = \begin{bmatrix} 1 & \delta_{12} & 0 \\ \delta_{21} & \delta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\delta \end{bmatrix}, \quad \delta_{12} = -\frac{1}{2} d_{1111}, \delta_{22} = \frac{d_{2222}}{d_{1111}}, 4\delta = \frac{d_{1212}}{d_{1111}}.$$

Для випадку періодичного (циклічного) навантаження, коли напруження змінюється з періодом T_p ,

$$\sigma = \sigma^0 + \sigma^1 = \sigma^0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin \left(\frac{2\pi k}{T_p} t + \beta_k \right) \right), \quad (3)$$

$$\text{де } \sigma^1 = \sigma^{\max} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \left(\frac{2\pi k}{T_p} t \right) + b_k \sin \left(\frac{2\pi k}{T_p} t \right) \right) \right) = \sum_{k=1}^{\infty} \sigma^{ak} \sin \left(\frac{2\pi k}{T_p} t + \beta_k \right),$$

$$M_k = \frac{\sigma^{ak}}{\sigma^0} - \text{коефіцієнти амплітуд в процесі циклічної повзучості, } \sigma^0 \neq 0$$

отримано вирази для рівняння стану та кінетичного рівняння для параметру пошкоджуваності при простому та складному напруженому стані. Для цього застосовано асимптотичне розкладання по ступеням малого параметру $\mu = T/t$ деформацій повзучості та міри пошкоджуваності в двох масштабах часу (повільному і швидкому $\xi = \tau/T$, $\tau = t/\mu$)

$$c \cong c^0(t) + \mu c^1(\xi) + \dots, \quad \eta \cong \eta^0(t) + \mu \eta^1(\xi) + \dots, \quad (4)$$

де $c^0(t)$, $\eta^0(t)$, $c^1(\xi)$, $\eta^1(\xi)$ – функції, що відповідають основному процесу повзучості з пошкоджуваністю в повільному (0) і швидкому (1) масштабах часу.

Після осереднення на періоді змінювання напружень T та узагальнення на випадок складного напруженого стану отримано рівняння стану повзучості, що супроводжується пошкоджуваністю, при періодичному навантаженні

$$\dot{c} = \tilde{B} \frac{(\bar{\sigma}_V^0)^{n-1}}{(1-\eta)^n} K(M^{(n)}) [\bar{B}] (c_{VM})^{-\alpha} \sigma^0, \quad \dot{\omega} = d_{1111}^{p/2} H(M^{(p)}) \frac{(\sigma_D^0)^{p-2}}{(1-\eta)^{p+s-1}} [\bar{D}] \sigma^0, \quad (5)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{p/2} H(M^{(p)}) \frac{(\sigma_D^0)^p}{(1-\eta)^{p+s}}, \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1,$$

$$\text{де } K(M^{(n)}) = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{(n)} \sin(2\pi k \xi + \beta_k) \right)^n d\xi, \quad H(M^{(p)}) = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{(p)} \sin(2\pi k \xi + \beta_k) \right)^p d\xi -$$

функції, що відбивають вплив періодичного навантаження, $M^{(n)} = M^{(p)} = \frac{\sigma^{ak}}{\sigma^0} -$

коефіцієнти асиметрії циклу напружень.

З застосуванням даних експериментальних досліджень автора при температурі 293 К при розтягу при повзучості зразків зі сталі 3, вирізаних у різних напрямках відносно до прокатки, отримано такі значення констант, що входять до рівнянь стану: $m=18.305$, $k=0.1887$; $\left((\alpha+1)\tilde{B} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} = 3.166 \cdot 10^{-31}$ (10 МПа) $^{-m}$ /Год, $n=96.99$, $\alpha=4.3$, $b_{1111} = 6.9 \cdot 10^{-4}$, $b_{1122} = -3.45 \cdot 10^{-4}$, $b_{2222} = 6.7 \cdot 10^{-4}$, $b_{1212} = 1.85 \cdot 10^{-4}$, (10 МПа) $^{-2m/m+1}$ /(Год) $^{2/m+1}$.

За допомогою запропонованих рівнянь стану (1) та значень констант, що до них входять, проведено розрахункове визначення залежності деформації повзучості від часу при статичному та періодичному навантаженні для трьох напрямків відносно прокатки сталевго листа. При статичному навантаженні проведено порівняння для трьох значень напружень розтягу 378.7 МПа, 366.8 МПа та 352.3 МПа. Як приклад, на рис.1 наведено порівняння експериментальних даних (точки) та розрахункових (суцільні лінії). Крива 1 містить дані для напрямку вздовж прокатки, крива 2 – поперек, крива 3 – під кутом 45° до прокатки. Найбільша відміна є для кривої 2, де різниця між розрахунковими та експериментальними даними не перевершує 15%.

Дані експериментальних досліджень при періодичному навантаженні при змінюванні напруження розтягу за циклом, наведеним на рис. 2, де $T_s = 60$ с. (0.0166 год.), $T_p = 240$ с. (0.0066 год.), 10 циклів, $\sigma^0 = 352.3$ МПа, $\sigma^{max} = 26.4$ МПа, також порівнювались з розрахунковими, отриманими за першим рівнянням системи (5). На рис. 3 наведено криві повзучості, номери кривих відповідають кривим рис. 1.

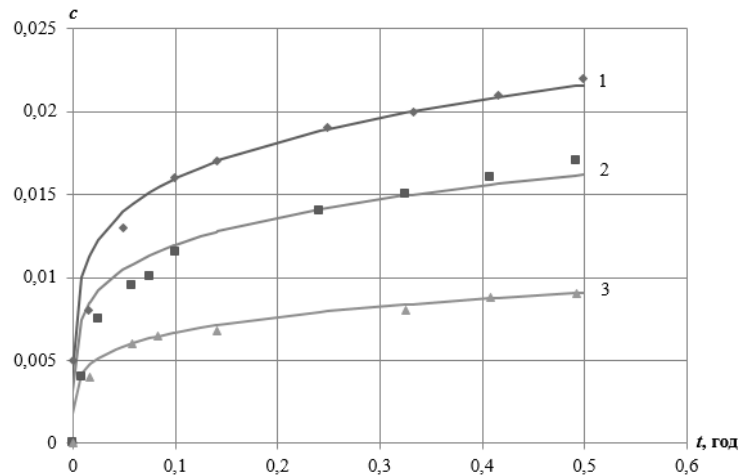


Рис. 1. Криві повзучості зразків, вирізаних у трьох напрямках, при напруженні 378.7 МПа (статичне навантаження)

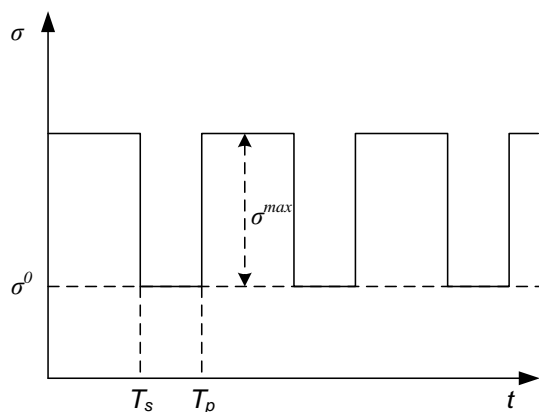


Рис. 2. Типовий цикл навантаження

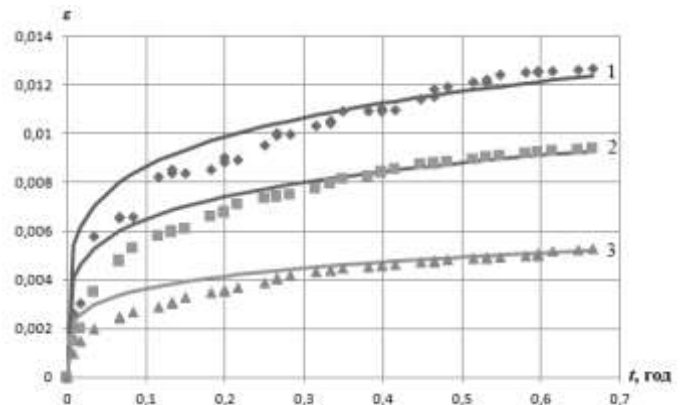


Рис. 3. Криві повзучості зразків, вирізаних у трьох напрямках (періодичне навантаження)

Аналіз кривих на рис. 3 свідчить про те, що запропоновані рівняння для опису повзучості при періодичній зміні напружень добре описують експериментально отримані криві, починаючи з 4 циклу. Це може бути пояснено обмеженням на застосування асимптотичного методу при досить великих значеннях малого параметру на перших циклах навантаження. Чим більше число циклів навантаження, тим менше похибка: від у середньому 30-35% для перших циклів до 10% у 4-10 циклах. Зроблено висновок, що запропоновані осереднені рівняння (5) мають застосовуватись при числі періодів навантаження, більших чи рівних 4.

У третьому розділі надано математичну постановку задачі повзучості та пошкоджуваності при статичному та періодичному навантаженні. Розглянуто випадок плоского напруженого стану. Для розв'язання задачі застосовано дві системи рівнянь, отримані при використанні методу двох масштабів часу та осереднення на періоді для розв'язання загальної задачі повзучості тіл, які піддані спільній дії статичного та періодичного навантаження. Застосований підхід та рівняння запозичено з роботи Д.В. Бреславського, О.К. Морачковського, О.А. Татарінової¹.

Основна система має вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} &= 0, \quad x_i \in \Omega; \quad i=1, 2 \\ \sigma_{ij} n_j &= t_i^0, \quad x_i \in \Gamma_2; \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} (\varepsilon_{ij} - p_{ij} - c_{ij}); \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x \in \Omega; \quad u_i|_{\Gamma_1} = \tilde{u}_i; \quad x \in \Gamma_1; \\ u(x_i, 0) &= u_0(x); \quad c_{ij}(x_i, 0) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Тут збережено традиційні для механіки позначення основних величин. Деформації повзучості c_{ij} визначаються за рівняннями стану (5). Розглядається випадок початкового пружно-пластичного деформування, для визначення розподілу компонентів НДС при $t=0$ розв'язується окрема задача. Компоненти тензорів амплітудних напружень, які є необхідними для розрахунку функцій впливу у (5), визначають розв'язком другої системи ($k=1, 2, \dots$):

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}^{ak} &= -\gamma(\tilde{p}_k)^2 u_i^{ak}, \quad x_i \in \Omega; \\ \sigma_{ij}^{ak} n_j &= t_i^{\max} A_k, \quad x_i \in \Gamma_2; \\ \varepsilon_{ij}^{ak} &= \frac{1}{2} (u^{ak}_{i,j} + u^{ak}_{j,i}) = C_{ijmn} \sigma_{mn}^{ak}, \quad x_i \in \Omega; \\ u_i^{ak}(0) &= 0, \quad x_i \in \Gamma_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Поверхнєве навантаження складається з сталої та періодично змінюваних частин $t_i(x_i, t) = t_i^0(x_i) + t_i^{\max}(x_i) \Psi^{(1)}(t)$, $i=1, 2$.

Для розв'язання поставленої задачі повзучості застосовано метод скінченних елементів у поєднанні з різницеvими методами інтегрування за часом. До чисельного моделювання залучено розроблений в НТУ «ХП» програмний комплекс *FEM CREEP*, модернізований у роботі для розв'язання задач повзучості та пошкоджуваності елементів, виготовлених з матеріалів з ортотропними властивостями повзучості та при початковому навантаженні, яке призводить до пластичних деформацій.

Працездатність модернізованого комплексу доведено шляхом порівняння отриманих за його допомогою чисельних результатів з розв'язками тестових задач. Розглянуто задачі пружно-пластичного деформування плоского стрижня, розтягу прямокутної пластини з центральним отвором, виготовленої з титанового сплаву ВТ1-0, при температурі 773 К, який має ортотропні властивості повзучості

¹Бреславский Д.В., Морачковский О.К., Татарінова О.А. Високотемпературная ползучесть и длительная прочность элементов конструкций при циклическом нагружении. *Проблеми прочності*. Киев, 2008. № 5. С. 45-53.

та пошкоджуваності. Як приклад, наведемо результати порівняння експериментальних даних з повзучості зразків, що їх вирізано у трьох різних напрямках, з розрахунковими даними за рівняннями (1) та даними чисельного моделювання, коли як модель зразків розглядалась тонка довга пластина при плоскому напруженому стані. Рис. 4 містить три скінченноелементні моделі зразків, а рис. 5 – криві повзучості при осьовому розтягу 378.7 МПа для напрямку під кутом 45° до прокатки.

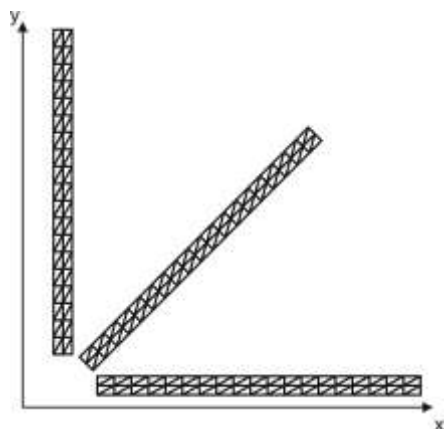


Рис. 4. Розташування скінченноелементних моделей зразків при розтязі

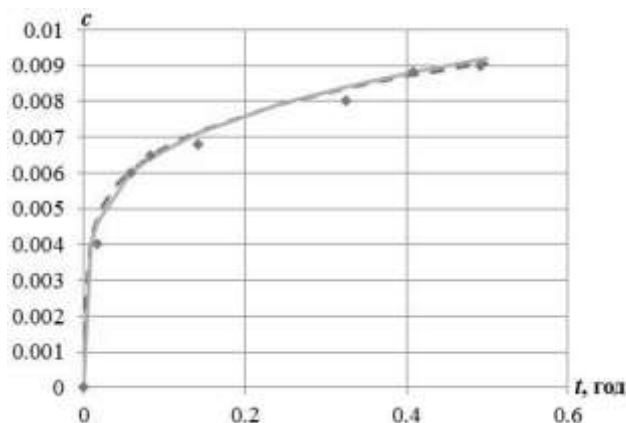


Рис. 5. Порівняння експериментальних, розрахункових та скінченноелементних даних (напрямок під кутом 45° до напрямку прокатки)

На рис. 5 експериментальні дані позначено точками, розрахункові – переривчастою лінією, скінченноелементні результати – суцільною лінією. Аналогічні порівняння виконано для випадку довантаження зразку та періодичного навантаження.

За результатами розв'язання тестових задач зроблено такий висновок щодо прийнятної точності результатів: відмінності між чисельними та експериментальними даними не перевершили похибок, що мали місце при порівнянні з розрахунковими: 15% для статичного навантаження та 25-30% для періодичного, причому 10-15% було отримано для числа циклів, більшого 4.

Результати проведених в роботі експериментальних досліджень складають зміст **четвертого розділу**. Досліджувалось деформування при кімнатній температурі 293 К плоских зразків та пластин з п'ятьма отворами при осьовому розтязі зі сталі 3. Шляхом випробувань на установці Heskert FP-100/1 визначено діаграму деформування та встановлено ізотропію властивостей пружності та пластичності сталі, що розглядається. За допомогою випробувальної машини АІМА-5-2 виконано експерименти на повзучість зразків при трьох рівнях навантажень. Всього на повзучість випробувано 27 зразків (по три для кожного заданого напруження та напрямку прокатки). Для замірів застосовано індекатори годинникового типу з точністю 0.01 мм. У зв'язку зі швидкоплинністю повзучості в усіх експериментах використано відеофіксацію.

Встановлено, що при даних рівнях напружень зразки деформувались з суттєвими пластичними деформаціями (3.8%-6%), повзучість інтенсивно

відбувалась у перші 30 хвилин випробувань, а потім практично припинялась. Для перевірки один зразок було випробувано на повзучість протягом 26 днів, при цьому значення набутої деформації після 0.5 год. склало $72.6 \cdot 10^{-4}\%$. Це дозволило характеризувати повзучість, що розглядається, як короткочасну.

Рис. 6 та 7 містять експериментально отримані криві деформування зразків, вирізаних вздовж та поперек напрямку прокатки відповідно. На рисунках крива 1 відповідає напруженню 378.7 МПа, крива 2 – 366.8 МПа та крива 3 – 352.3 МПа.

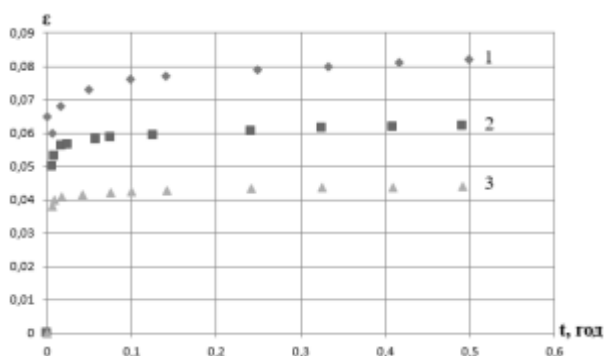


Рис. 6. Залежність повної деформації зразку від часу (зразки, що вирізано вздовж напрямку прокатки)

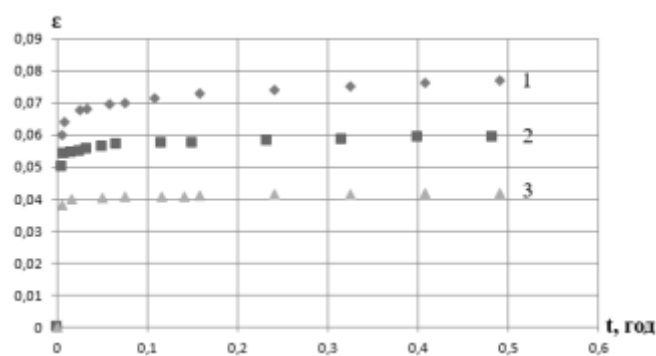


Рис. 7. Залежність повної деформації зразку від часу (зразки, що вирізано поперек напрямку прокатки)

Результати виконаних випробувань зразків на періодичне навантаження надано на рис. 3. Всього було протестовано за програмою (рис. 2) 9 зразків – по три зразки для кожного напрямку прокатки. Дані, отримані при випробуваннях – як при статичному, так й при періодичному навантаженні, осереднювались. На графіках подані криві, побудовані по середнім арифметичним значенням деформацій.

Для встановлення достовірності результатів, що отримуються при застосуванні запропонованих рівнянь стану при розрахунках у модернізованому програмному комплексі *FEM CREEP*, було виконано експериментальне дослідження деформування при осьовому розтязі пластин з отворами зі сталі 3. Для реалізації рівня напружень, при якому у цій сталі має місце повзучість при кімнатній температурі, було обрано схему пластини з п'ятьма отворами. Проведено випробування при статичному та періодичному навантаженнях. На пластини наносилась мірна сітка, після експерименту пластини сканувались, зображення оброблялись за допомогою спеціально розробленої програми на мові C++. За виконаною обробкою отримано дані з осьових переміщень точок сітки. Всього було досліджено 7 пластин – три при статичному та чотири при періодичному навантаженні. Дані вимірів осереднювались.

При статичному навантаженні пластини навантажувались вагою 3000 кг на 60 с. При періодичному – за схемою рис. 2 на час $T_c = 10$ с. пластину було навантажено силою розтягу 3000 кг, наступні 20 с. – силою 2725 кг, тобто $T_p = 30$ с. При періодичному навантаженні на п'ятому циклі відбувалось руйнування пластин у районі нижніх технологічних отворів, виготовлених для

їхнього монтажу. У зв'язку з цим в роботі розглядалось 4 періоди навантаження.

На рис. 8 наведено фрагмент пластини з розташуванням точок, в яких проводилися заміри, а на рис. 9 – збільшене зображення деформованої при статичному навантаженні пластини. Для дев'яти точок замірів, обраних з точки зору найбільш цікавої поведінки при деформуванні в околах отворів, в роботі побудовано криві повзучості. Для випадку періодичного навантаження вони наведені на рис. 10.

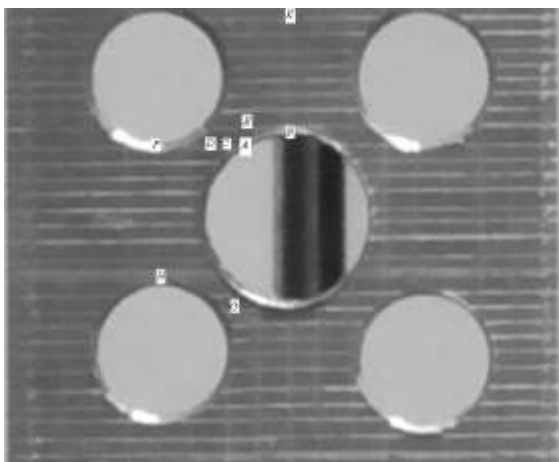


Рис. 8. Розташування точок на пластині, для яких проводились виміри

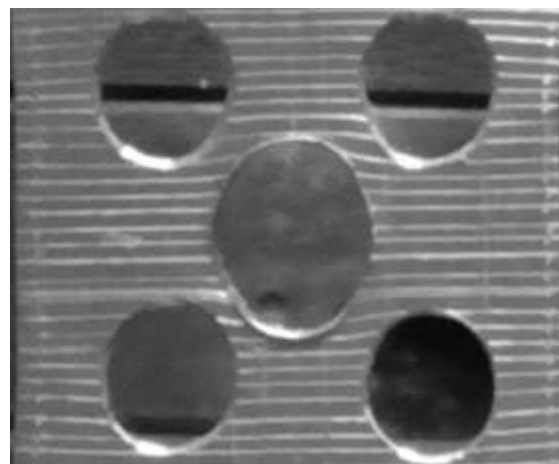


Рис. 9. Фрагмент деформованої пластини, збільшення для $t = 30$ с.

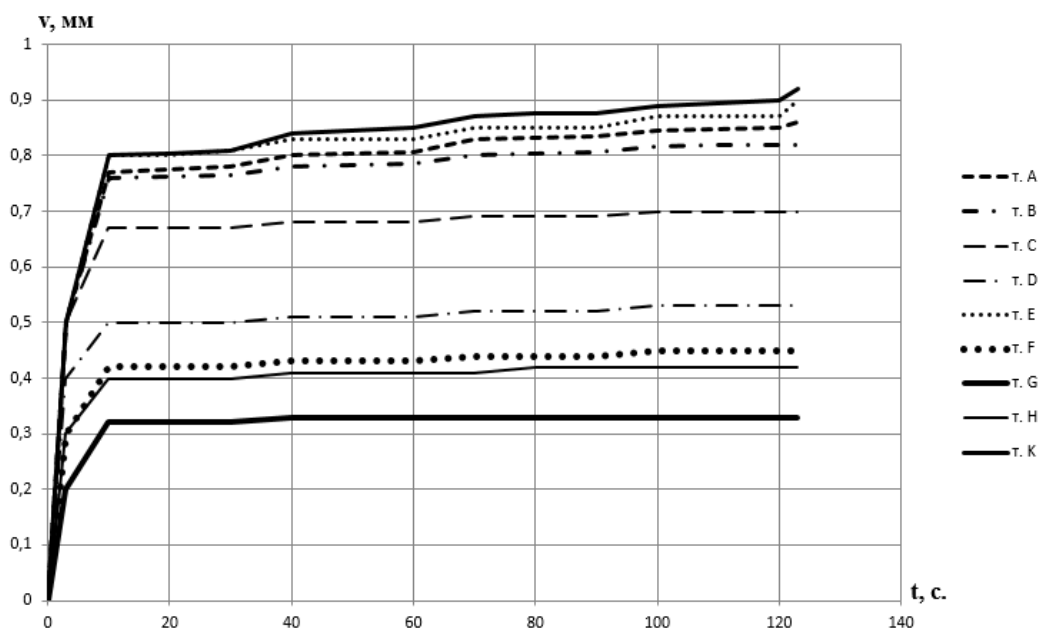


Рис. 10. Замірені переміщення у точках пластини з отворами (періодичне навантаження)

П'ятий розділ містить опис отриманих чисельних даних при розрахунках короткочасної повзучості пластин при навантаженні у їхній площині. Першою розглянуто задачу про періодичний осьовий розтяг до руйнування пластини з титанового сплаву ВТ1-0 при температурі 773 К. Застосовано повну систему

визначальних рівнянь (5). Отримано розподіли міри та компонентів тензору пошкоджуваності для різних моментів часу деформування.

Проведено чисельне скінченноелементне моделювання повзучості пластин з п'ятьма отворами при статичному й періодичному навантаженнях, яке було задано в експериментах. Внаслідок симетрії пластини розглядалась її половина. За дослідженнями збіжності результатів обрано схему з 1474 елементів. У зв'язку з присутністю в околі отворів скінченних деформацій з максимумом 6% до розрахунку початкового пружно-пластичного стану залучено програмний комплекс *ANSYS* (студентська версія) з узгодженою з ПК *FEM CREEP* СЕ сіткою, в якому й проводилось чисельне моделювання повзучості.

Рис. 11 містить картину деформування половини пластини у вигляді скінченноелементної сітки, вузли якої зміщено за даними розрахованих переміщень при статичній повзучості, для $t=30$ с.



Рис. 11. Деформована СЕ сітка при статичному навантаженні, $t=30$ с.

Отримані результати порівнювались з експериментальними. До порівняння залучались дані замірів за часом у дев'яти вибраних точках пластин в околах отворів, позначених латинськими літерами. Деякі результати надано у табл. 1 та на рис. 12-13. Таблиця містить чисельні дані у вузлах СЕ сітки та експериментальні дані з осьових переміщень для моменту $t=30$ с. Аналіз даних, наведених у таблиці, свідчить про те, що у районах найбільшого рівня переміщень максимальна відмінність між чисельними та експериментальними даними складає 32-33%, але в інших точках похибки є значно меншими.

Таблиця 1

Статичне навантаження пластини з отворами. Порівняння експериментальних та чисельно визначених переміщень [мм] для $t=30$ с

Точка / номер вузла	A / 44	B / 37	C / 270	D / 286	E / 250	F / 169	G / 258	H / 194	K / 424
Експериментальні дані	0.4	0.35	0.23	0.15	0.45	0.17	0.17	0.17	0.5
Чисельні дані	0.32	0.34	0.25	0.21	0.3	0.2	0.13	0.19	0.34
Похибка, %	20	3	9	29	33	15	24	11	32

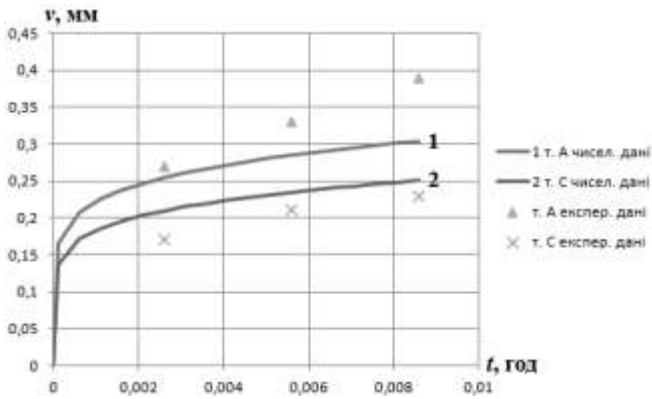


Рис. 12. Змінювання за часом переміщень у точках А та С (статичне навантаження)

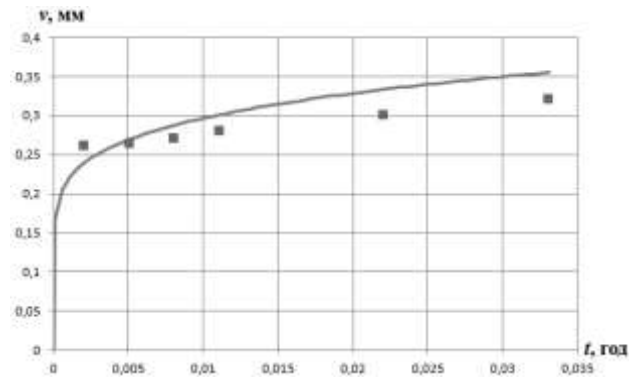


Рис. 13. Змінювання за часом переміщень у точці В (періодичне навантаження)

За всіма результатами порівнянь зроблено висновок щодо задовільного, на рівні досягнутого у теорії повзучості, ступеню відповідності розрахункових та експериментальних даних. Середня різниця між ними складала 25-30% з максимальним відхиленням у двох точках: 35% (періодичне навантаження) та 40% (статичне).

В роботі приведено результати чисельного моделювання короткочасної повзучості прямокутних листів зі сталі 3 після прокатки через 1 та 2 кліті з прокатними валками. До розрахунків залучено розроблені та експериментально перевірені в роботі рівняння стану з визначеними константами та програмний комплекс *FEM CREEP*. Як початкові умови, до моделювання залучено залишковий напружений стан листів після їхнього проходження через кліті. Шляхом аналізу низки прорахованих варіантів визначено максимально можливі зусилля розтягу, які не викликатимуть деформацій повзучості. Встановлено, що для схеми з двома клітями залишковий напружений стан є більш сприятливий для реалізації максимально потрібних зусиль витяжки.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено метод розрахунку ортотропної повзучості при плоскому напруженому стані та незмінному й періодичному навантаженнях із застосуванням запропонованих у роботі рівнянь стану. Експериментально та за допомогою чисельного моделювання, використовуючи розвинений у роботі програмний комплекс «*FEM CREEP*», вивчено короткочасну повзучість сталі 3 при простому та складному напруженому стані за кімнатної температури.

Найбільш важливі наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблено та експериментально перевірене рівняння стану ортотропної повзучості, що використовує гіпотезу зміцнення, для випадку плоского напруженого стану та статичного й періодично змінюваного навантаження.

2. За допомогою асимптотичного методу двох масштабів часу та осереднення на періоді змінювання напруження отримано нову форму для запропонованого О.К. Морачковським кінетичного рівняння з тензорним параметром пошкоджуваності для випадку періодичного навантаження.

3. За допомогою проведеного циклу експериментальних досліджень на стандартній випробувальній машині АІМА-5-2 на плоских зразках зі сталі 3 отримано нові дані та закономірності з її короткочасної повзучості при кімнатній температурі.

Експериментально отримано значення констант для рівняння стану ортотропної (трансверсально-ізотропної) повзучості. Встановлено, що: криві повзучості у всіх напрямках вздовж, поперек та під кутом 45° до напрямку прокатки сталевих листів є подібними; максимальна швидкість повзучості реалізується у напрямку вздовж прокатки, а мінімальна – під кутом 45° до нього; вигляд кривих повзучості відповідає першій ділянці (неусталеної повзучості); основна частка деформації набувається в перші хвилини повзучості, що надає можливість класифікації кривих типом короткочасної повзучості; повзучість практично припиняється після 30 хвилин деформування.

В дослідженнях на періодичне навантаження зразків прямокутним циклом навантаження-розвантаження на базі дії середнього напруження встановлено істотну інтенсифікацію повзучості у порівнянні з чисто статичними випробуваннями.

Виконано дослідження деформування прямокутних пластин з п'ятьма отворами при розтязі. За допомогою відеофіксації та нанесених на поверхню матеріалу мірних сіток отримано кількісні та якісні характеристики процесу деформування пластин при дії статичного та періодичного навантаження.

4. У роботі розвинений програмний комплекс «*FEM CREEP*» на випадок попереднього пластичного деформування та опису пошкоджуваності за допомогою тензорного параметру пошкоджуваності. Програмний комплекс «*FEM CREEP*» використаний для відтворення результатів обчислень у вигляді розподілів компонентів напружено-деформованого стану та параметру пошкоджуваності. Проведено дослідження достовірності розрахункового методу у цілому при порівнянні чисельних та експериментальних результатів при простому та плоскому напруженому стані, що має місце у досліджених пластинах з п'ятьма отворами. Встановлено цілком припустиме для фізично нелінійних задач механіки відхилення розрахункових та експериментальних даних у межах 25-30%, за винятком двох точок при періодичному навантаженні.

5. Чисельним моделюванням встановлено нові закономірності повзучості та пов'язаного з нею прихованого руйнування титанової пластини з центральним отвором при статичному та періодичному навантаженнях. Встановлено закономірності деформування при прокатці прямокутних сталевих листів, які надають можливість обрати безпечні з точки зору неприпустимих переміщень режимів руху.

6. Результати роботи у вигляді розрахункових даних та рекомендацій використовуються у практиці проектування Публічним акціонерним

товариством «Дніпропетровський металургійний завод ім. Комінтерну» та були використані при виконанні держбюджетних тем МОН України «Розробка методів, алгоритмів та програм для оцінювання динаміки, міцності і точності управління ракетної техніки» (Д.Р. № 0113U000448, 2013-2014 рр.) та «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017 р.), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Breslavskii D.V., Metelev V.A., Morachkovskii O.K. Anisotropic creep and damage in structural elements under cyclic loading. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, № 2. P. 235-241.
2. Breslavsky D.V., Mietielov V.O. Consideration the influence of residual stresses and creep strains on rolling the steel sheets. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2016. № 46 (1218). С. 77-80.
3. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Пластичність та повзучість сталі 3 при кімнатній температурі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2015. № 57 (1166). С. 14-19.
4. Метельов В.О. Пружнопластичне деформування при виготовленні трубчатих заготовок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2015. № 55 (1164). С. 50-53.
5. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2013. № 58 (1031). С. 23-31.
6. А. с. № 64660. Україна. Комп'ютерна програма "Розрахунки повзучості методом скінченних елементів" ("FEMCreep v 1.3") / Д.В. Бреславський, Ю.М. Коритко, В.О. Метельов. № 65155 ; заявл. 02.02.16 ; опубл. 29.04.16, Бюл. № 40. С. 492.
7. Breslavsky D., Mietielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O., Pashchenko S. Asymptotic solution of anisotropic cyclic creep problem. *Nonlinear dynamics - 2016: Proceedings of 5th International Conference, Kharkov, 27-30 September 2016*. Kharkov, 2016. P. 276.
8. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Рівняння стану трансверсально-ізотропної повзучості сталі 3. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХІV міжнар. наук.-практ. конф.*, Харків, 18-20 травня 2016 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Ч. 1. С. 51.
9. Breslavsky D.V., Mietielov V.O., Morachkovsky O.K., Pashchenko S.O., Tatarinova O.A. Asymptotic methods and finite element method in cyclic creep-damage problems. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики*.

Зб. наук. праць, Львів, 24-25 вересня 2015 р. Львів: Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2015. С. 19-20.

10. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Конкін В.М., Макогон О.А. Деформування сталевих пластин при високих напруженнях. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези XXIII міжнар. наук.-практ. конф.*, Харків, 20-22 травня 2015 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. Ч. 1. С. 39.

11. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К. Анизотропия ползучести и повреждаемости в элементах конструкций при циклическом нагружении. *Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении: тезисы пятой междунар. науч.-техн. конф.*, Киев, 27-31 мая 2014 г. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2014. С. 29-30.

12. Метельов В.О. Короткочасна повзучість та руйнування тонкостінних елементів літальних апаратів. *До 100-річчя з дня народження академіка В.Г. Сергєєва та 50-річчя створення в ХПІ спеціальності «Динаміка польоту та управління»*: матеріали доповідей наук.-техн. конф. «Сергєєвські читання», Харків, 11-12 вересня 2014 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. С. 48-49.

13. Бреславський Д.В., Конкін В.М., Метельов В.О. Деформування та руйнування сталевих матеріалів при дії напружень, близьких до границі міцності. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези XXII міжнар. наук.-практ. конф.*, Харків, 21-23 травня 2014 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. Ч. 1. С. 40.

14. Breslavsky D., Korytko Yu., Mietielov V., Morachkovsky O., Tatarinova O. Numerical calculations of creep damage at cyclic loading by use of tensor damage parameter model. *Nonlinear dynamics - 2013: proceedings of the Fourth International Conference, Sevastopol, 19-22 June 2013*. Kharkov: «Tochka», 2013. P. 379-384.

15. Бреславский Д.В., Метелев В.А., Морачковский О.К., Татарина О.А. Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов. *Математическое моделирование в естественных науках: тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов*, Пермь, 2-5 октября 2013 г. Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 28-29.

16. Бреславський Д.В., Метельов В.О., Татарінова О.А. Анізотропія повзучості та пошкоджуваності в пластинах з отвором. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф.*, Харків, 29-31 травня 2013 р.: у 4 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Ч. 1. С. 34.

17. Метелев В.А., Наумов И.В. Моделирование упруго-пластического деформирования тонкостенных конструкций. *Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV междунар. науч. конф.: в 10 т.* Харьков: НТУ «ХПІ», 2012. Т. 3. Секция 5. С. 74-76.

18. Бреславський Д.В., Метельов В.О. Розрахунки напружено-деформованого стану коробчастої конструкції. *До 50-річчя першого пілотованого польоту людини у космос: матеріали X наук.-практ. конф.*

студентів та аспірантів інженерно-фізичного факультету НТУ «ХП», Харків, 12 квітня 2011 р. Харків: НТУ «ХП», 2011. С. 80-81.

АНОТАЦІЯ

Метельов В.О. Короткочасна ортотропна повзучість при плоскому напруженому стані. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, 2018.

Надано постановку двовимірної задачі ортотропної повзучості з ортотропними властивостями пошкоджуваності матеріалу при статичному й періодичному навантаженні.

Виконано експериментальні дослідження короткочасного деформування при простому та плоскому напруженому стані. Розглянуто статичне й періодичне навантаження. Для одновісних зразків та пластин з отворами отримано криві короткочасної повзучості.

Розроблено рівняння стану для матеріалів, що характеризуються першою ділянкою неусталеної повзучості з ортотропією властивостей при статичному та періодичному навантаженнях. Проведено аналіз достовірності результатів розрахунку при порівнянні з експериментальними даними.

Вдосконалено метод, алгоритми та програмний комплекс для розв'язання двовимірних задач повзучості. Виконано дослідження достовірності розрахункового методу у цілому при порівнянні чисельних та експериментальних результатів при простому та плоскому напруженому стані.

Чисельним моделюванням та експериментально отримано нові закономірності: неусталеної повзучості при статичному й періодичному навантаженнях, повзучості та пов'язаного з нею прихованого руйнування титанової пластини з центральним отвором; деформування при прокатці прямокутних сталевих листів.

Ключові слова: короткочасна повзучість, ортотропні властивості, пошкоджуваність, рівняння стану, плоский напружений стан, метод скінченних елементів, експериментальні дослідження.

АННОТАЦИЯ

Метелев В.А. Кратковременная ортотропная ползучесть при плоском напряженном состоянии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. – Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, 2018.

Приведена постановка двумерной задачи ортотропной ползучести с ортотропными свойствами повреждаемости материала при статическом и периодическом нагружении.

Выполнены экспериментальные исследования кратковременного деформирования при простом и плоском напряженном состоянии образцов и пластин с отверстиями. При статическом и периодическом нагружении экспериментально получены кривые кратковременной ползучести, установлена существенная ортотропия ее свойств в зависимости от направлений прокатки в стальных листах.

Разработаны уравнения состояния для материалов, характеризующихся первым участком неустановившейся ползучести с ортотропией свойств при статическом нагружении. Для периодического нагружения с частотами, меньшими 1 Гц, уравнения для тензора деформаций ползучести и параметра повреждаемости получены с использованием метода двух масштабов времени – с помощью асимптотических разложений основных неизвестных по малому параметру и дальнейшего осреднения на периоде. Для описания процессов накопления повреждаемости использован тензорный параметр, по его компонентам вычисляется скалярная мера, входящая в уравнение теории ползучести инкрементального типа. Проведен анализ достоверности результатов расчета при сравнении с экспериментальными данными.

Усовершенствован метод, алгоритмы и программный комплекс для решения двумерных задач ползучести. Выполнены исследования достоверности расчетного метода в целом при сравнении численных и экспериментальных результатов при простом и плоском напряженном состоянии.

Численным моделированием и экспериментально получены новые закономерности: кратковременной ортотропной неустановившейся ползучести при простом и плоском напряженном состоянии, статическом и периодическом нагружениях; ползучести и вызванного ею скрытого разрушения титановой пластины с центральным отверстием; деформирования при прокатке прямоугольных стальных листов.

Ключевые слова: кратковременная ползучесть, ортотропные свойства, повреждаемость, уравнения состояния, плоское напряженное состояние, метод конечных элементов, экспериментальные исследования.

ABSTRACT

Mietielov V.O. Short-time orthotropic creep under plane stress state. – With manuscript rights.

Thesis for candidate of technical sciences degree by speciality 01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids. – Podgorny Institute for mechanical engineering problems NAS of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The statement of the twodimensional problem of orthotropic creep with orthotropic properties of material damage under static and periodic loading is presented.

Experimental investigations of short-term deformation at a uniaxial and plane stress state are carried out. Static and periodic loading is applied. Short-term creep curves were obtained for uniaxial specimens and plates with holes.

State equations are developed for materials characterized by the first stage of unsteady creep with orthotropic properties under static and periodic loading. The analysis of reliability is made comparing calculation results with experimental data.

The method, algorithms and program complex are improved for the twodimensional creep problems. Research reliability of the calculation method in general are confirmed by comparing numerical and experimental results at the uniaxial and plane stress state.

New regularities were obtained using numerical modeling and experiments. They are unsteady creep under static and periodic loading, creep and the creep-induced hidden damage of the titanium plate with a central hole; deformation of rectangular steel sheets during rolling.

Keywords: short-term creep, orthotropic properties, damage, state equations, plane stress state, finite element method, experimental investigations.

Метельов Володимир Олександрович

Короткочасна ортотропна повзучість при плоскому напруженому стані

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск:
к.т.н., доц. Плаксіє Ю.А.

Підписано до друку 02.04.2018 р. Формат 60x90/16.
Гарнітура Times New Roman Папір офсетний.
Друк – цифровий. Ум. друк. аркушів 0,9.
Наклад 100 прим. Замовлення № 504837

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л.О.
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16
Свідоцтво № 24800000000079553, від 16.05.2007 р.