

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

БОНДАРЕЦЬ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 539.4

**МОДЕЛЬ НАКОПИЧЕННЯ РОЗСІЯНИХ ПОШКОДЖЕНЬ
В АНІЗОТРОПНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ
ПРИ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ**

01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор **Бобир Микола Іванович**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, директор механіко-машинобудівного інституту

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор **Кучер Микола Кирилович**
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Завідувач відділу механіки конструкційних матеріалів №2

Кандидат технічних наук
Клочков Ілля Миколайович
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, учений секретар, старший науковий співробітник відділу міцності зварних конструкцій № 003

Захист відбудеться «___» _____ 2021 р. о 15 годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.01 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м.Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп.№1, ауд.№166.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м.Київ-56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «___» _____ 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.О.Боронко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. На сьогодні проблемам достовірного прогнозування ресурсу експлуатації відповідальних елементів конструкцій виробів нової техніки у наукоємних та високотехнологічних сегментах машинобудівного комплексу (авіакосмічна галузь, енергетичне машинобудування та ін.) на стадії їх проектування та залишкового ресурсу на стадії їх експлуатації приділяється особливо велика увага у всіх промислово розвинених країнах світу.

Вирішення комплексних конструкторських та технологічних задач присвячених розрахунку елементів конструкцій, здійснюється відповідно до стандартизованих підходів, що у своїй більшості не враховують фактори анізотропії та кінетику накопичення пошкоджень. Це пов'язано з тим, що до цих пір не існує єдиної системи розрахунку технологічних параметрів формоутворення що враховують анізотропію та недостатньо систематизовані дані за показниками анізотропії для різних металів і сплавів. В той же час відомо, що навіть початково ізотропні матеріали під дією експлуатаційних навантажень можуть набувати деформаційної анізотропії. Існують експериментальні докази того, що руйнування конструкцій часто асоціюється з анізотропією пошкоджуваності матеріалу навіть у випадках початково ізотропного матеріалу. Реальна різниця в величинах фізико-механічних характеристик одного і того ж матеріалу в різних напрямках може досягати 40%. В свою чергу, реальна початкова (вихідна) анізотропія змінюється та розвивається. Тобто, врахування анізотропії є таким же важливим фактором, як і врахування історії навантаження та виду напруженого стану. В свою чергу, пружно-пластичне деформування конструкційного матеріалу (на мікро та мезорівнях) супроводжується виникненням та ростом розсіяних анізотропних пошкоджень (руйнувань) у вигляді різного роду мікропор та мікротріщин. Для ізотропного матеріалу відомі параметри пошкоджуваності у вигляді скаляра, вектора або тензора, розроблені феноменологічні моделі та критерії руйнування на стадії зародження макротріщини. Але в теоретичному відношенні моделі анізотропної пошкоджуваності є істотно складнішими за моделі, що використовуються у випадку ізотропного матеріалу при забезпеченні сумісності з термодинамічними принципами механіки суцільного середовища. Ідентифікація параметрів матеріалу за анізотропної пошкоджуваності вимагає проведення більшої кількості експериментів при складних програмах випробувань.

Виходячи з парадигми викладеного, важливим і перспективним напрямком в сучасній механіці твердого деформівного тіла є розробка ефективних моделей накопичення розсіяних пошкоджень з урахуванням параметрів анізотропії фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі динаміки і міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» здобувач прийняв участь як виконавець за держбюджетними темами: «Розроблення нових феноменологічних

моделей та узагальненого методу прогнозування ресурсу експлуатації елементів конструкцій із композиційних матеріалів з врахуванням пошкоджуваності» (держреєстрація №0109U001607); «Розроблення методу діагностики технічного стану та прогнозування ресурсу конструкцій з урахуванням технологічної і експлуатаційної спадковості» (держреєстрація №0106U002266), як відповідальний виконавець держбюджетної теми: «Розроблення узагальненого методу прогнозування ресурсу експлуатації елементів конструкцій із композиційних матеріалів при складному малоцикловому навантаженні з врахуванням пошкоджуваності» (держреєстрація №0112U002444).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – на основі теоретичних та комплексних експериментальних досліджень розробити нову ефективну узагальнену феноменологічну модель накопичення розсіяних пошкоджень, що враховує параметри анізотропії конструкційних матеріалів при їх пружно-пластичному деформуванні.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити наступні задачі:

- провести комплекс експериментальних досліджень по визначенню кінетики накопичення пошкоджуваності в анізотропних конструкційних матеріалах;
- перевірити підходи для експериментального визначення (оцінки) параметру пошкоджуваності методом зміни модуля пружності, що базуються на концепції еквівалентності деформацій, приросту додаткової пружної енергії та еквівалентності пружної енергії;
- проаналізувати зв'язок анізотропії вихідних механічних характеристик та параметра пошкоджуваності в конструкційних матеріалах в процесі пружно-пластичного деформування;
- перевірити достовірність та встановити границі використання сучасних феноменологічних моделей накопичення мікропошкоджень для умов пружно-пластичного деформування;
- розробити та експериментально обґрунтувати отриману узагальнену феноменологічну модель пошкоджуваності та межі її використання шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних для сучасних конструкційних матеріалів.

Об'єктом досліджень є кінетика накопичення розсіяних пошкоджень в анізотропних металевих конструкційних матеріалах при пружно-пластичному деформуванні.

Предметом досліджень є моделювання процесів накопичення мікропошкоджень в анізотропних конструкційних матеріалах за умов пружно-пластичного деформування.

Методи досліджень. Експериментально-теоретичні методи, що базуються на основних положеннях термодинаміки незворотних процесів, механіки твердого деформівного тіла та сучасної континуальної механіки пошкоджуваності (КМП). Достовірність методів дослідження забезпечувались використанням сучасного експериментального обладнання з сучасними комп'ютеризованими високоточними спеціальними вимірювальними системами для проведення та обробки результатів

випробувань з відповідним програмним забезпеченням. Точність розробленого методу перевірялась шляхом зіставлення розрахункових даних із результатами експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів

- вперше запропонована модифікована узагальнена модель кінетики накопичення розсіяних пошкоджень, яка враховує анізотропію механічних властивостей металевих конструкційних матеріалів. Показана залежність граничних значень розсіяної пошкоджуваності від коефіцієнтів анізотропії;
- розроблено метод визначення параметрів моделі анізотропної пошкоджуваності та відповідних коефіцієнтів анізотропії конструкційних матеріалів на основі вимірювання зміни модуля пружності;
- показано та обґрунтовано границі використання феноменологічних моделей пошкоджуваності для умов активного навантаження конструкційних матеріалів, які базуються на гіпотезах про еквівалентність деформацій, додаткової пружної енергії та приросту додаткової пружної енергії відповідно;
- встановлено закономірності впливу анізотропії механічних характеристик матеріалу на кінетику накопичення пошкоджень. Проведено комплекс експериментальних досліджень та отримано кінетичні діаграми пошкоджуваності анізотропних металічних конструкційних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

- використанні розробленої узагальненої моделі накопичення розсіяних мікропошкоджень, що враховує параметри анізотропії для розв'язку практичних інженерних задач по визначенню напружено-деформованого стану елементів конструкцій. Вона дозволяє суттєво скоротити кількість базових експериментів по визначенню компонентів тензора пошкоджуваності для анізотропних конструкційних матеріалів;
- розробці та обґрунтуванні методики визначення параметрів моделі анізотропної пошкоджуваності та коефіцієнтів анізотропії конструкційних матеріалів на основі вимірювання зміни модуля пружності.

Результати роботи впроваджені в конструкторську та технологічну практику підприємств авіаційної промисловості КБ «Південне» та УкрНДІАТ.

Особистий внесок здобувача. Роботу виконано під науковим керівництвом член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Бобиря М.І. Основні результати, що становлять суть дисертаційної роботи, автор отримав самостійно. У публікаціях, що написані у співавторстві здобувачеві належать проведення комплексу експериментальних досліджень кінетики накопичення пошкоджень для широкого класу анізотропних конструкційних матеріалів; перевірка підходів для експериментального визначення параметру пошкоджуваності методом зміни модуля пружності, що базуються на концепції еквівалентності деформацій, приросту додаткової пружної енергії та еквівалентності пружної енергії; розробці узагальненої феноменологічної моделі анізотропної пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при пружно-пластичному деформуванні та розробці методу визначення параметрів моделі пошкоджуваності і коефіцієнтів анізотропії конструкційних матеріалів на основі вимірювання зміни модуля пружності.

Матеріали дисертації не містять ідей та розробок, що належать співавторам, з якими були написані роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися на міжнародних конференціях «Прогресивна техніка і технологія» (м. Севастополь, м. Київ, м. Одеса, м. Херсон 2013 – 2019), , Міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2012-2017), та «Современные проблемы машиноведения: международная научно-техническая конференция» (м. Гомель, 2016). Повністю робота доповідалась на XX міжнародній науково -технічній конференції «Прогресивна техніка і технологія» (м. Херсон , 2019) та на засіданні кафедри ДММ та ОМ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 11 наукових працях, з них 8 статей у фахових виданнях (з яких 6 в українських виданнях, що входять до наукометричних баз даних та одна стаття у періодичних наукових виданнях іншої держави, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку (Springer US, США)), а також 1 стаття в іноземному виданні, що входить до наукометричних баз та 3 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 159 сторінок, у тому числі основного тексту дисертації 142 сторінок, 45 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел з 113 найменувань на 12 сторінках, 2 додатки на 5х сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету роботи та основні напрямки її досягнення, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про публікації, інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами та апробацію роботи.

Перший розділ містить критичний аналіз робіт присвячених дослідженню явища накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах та обґрунтуванню експериментально-теоретичних моделей для його опису. Для інженерного використання на сьогодні найбільш широко застосовуваним є підхід, який базується на основних положеннях КМП, основи якої для випадку лінійного напруженого стану були закладені в роботах Ю.М. Работнова та Л.М. Качанова та дістали подальшого розвитку для випадку узагальненого просторового навантаження. При цьому, у розрахунках розглядається фіктивний, непошкоджений матеріал у відповідність якому співставляється реальний матеріал. Поведінка фіктивного матеріалу описується за допомогою рівнянь, що не враховують параметр пошкоджуваності та базуються на використанні умовної діаграми деформування. Визначальні рівняння реального матеріалу можна одержати взявши за основу рівняння для фіктивного матеріалу та використавши параметри ефективної діаграми деформування, яка приймає до уваги вплив параметра пошкоджуваності на його поведінку.

Обґрунтовані переваги методів, що базуються на оцінці деградації механічних властивостей при дослідженні кінетики накопичення пошкоджень в металічних конструкційних матеріалах.

Встановлено, що руйнування конструкцій часто асоціюється з анізотропною пошкоджуваністю матеріалу навіть у випадках для початково ізотропного матеріалу.

За результатом проведеного критичного аналізу сучасних наукових праць були зроблені висновки та сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** проаналізовано сучасні методи присвячені визначенню параметра пошкоджуваності для випадку складного об'ємного навантаження. Проведено критичний аналіз основних підходів та експериментальних методів визначення впливу анізотропії властивостей матеріалу на кінетики накопичення пошкоджень в металічних конструкційних матеріалах.

Розглянуто та деталізовано розвиток основних положень термодинаміки незворотніх процесів відносно рівнянь кінетики накопичення анізотропних пошкоджень при пружно-пластичному деформуванні. Показано, що на сьогодні ще не визначено параметр, за допомогою якого можливо було б однозначно описати процес накопичення мікропошкоджень в анізотропному конструкційному матеріалі.

З позицій термодинаміки незворотніх процесів визначальні рівняння, що характеризують кінетику накопичення пошкоджень можуть бути записані на основі термодинамічного потенціалу і потенціалу розсіювання.

Термодинамічний потенціал визначає поточний (пошкоджений) стан матеріалу. За умови постійної температури рівняння питомої вільної енергії має вигляд:

$$\Psi = \Psi(\varepsilon_{ij}^{(e)}, D) = \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^{(e)} E_{ijkl}(D) \varepsilon_{kl}^{(e)}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{ij}^{(e)}$ - тензор пружних деформацій, D - параметр пошкоджуваності. $E_{ijkl}(D)$ - симетричний тензор жорсткості четвертого рангу, який є функцією пошкоджуваності. Для випадку активного деформування (відкриття мікротріщин і мікропошкоджень) можна записати

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_{ij}} = E_{ijkl}(D) \varepsilon_{kl}^{(e)} \quad (2)$$

При цьому, швидкість вивільнення енергії записується у вигляді:

$$Y = -\frac{\partial \Psi}{\partial D} = -\frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^{(e)} \frac{\partial E_{ijkl}}{\partial D} \varepsilon_{kl}^{(e)} \quad (3)$$

Слід зазначити, що термодинамічний потенціал містить всю інформацію про вплив характеру пошкодження на напружено-деформований стан репрезентативного елемента матеріалу.

В парадигмі визначальних відношень описано та деталізовано підходи для визначення параметру анізотропної пошкоджуваності методом зміни модуля пружності, що базуються на концепції еквівалентності деформацій, приросту додаткової пружної енергії та еквівалентності пружної енергії (підходи Леметра, Луо та Чоу).

Для ізотропного матеріалу пошкоджуваність описується скалярною змінною D . При цьому використовується принцип еквівалентності пружної деформації $\tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} / (1 - D) = \tilde{E}_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{(e)}$. У випадку загальної анізотропії змінна пошкоджуваності представляється тензором четвертого рангу. Для більшості інженерних задач розглядається тензор другого ранга, що відповідає ортотропному випадку.

Для умов одновісного розтягу значення компонент тензора пошкодження можна отримати оцінивши зміну пружних характеристик конструктивного матеріалу, розглядаючи його репрезентативний об'ємний елемент (рис.1):

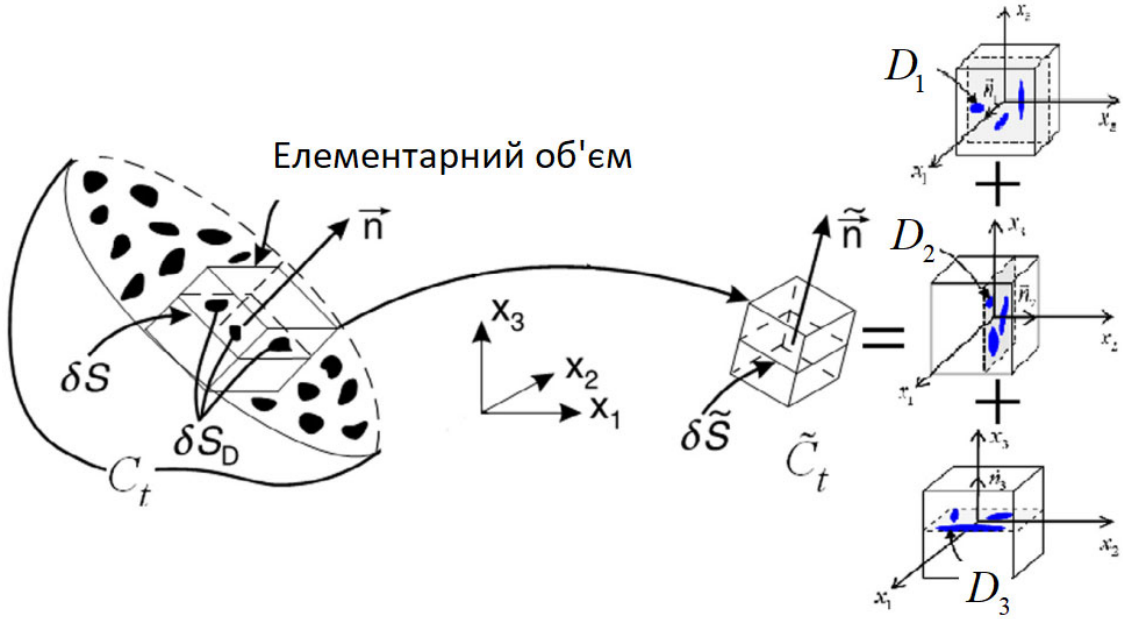


Рис. 1. Схематичне подання анізотропного пошкодження в елементарному об'ємі

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для цього випадку пружні деформації визначаються у вигляді:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^{(e)} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2^{(e)} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3^{(e)} \end{bmatrix} = \frac{1-2\nu}{3E} \frac{\sigma_1}{1-\eta D_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{1+\nu}{E} \left(\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{1-D_1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{1-D_2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1-D_3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2\sigma_1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\sigma_1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\sigma_1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{1-D_1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{1-D_2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1-D_3}} \end{bmatrix} \right)^D \quad (5)$$

де η - параметр матеріалу, D_0 - середня пошкодженість ($D_0 = \frac{1}{3} \delta_{ij} D_j$),

ν - коефіцієнт Пуассона;

Модуль пружності, з урахуванням пошкодженості в поздовжньому напрямку та відповідні коефіцієнти поперечної деформації визначаються як:

$$\tilde{E}_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1^{(e)}}, \quad \tilde{\nu}_{12} = -\frac{\varepsilon_2^{(e)}}{\varepsilon_1^{(e)}}, \quad \tilde{\nu}_{13} = -\frac{\varepsilon_3^{(e)}}{\varepsilon_1^{(e)}}. \quad (6)$$

Тоді

$$\frac{E}{\tilde{E}_1} = \frac{1+\nu}{9} \left(\frac{4}{1-D_1} + \frac{1}{1-D_2} + \frac{1}{1-D_3} \right) + \frac{1-2\nu}{3(1-\eta D_0)}, \quad (7)$$

$$\tilde{\nu}_{12} \frac{E}{\tilde{E}_1} = \frac{1+\nu}{9} \left(\frac{2}{1-D_1} + \frac{2}{1-D_2} - \frac{1}{1-D_3} \right) - \frac{1-2\nu}{3(1-\eta D_0)}, \quad (8)$$

$$\tilde{\nu}_{13} \frac{E}{\tilde{E}_1} = \frac{1+\nu}{9} \left(\frac{2}{1-D_1} - \frac{1}{1-D_2} + \frac{2}{1-D_3} \right) - \frac{1-2\nu}{3(1-\eta D_0)}. \quad (9)$$

Схожі операції для напрямків 2 і 3 дають дев'ять рівнянь для визначення трьох компонент пошкодженості D_1, D_2, D_3 , середнього значення пошкодженості D_0 та коефіцієнта η .

Для листових матеріалів, напрямками для вимірювання є лише \vec{x}_1 і \vec{x}_2 :

$$D_1 = 1 - \frac{\tilde{E}_1}{E} (1+\nu) \left[2 + \tilde{\nu}_{12} - \frac{\tilde{E}_1}{\tilde{E}_2} \right]^{-1}, \quad (10)$$

$$D_2 = 1 - \frac{\tilde{E}_2}{E} (1+\nu) \left[2 - (1-\tilde{\nu}_{12}) \frac{\tilde{E}_2}{\tilde{E}_1} \right]^{-1}, \quad (11)$$

$$\eta D_0 = 1 - \frac{\tilde{E}_1}{E} \frac{1-2\nu}{1-2\tilde{\nu}_{12}}. \quad (12)$$

Якщо сила прикладена у напрямку 1, то D_1 і D_2 визначаються з рівнянь (10) та (11), $D_3 = D_2$ для початково ізотропного матеріалу і $D_0 = (D_1 + 2D_2)/3$. Тоді η отримаємо з рівняння (12).

Для анізотропної пошкодженості зв'язок між умовним напруженням σ та ефективним $\tilde{\sigma}$ можна записати:

$$\tilde{\sigma} = M(D) \bullet \sigma, \quad (13)$$

де $M(D)$ тензор пошкодженості четвертого рангу.

Для моделювання неперервного накопичення мікропошкоджень у матеріалі використовується підхід, що розглядає цей процес у вигляді поступового сумування малих приростів параметра пошкодженості. У разі ізотропної пошкодженості параметр пошкодженості має вигляд:

$$D = \ln \frac{S}{\tilde{S}} \quad (14)$$

Де S и \tilde{S} - площі поперечних перерізів репрезентативного вихідного і пошкодженого елемента матеріалу.

Ефективний пружний тензор

$$[\tilde{E}_{ij}]_D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} e^{\frac{1}{-2D_1}} & e^{\frac{-\nu}{-(D_1+D_2)}} & e^{\frac{-\nu}{-(D_1+D_3)}} & 0 & 0 & 0 \\ e^{\frac{-\nu}{-(D_1+D_2)}} & e^{\frac{1}{-2D_2}} & e^{\frac{-\nu}{-(D_2+D_3)}} & 0 & 0 & 0 \\ e^{\frac{-\nu}{-(D_1+D_3)}} & e^{\frac{-\nu}{-(D_2+D_3)}} & e^{\frac{-\nu}{-2D_3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\frac{2(1+\nu)}{-(D_1+D_2)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\frac{2(1+\nu)}{-(D_2+D_3)}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\frac{2(1+\nu)}{-(D_3+D_1)}} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Використовуючи даний тензор, визначальне рівняння для пошкодженого матеріалу має вигляд (для одновісного напруженого стану):

$$\varepsilon = \tilde{E}_D^{-1} \cdot \sigma. \quad (16)$$

В свою чергу тензор анізотропної пошкоджуваності записується:

$$[M_{ij}(D)] = \begin{bmatrix} e^{\frac{1}{-D_1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{1}{-D_2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\frac{1}{-D_3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\frac{1}{-1/2(D_1+D_2)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\frac{1}{-1/2(D_2+D_3)}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\frac{1}{-1/2(D_3+D_1)}} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Слід відмітити, що $M_{ij}(D)$ дозволяє отримати ефективний тензор пружності (15) за допомогою наступного перетворення:

$$\tilde{E}_D^{-1} = M_{ij}(D)^T \cdot E^{-1} \cdot M_{ij}(D). \quad (18)$$

Для випадку анізотропії, визначальні рівняння при одновісному розтязі мають вигляд :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} e^{2D_1} \sigma_1 = \frac{1}{\tilde{E}} \sigma_1, \quad (19)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-\nu_{12}}{E e^{-(D_1+D_2)}} \sigma_1 = -\frac{\tilde{\nu}_{12}}{\tilde{E}} \sigma_1, \quad (20)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{-\nu_{13}}{E e^{-(D_1+D_3)}} \sigma_1 = -\frac{\tilde{\nu}_{13}}{\tilde{E}} \sigma_1, \quad (21)$$

де $\tilde{E} = e^{-2D_1} E$, $\tilde{\nu}_{12} = e^{(D_2-D_1)} \nu_{12}$, $\tilde{\nu}_{13} = e^{(D_3-D_1)} \nu_{13}$ - ефективні модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона. У цьому випадку компоненти тензора пошкоджуваності можна визначити з наступних виразів:

$$D_1 = -\frac{1}{2} \ln \frac{\tilde{E}}{E}, \quad (22)$$

$$D_2 = D_1 - \ln \frac{\nu_{12}}{\tilde{\nu}_{12}} = -\ln \left(\frac{\nu_{12}}{\tilde{\nu}_{12}} \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E}} \right), \quad (23)$$

$$D_3 = D_1 - \ln \frac{\nu_{13}}{\tilde{\nu}_{13}} = -\ln \left(\frac{\nu_{13}}{\tilde{\nu}_{13}} \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E}} \right). \quad (24)$$

Концепція еквівалентності деформації для ізотропного пошкодження через заміну умовного напруження на ефективне призводить до асиметрії матриці жорсткості у випадку анізотропії. Щоб цього уникнути було запропоновано в виразі для додаткової пружної енергії пошкодженого матеріалу напруження замінити на ефективні.

Тензор пошкоджуваності запишемо в наступному вигляді:

$$|M_{ij}(D)| = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-D_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-D_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-D_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_2)(1-D_3)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_3)(1-D_1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_1)(1-D_2)}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Для випадку одновісного розтягу визначальні рівняння приймають такий вигляд:

$$\varepsilon_1^{(e)} = \frac{\sigma_1}{E(1-D_1)^2} = \frac{\sigma_1}{\tilde{E}}, \quad (26)$$

$$\varepsilon_2^{(e)} = \frac{\nu \sigma_1}{E(1-D_1)(1-D_2)} = -\frac{\tilde{\nu}_{12}}{\tilde{E}} \sigma_1, \quad (27)$$

$$\varepsilon_3^{(e)} = \frac{\nu \sigma_1}{E(1-D_1)(1-D_3)} = -\frac{\tilde{\nu}_{13}}{\tilde{E}} \sigma_1, \quad (28)$$

де $\tilde{E} = E(1-D_1)^2$, $\tilde{\nu}_{12} = \nu(1-D_1)/(1-D_2)$, $\tilde{\nu}_{13} = \nu(1-D_1)/(1-D_3)$.

Відповідно компоненти тензора пошкоджуваності можна визначити наступним чином:

$$D_1 = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E}}, \quad D_2 = 1 - \frac{\nu}{\tilde{\nu}_{12}}(1 - D_1), \quad D_3 = 1 - \frac{\nu}{\tilde{\nu}_{13}}(1 - D_1). \quad (29)$$

У виразі (23), що базується на концепції приросту додаткової пружної енергії запропонованої Леметром, було запропоновано замінити визначення вихідного параметру D_1 на параметр (29) отриманий Чоу згідно принципу еквівалентності пружної енергії. Це дозволить отримати наступний вираз:

$$D_2 = \left(1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E}} - \ln \frac{\nu_{12}}{\tilde{\nu}_{12}} \right) \quad (30)$$

Використовуючи підхід Десмората, отримано значення поточних модулів та коефіцієнта поперечної деформації під кутом 45° .

$$\tilde{E}(45) = 4 \left[\frac{1}{\tilde{E}_1} + \frac{1}{\tilde{E}_2} + \frac{1}{\tilde{G}_{12}} - \frac{\tilde{\nu}_{12}}{\tilde{E}_1} \right]^{-1} \quad (31)$$

$$\tilde{\nu}(45) = \frac{\tilde{E}_{45}}{4} \left[2 \frac{\tilde{\nu}_{12}}{\tilde{E}_1} + \frac{1}{\tilde{G}_{12}} - \frac{1}{\tilde{E}_1} - \frac{1}{\tilde{E}_2} \right] \quad (32)$$

де поточний модуль зсуву \tilde{G}_{12} визначається наступним чином:

$$\tilde{G}_{12} = G \sqrt{(1 - D_1)(1 - D_2)} \quad (33)$$

Тоді значення параметра пошкоджуваності під кутом 45° можна визначити:

$$D_{(45)} = 1 - \frac{2}{\sqrt{E_1 \left(\frac{1}{\tilde{E}_1} + \frac{1}{\tilde{E}_2} + \frac{1}{\left(\frac{2(1 - \nu_{12})}{E_1} \right) \sqrt{(1 - D_1)(1 - D_2)}} - \frac{\tilde{\nu}_{12}}{\tilde{E}_1} \right)}} \quad (34)$$

Таким чином, використовуючи поетапно формули (30-34) визначаються параметри пошкоджуваності D_1, D_2 та $D_{(45)}$. При цьому базовим є один експеримент на одновісний розтяг.

У **третьому розділі** детально представлена програма та методики досліджень та наведено опис експериментальних стендів MTS 800, MTS 810 та Bi-01-02 які використовувались при проведенні експериментів.

Експериментальні дослідження проводилися в Інституті механіки Магдебурзького університету ім. Отто фон Геріке (Німеччина), в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, а також на кафедрі динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського». Випробувальні стенди дозволяли отримувати експериментальні дані у режимі реального часу з похибкою, що не перевищувала 1% для всіх вимірювальних каналів. У експериментах використовувались плоскі зразки виготовлені з алюмінієвих сплавів

АМг5м, 5052 та сплаву типу 2024-T351 шляхом лазерної вирізки з листа. Зразки вирізані під кутами 0^0 , 45^0 та 90^0 до напрямку прокату.

Для вимірювання величин E , ν та параметра пошкоджуваності D були проведені серії експериментів на одновісний розтяг з розвантаженнями (рис.2) зразків конструкційних матеріалів, які вирізані під кутами 0^0 , 45^0 та 90^0 до напрямку прокату.

Отримані експериментальні графіки зміни модуля пружності від рівня деформації в залежності від напрямку прокату матеріалу (рис. 3). Максимальне зменшення величини модуля пружності становило 41% в порівнянні з його початковим значенням досліджуваних алюмінієвих сплавів. При цьому слід зазначити, що початкова величина модуля пружності від напрямку вирізання зразка яскраво не виражена.

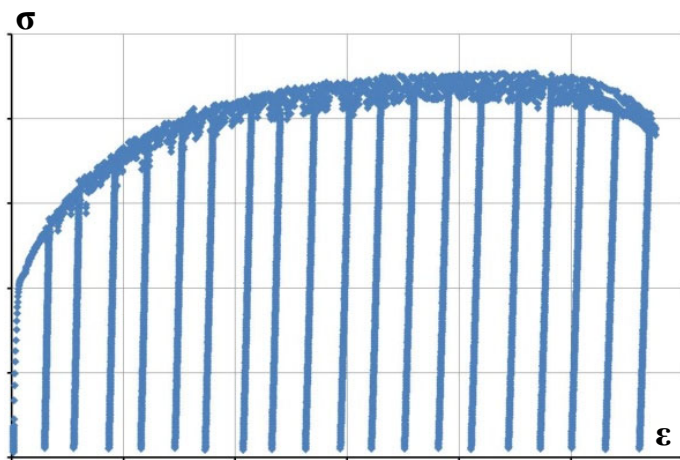


Рис. 2 Схема навантаження зразків сплаву 5052

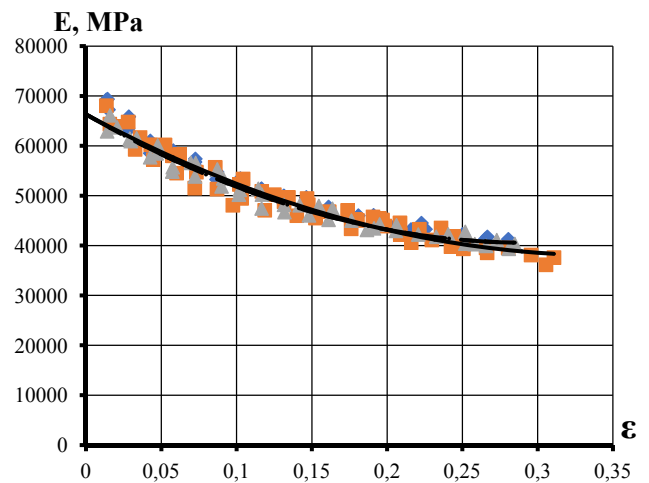


Рис. 3 Залежність модуля пружності від величини інтенсивності пластичної деформації для сплаву 5052 (кут вирізання зразка: \blacklozenge - 0^0 , \blacksquare - 45^0 і \blacktriangle - 90^0)

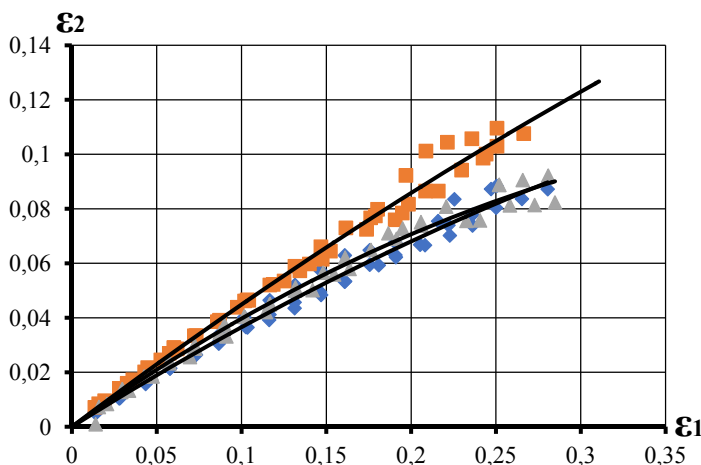


Рис.4 Залежність поперечної деформації від поздовжньої для сплаву 5052 (кут вирізання зразка \blacklozenge - 0^0 , \blacksquare - 45^0 і \blacktriangle - 90^0)

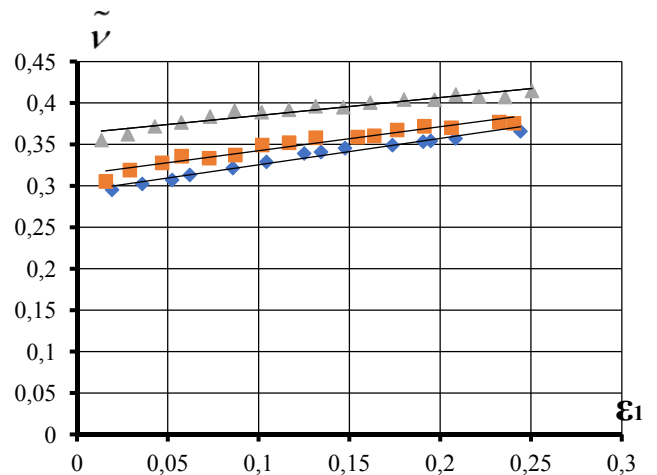


Рис. 5 Залежність коефіцієнта поперечної деформації від поздовжньої деформації для сплаву 5052 (кут вирізання зразка: \blacklozenge - 0^0 , \blacktriangle - 45^0 і \blacksquare - 90^0)

Зміна поперечної деформації від поздовжньої в залежності від напрямку прокату представлено на рис. 4. Аналіз експериментальних даних, наведених на рисунку 4 дозволяє зробити висновок про те, що у зразках, вирізаних під кутом 45^0 величина поперечної деформації є більшою ніж для зразків, вирізаних під кутами 0^0

та 90° для всіх рівнів їх поздовжньої деформації. Її максимальне значення, що відповідає моменту руйнування зразка, є більшим на 19%, порівняно зі зразками, що мають кут вирізання 0° та 90° . В свою чергу, з рисунка 5 видно, що величина коефіцієнта поперечної деформації для зразків, вирізаних під кутом 45° є стабільно більшою за значення аналогічного параметру для зразків, вирізаних під кутами 0° та 90° . Різниця за цим параметром для згаданих вище зразків становить 14%. При цьому відмінність коефіцієнта поперечної деформації для зразків, вирізаних під кутами 0° та 90° є незначною. Так його відхилення для зразка з кутом вирізання 90° порівняно зі зразком, вирізаним під кутом 0 коливається у межах 5%.

Для характеристики напрямку переважного розвитку деформацій при пластичній течії (анізотропії деформацій) використовується коефіцієнт нормальної анізотропії R (нормальний коефіцієнт анізотропії за Ленкфордом), що відображає зміну властивостей матеріалу в напрямку, що перпендикулярний до площини листового прокату, в залежності від його властивостей в площині листа.

Даний коефіцієнт визначається як відношення логарифмічної деформації за шириною зразка e_b до логарифмічної деформації по товщині e_t :

$$R = \frac{e_b}{e_t} = \lg \frac{b_0}{b_1} / \lg \frac{t_0}{t_1} \quad (35)$$

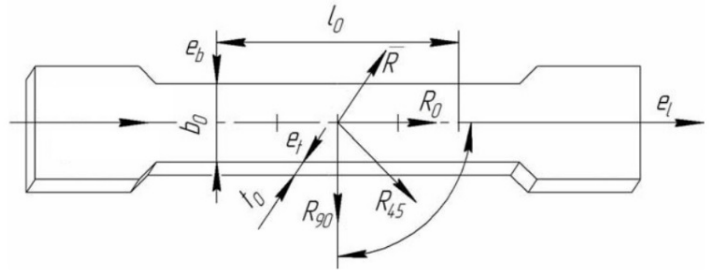


Рис. 6 Схема до розрахунку нормального коефіцієнта анізотропії за Ленкфордом

Вимірювання товщини зразка в процесі деформації за формулою (35) не зовсім зручно та може привести до виникнення значних похибок, причиною яких є зміна поверхні при розтязі, а також нерівномірність деформації по товщині, що викликана анізотропною неоднорідністю. Тому використовуючи закон постійності об'єму, більш прийнятними є коефіцієнти анізотропії поперечної деформації:

$$\mu = -\frac{e_b}{e_t} = \lg \frac{b_0}{b_1} / \lg \frac{l_0}{l_1} \quad (36)$$

де b_0, b, l_0, l – початкові і поточні ширина та довжина зразка, відповідно.

Показники анізотропії всіх трьох типів в даній парадигмі являються рівноцінними:

$$R = \frac{\mu}{1 - \mu}, R_0 = \frac{H}{G}, R_{90} = \frac{H}{F}, R_{45} = \frac{N}{F + G} - \frac{1}{2} \quad (37)$$

У даному випадку розглядався плоский напружений стан деформованого зразка. Коефіцієнти анізотропії R_β пов'язані з параметрами анізотропії наступним співвідношенням:

$$R_\beta = \frac{\frac{H}{F} + (2\frac{N}{F} - 1 - \frac{G}{F} - 4\frac{H}{F})\sin^2 \beta \cos^2 \beta}{\sin^2 \beta + \frac{G}{F}\cos^2 \beta} \quad (38)$$

Величини границь текучості $\sigma_{T\beta}$ у різних напрямках β по відношенню до напрямку прокатки в площині листа можуть бути розраховані згідно виразу:

$$\sigma_{T\beta}^2 = \sigma_{T90}^2 \frac{(1 + \frac{H}{F})}{\sin^2 \beta + \frac{G}{F} \cos^2 \beta + \frac{H}{F} + (2\frac{N}{F} - 1 - \frac{G}{F} - 4\frac{H}{F}) \sin^2 \beta \cos^2 \beta} \quad (39)$$

Де $\sigma_{T\beta}$ – границя текучості при розтягуванні зразка у напрямку, перпендикулярному до напрямку прокатки.

Відношення параметрів анізотропії визначаються на основі деформацій зразків, вирізаних у різних напрямках відносно напрямків прокатки, при їх випробуванні на розтяг, згідно залежностей:

$$\frac{H}{F} = R_{90} \quad \frac{G}{F} = \frac{R_{90}}{R_0} \quad \frac{N}{F} = (R_{45} + \frac{1}{2})(1 + \frac{R_{90}}{R_0}) \quad (40)$$

Визначивши коефіцієнти анізотропії у напрямках 0, 45 і 90 градусів до напрямку прокатки і параметр анізотропії F за виразом:

$$F = 1 / (\sigma_{T90}^2 (1 + H / F)) \quad (41)$$

Використовуючи співвідношення (40) та (41) можна отримати формули для знаходження параметрів анізотропії N, H, F, G:

$$F = \frac{1}{\sigma_{90}^2 (1 + R_{90})}, \quad H = F \cdot R_{90}, \quad N = F(1 + \frac{R_{90}}{R_0})(R_{45} + 0.5), \quad G = F \cdot \frac{R_{90}}{R_0}, \quad (42)$$

У четвертому розділі представлені результати експериментів, присвячені дослідженню кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних анізотропних матеріалах. Крім того, окрема увага в ньому приділяється перевірці існуючих експериментально-теоретичних підходів та методик, які враховують явище анізотропії пошкоджуваності та встановленню меж їх використання.

На рис. 7-9 представлені залежності параметра пошкоджуваності від величини деформації для трьох напрямків вирізання зразків, що базуються на підходах Леметра, Чоу і Луо (концепції еквівалентності деформацій, приросту додаткової пружної енергії та еквівалентності пружної енергії).

Проаналізувавши результати, наведені на рис. 7-9 можна зробити висновок про те, що величина параметра пошкоджуваності, отримана за допомогою підходу, запропонованого Леметром є більшою, порівняно з його величинами отриманими за допомогою моделей Чоу та Луо, що базуються на енергетичному підході, щодо визначення цього параметра. Максимальне відхилення величини параметра пошкоджуваності, яке відповідає моменту руйнування зразка (гранична величина параметра пошкоджуваності) за підходом Леметра є більшим на 60% для 0°, 65% для 45° та 62% для 90° порівняно зі значеннями за Чоу и Луо. Величини параметра пошкоджуваності, визначені згідно підходів запропонованих Чоу и Луо відрізняються мало. Максимальне відхилення параметра пошкоджуваності визначеного за вищезгаданими методам становить 13%, 17% та 12% на рівні його критичної величини. Таким чином, використання підходу Леметра може призвести до зайвого консервативізму у розрахунках, оскільки, як видно з рис. 10,

експериментально отримані величини параметра пошкоджуваності є більш узгодженими з величинами згідно моделей Луо и Чоу. Показано, що енергетичний підхід більш прийнятний для опису процесу накопичення пошкоджень в алюмінієвих сплавах в порівнянні з запропонованим Леметром. За основу приймалася крива пошкодження отримана через зміну питомого електроопору [Бобир М.І., Грабовський А.П. Тимошенко О.В.].

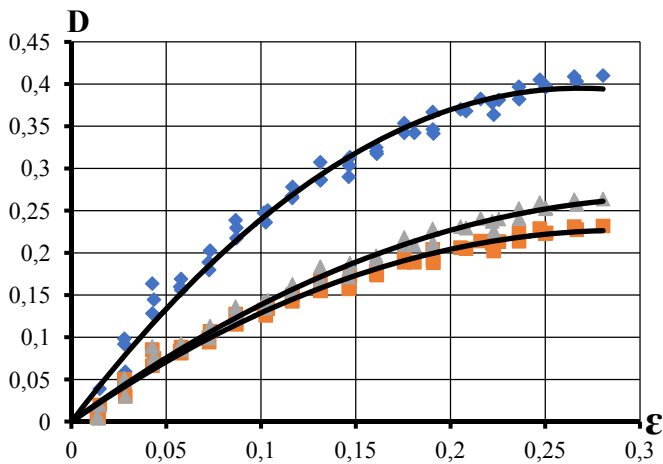


Рис. 7 Залежність параметра пошкодженості від величини інтенсивності пластичної деформації для сплаву 5052

(■ – Chow, ▲ – Luo, ♦ – Lemaitre) (0°)

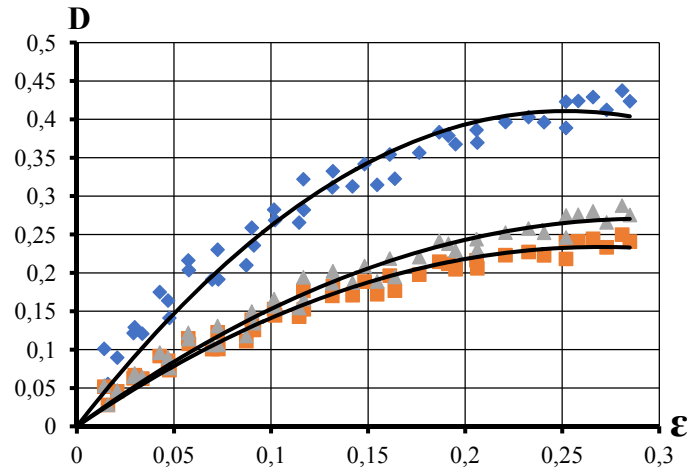


Рис.8 Залежність параметра пошкодженості від величини інтенсивності пластичної деформації для сплаву 5052

(■ – Chow, ▲ – Luo, ♦ – Lemaitre) (90°)

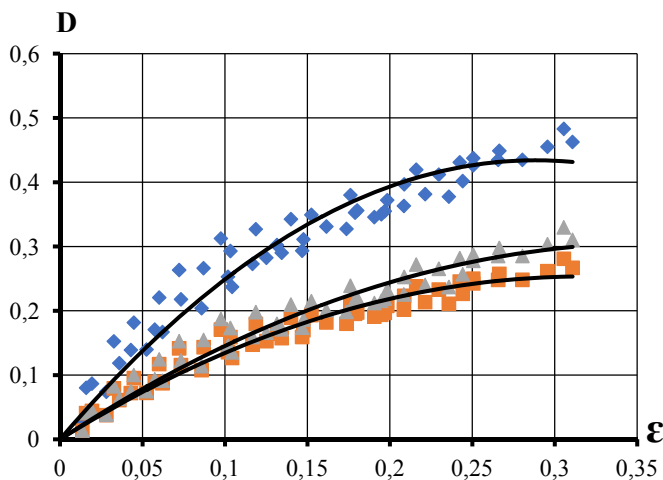


Рис.9 Залежність параметра пошкодженості від величини інтенсивності пластичної деформації для сплаву 5052

(■ – Chow, ▲ – Luo, ♦ – Lemaitre) (45°)

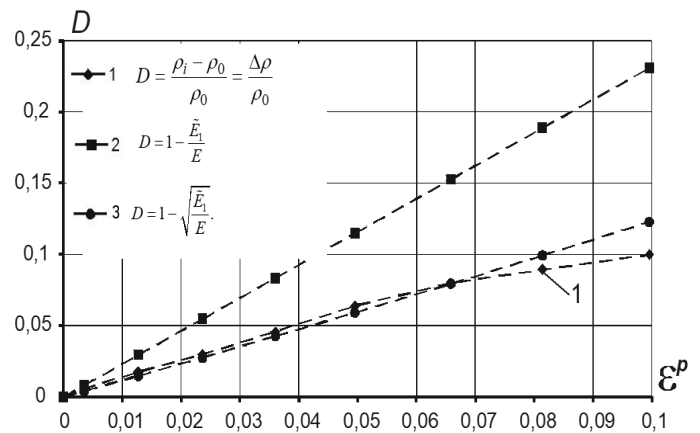


Рис.10 Залежність параметра пошкодженості отримана різними експериментальними методами від величини інтенсивності пластичної деформації для сплаву D16T

Отримано графіки залежності коефіцієнту анізотропії пластичної деформації R за Ленкфордом від пошкоджуваності матеріалу D (рис. 11). Результати розрахунку показують, що у напрямку паралельному і перпендикулярному напрямку прокатки властивості майже однакові, зате різко відрізняються під кутом 45 градусів до напрямку прокатки, що суперечить класичному уявленню про розподіл механічних характеристик по напрямку.

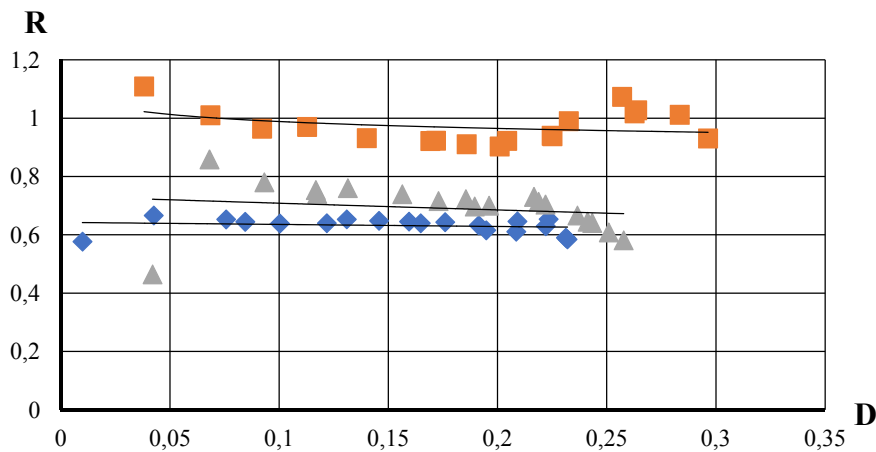


Рис. 11. Графік залежності коефіцієнту пластичної деформації R від пошкоджуваності матеріалу D для сплаву 5052 (під кутом: \diamond - 0° , \blacksquare - 45° і \blacktriangle - -90°)

Аналізуючи залежність коефіцієнта пластичної деформації R від пошкоджуваності матеріалу D (рис.11) слід зазначити про неповні залежності між параметром пошкоджуваності D та параметром анізотропії пластичного деформування R , особливо в парадигмі вище наведених співвідношень - параметр анізотропії пластичного деформування R , не дивлячись на широке застосування при аналізі процесів обробки матеріалів тиском, володіє суттєвими недоліками, зокремане забезпечується прийнятність теоретичних співвідношень при переході матеріалу з пружної області в пластичну. Також слід зазначити, що зі зменшенням товщини збільшується похибка при прямому визначенні параметру R . У зв'язку з цим, при випробуванні листових матеріалів експериментально визначались лише деформації по ширині та довжині зразка. Деформація по товщині зразка визначалася за допомогою розрахунку що базується на гіпотезі постійності об'єму.

Результати обчислень параметрів, що характеризують поточний стан анізотропії за Хіллом від величини пластичної деформації та пошкоджуваності, зображені на рис.12-13 і рис. 14-15.

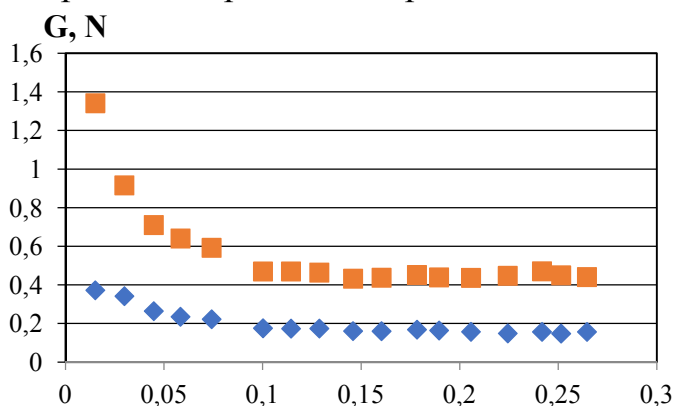


Рис 12. Залежність параметрів анізотропії від рівня деформації для сплаву 5052 (\diamond - G , \blacksquare - N)

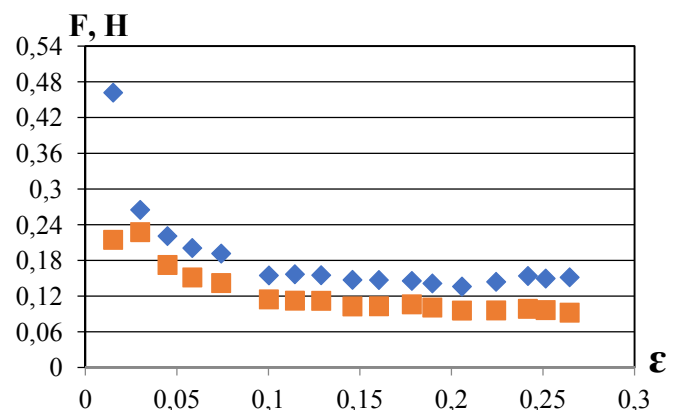


Рис.13. Залежність параметрів анізотропії від рівня деформації для сплаву 5052 (\diamond - F , \blacksquare - H)

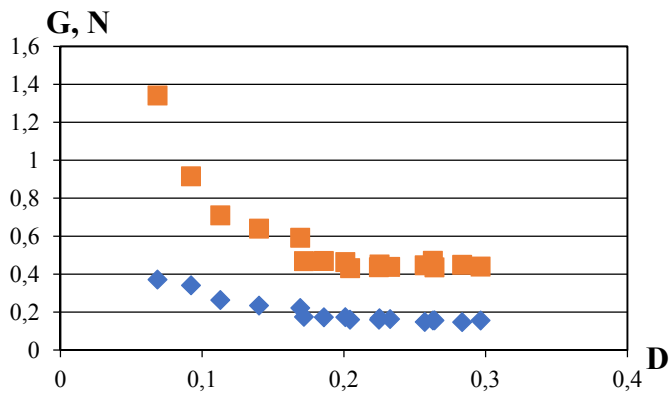


Рис.14. Залежність параметрів анізотропії від рівня пошкодженості для сплаву 5052 (♦- G, ■-N)

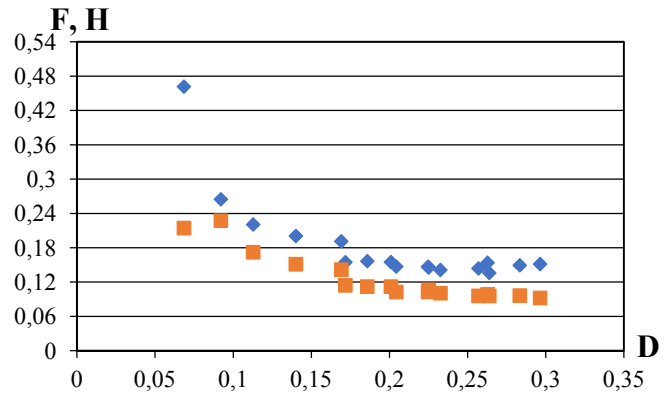


Рис.15. Залежність параметрів анізотропії від рівня пошкодженості для сплаву 5052 (♦- F, ■-H)

На рис. 16 зображена узагальнена площина поверхні граничної пошкоджуваності в залежності від рівня деформації.

Результати моделювання кінетики накопичення пошкоджуваності D_2 за запропонованою модифікованою моделлю (30) показано на рис.17. З графіку видно, що запропонована модель показала найбільш точні збіжності з експериментом (розбіжність складає 12%). У той же час як розрахункові величини згідно моделей Луо та Чоу мають значно більші розбіжності з експериментальними

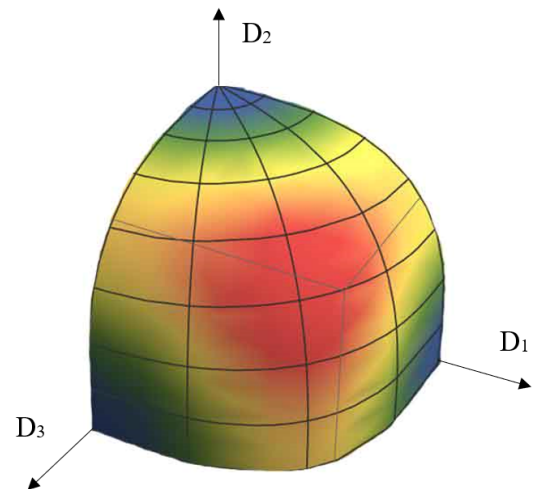


Рис.16. Площина поверхні граничної пошкоджуваності для сплаву 5052

даними – 17% і 32%, відповідно.

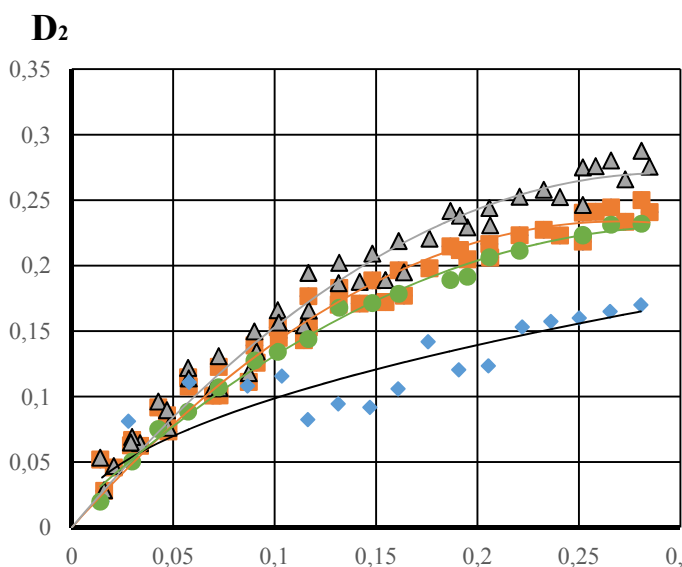


Рис. 17 Залежність параметра пошкоджуваності D_2 від величини пластичної деформації при розтязі для сплаву 5052: (♦- Чоу, ▲ -Луо, ● – розрахунок, ■- експеримент)

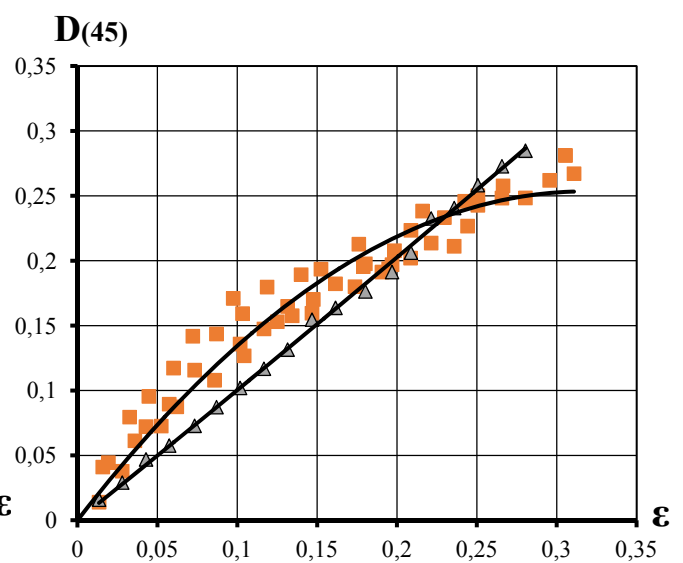


Рис. 18 Залежність параметра пошкоджуваності $D_{(45)}$ від величини пластичної деформації при розтязі для сплаву 5052: (▲ – розрахунок, ■- експеримент)

Результати моделювання кінетики накопичення пошкоджуваності за запропонованою модифікованою моделлю (30, 34) для 45° показано на рис.18. Аналіз представлених на рисунку даних дозволяє зробити висновок, що отримані згідно запропонованої моделі величини параметра пошкоджуваності мають мінімальну розбіжність з його експериментальними значеннями. У відсотковому співвідношенні дана розбіжність не перевищує 8%.

Також отримані умовні та ефективні діаграми деформування були порівняні з реальними розподілами ефективних та дійсних напружень, що отримані чисельно при різних рівнях деформацій (рис. 19-20).

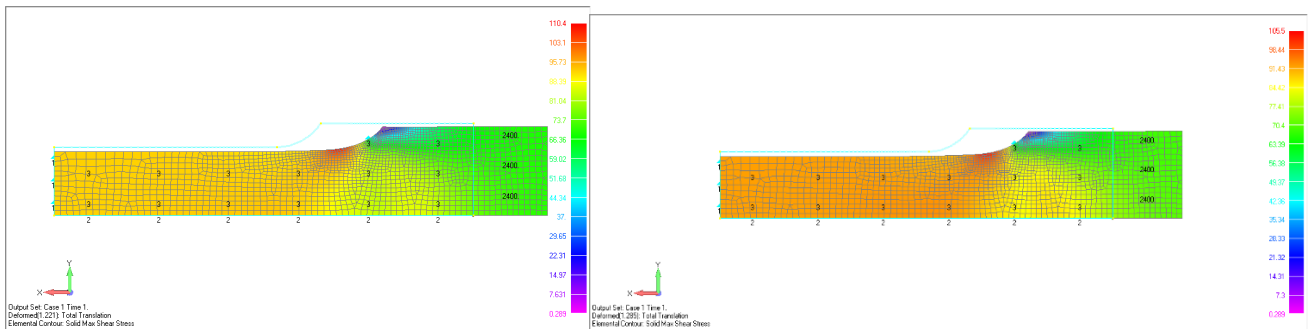


Рис. 19 Розподіл напружень при рівні деформації рівному 3%:
зліва – дійсні напруження, з права – ефективні

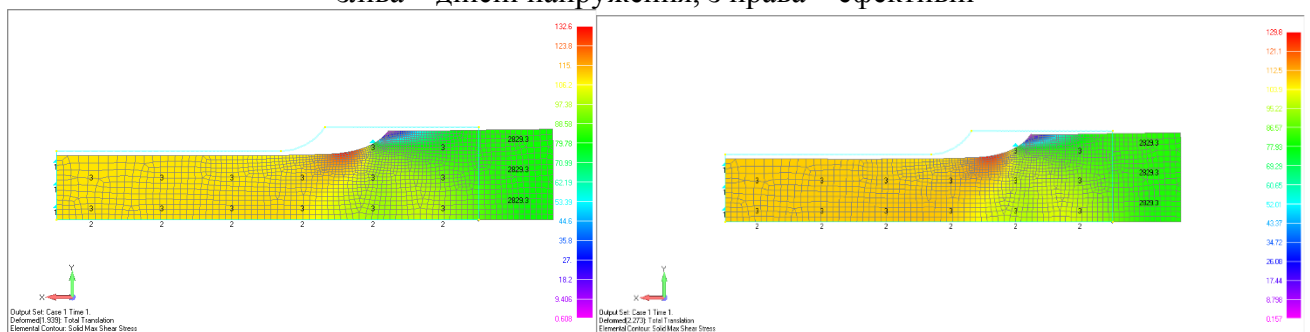


Рис. 20 Розподіл напружень при рівні деформації рівному 5%:
зліва – дійсні напруження, з права – ефективні

При аналізі полів напружень слід зазначити, що різниця між дійсними та ефективними напруженням при деформації на рівні 3% складає 6%, а при деформації на рівні 5% складає 9% відповідно.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вперше розроблено узагальнену феноменологічну модель, що враховує взаємний вплив анізотропії механічних властивостей конструкційного матеріалу та кінетики накопичення мікропошкоджень на його поведінку під час пружно-пластичного деформування. Запропонована модель дозволяє з високою достовірністю будувати криві кінетики накопичення пошкоджуваності у матеріалі в залежності від напрямку розташування поздовжньої вісі зразка відносно напрямку прокату, базуючись лише на експерименті на одновісний розтяг.

2. Розроблено інженерний метод визначення параметрів моделі пошкоджуваності та коефіцієнтів анізотропії конструкційних матеріалів на основі вимірювання зміни модуля пружності та коефіцієнта поперечної деформації;

3. Показано та обґрунтовано границі підходів до експериментального описання кінетики накопичення пошкоджень, які базуються на гіпотезах про еквівалентність деформацій, додаткової пружної енергії та приросту додаткової пружної енергії відповідно;

4. Показано, що запропонований енергетичний підхід більш прийнятний для опису процесу накопичення пошкоджень в анізотропних конструкційних матеріалах в порівнянні з підходом, запропонованим Леметром.

5. Встановлено суттєвий вплив анізотропії пластичної деформації на закономірності кінетики накопичення пошкоджень. Наведено комплекс кінетичних діаграм пошкоджуваності анізотропних металічних конструкційних матеріалів;

6. Встановлено, що серед застосовуваних в даний час показників анізотропії найбільш об'єктивними є коефіцієнти поперечної деформації, які, на відміну від коефіцієнтів Р. Хілла і коефіцієнтів нормальної анізотропії, можуть бути розраховані з високою точністю для тонколистових матеріалів, добре нормовані і забезпечують наслідування співвідношень при переході з пружною області в пластичну. Встановлено зв'язок між коефіцієнтами анізотропії пластичного деформування та анізотропією пошкоджуваності, про що свідчать отримані узагальнені діаграми анізотропії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Bobyr M.I., Phenomenological damage models of anisotropic structural materials / Bobyr M.I., Khalimon O.P., Bondarets O.A. // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2013. – № 67. – p.5-13. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus). *Здобувачем проведено експериментальні та теоретичні дослідження впливу анізотропії механічних властивостей на кінетику накопичення пошкоджень при пружно-пластичному деформуванні, встановлено границі використання сучасних підходів до експериментальної оцінки кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в анізотропних конструкційних матеріалах.*

2. Bobyr M.I., Modeling of scattered damage accumulation kinetics under combined stress / Bobyr M.I., Khalimon O.P., Bondarets O.A. // *Strength of Materials*. Springer USA/ – 2012. – №44 – С.20-26. (Входить до НМБ Scopus). *Здобувачем проведені експериментальні дослідження та на їх основі проаналізовано достовірність та межі використання ряду феноменологічних моделей пошкоджуваності на основі проведених експериментальних досліджень кінетики накопичення пошкоджень у металевих конструкційних матеріалах при плоскому напруженому стані й активному навантаженні.*

3. Грабовский А.П. Деформационные модели кинетики повреждаемости конструкционных материалов при упругопластическом деформировании / Грабовский А.П., Бондарец А.А. // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. ПО Сухого*. – 2013. – №1 (52). – С.26-34. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus). *Здобувачем отримано параметр інтенсивності пошкоджень через параметр інтенсивності деформацій при довільному напрямку координатних осей.*

4. Грабовський А.П. Модель пошкоджуваності для розрахунку руйнування конструкційних матеріалів / Грабовський А.П., Бондарець О.А., Бабієнко І.І. // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2019. – №3 (87). – с. 38-46 (Входить в НМБ

РІНЦ, Index Copernicus) *Здобувачем розв'язана тестова задача впливу пошкоджуваності на величину ефективних напружень при розтязі пластини з отвором.*

5. Халімон О.П. Достовірність феноменологічних моделей накопичення розсіяних пошкоджень при складному напруженому стані / Халімон О.П., Бондарець О.А. // Наукові вісті Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. – №5. – 2011. – с.101-106. (Входить в DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, WorldCat, J-Gate, Google Scholar, OpenAIRE, Ulrich's periods Directory, BASE, Miag, WCOSJ) *Здобувачем проведено порівняльний аналіз сучасних феноменологічних моделей накопичення розсіяних пошкоджень конструкційних матеріалів при складному навантаженні на основі проведених здобувачем експериментальних досліджень на розтяг різних металевих матеріалів, з яких визначалися параметри моделей, а для перевірки ступеня врахування складності навантаження — на кручення.*

6. Грабовський А.П. Кінетика накопичення пошкоджень при повторно-змінному осьовому навантаженні конструкційних матеріалів / Грабовський А.П., Бондарець О.А., Бабієнко І.І. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2013. – №3. – С.18-23. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus) *Здобувачем отримані експериментальні результати кінетики накопичення розсіяних пошкоджень для ряду конструкційних матеріалів.*

7. Бондарець О.А., Термодинамічний підхід до описання кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах. / Бондарець О.А., Халімон О.П. // Mechanics and Advanced Technologies, – 2011. – №61., т.2 – с.92-95. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus). *Здобувачем розглянуто та деталізовано розвиток основних положень термодинаміки незворотних процесів відносно основоположних рівнянь кінетики накопичення пошкоджень при пружно-пластичному деформуванні.*

8. Грабовський А.П. Залечивання мікроповреждений в конструкционных материалах при реверсивных режимах нагрузок./ Грабовский А.П., Бондарец А.А., // Науковий журнал Луцького Національного технічного університету «Технологічні комплекси». – 2014. – № 1 (9). – С.160-166. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus). *Здобувачем запропонована методика визначення параметра заліковування мікропошкоджень при прямому та оберненому режимах навантаження.*

9. Грабовський А.П. Пошкоджуваність та руйнування конструкційних матеріалів / Грабовський А.П., Бондарець О.А. // Матеріали IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018», випуск 4. – Херсон: ХНТУ, 2018. ст. 72-75.

10. Грабовський А.П. Вплив еволюції процесів деформування на кінетику накопичення пошкоджень / Грабовський А.П., Бондарець О.А., Бабієнко І.І. // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Матеріали конференції. – Київ, 2020.– С. 51-53.

11. Бондарець О.А. Анізотропія кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах при пружнопластичному деформуванні / Бондарець О.А., Кіріллова І.В. // XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Матеріали конференції. – Київ, 2018.– С. 52-55.

АНОТАЦІЯ

Бондарець О.А. Модель накопичення розсіяних пошкоджень в анізотропних конструкційних матеріалах при пружно-пластичному деформуванні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці узагальненої моделі накопичення розсіяних мікропошкоджень з урахуванням параметрів анізотропії для розв'язку практичних інженерних задач по уточненому визначенню напружено-деформованого стану несучих елементів конструкцій. Вона дозволяє суттєво скоротити кількість базових експериментів по визначенню компонентів тензора пошкоджуваності для анізотропних конструкційних матеріалів. Запропонована модель дозволяє з високою достовірністю будувати криві кінетики накопичення пошкоджуваності у матеріалі в залежності від напрямку розташування поздовжньої вісі зразка відносно напрямку прокату, базуючись лише на експерименті на одновісний розтяг.

Встановлено суттєвий вплив анізотропії пластичної деформації на закономірності кінетики накопичення пошкоджень. Наведено комплекс кінетичних діаграм пошкоджуваності анізотропних металічних конструкційних матеріалів. Встановлено, що серед застосовуваних в даний час показників анізотропії найбільш об'єктивними є коефіцієнти поперечної деформації, які, на відміну від коефіцієнтів Р. Хілла і коефіцієнтів нормальної анізотропії, можуть бути розраховані з високою точністю для тонколистових матеріалів, добре нормовані і забезпечують наслідування співвідношень при переході з пружною області в пластичну. Встановлено зв'язок між коефіцієнтами анізотропії пластичного деформування та анізотропією пошкоджуваності, про що свідчать отримані узагальнені діаграми анізотропії.

Ключові слова: пошкоджуваність, анізотропія, статичне навантаження, ефективні напруження, деформування, параметр Ленкґфорда, коефіцієнти анізотропії.

АНОТАЦИЯ

Бондарец А.А. Модель накопления рассеянных повреждений в анизотропных конструкционных материалах при упруго-пластическом деформировании. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена разработке обобщенной модели накопления рассеянных микроповреждений с учетом параметров анизотропии для решения практических инженерных задач по уточненному определению напряженно-деформированного состояния несущих элементов конструкций. Она позволяет существенно сократить количество базовых экспериментов по определению

компонентов тензора повреждаемости для анизотропных конструкционных материалов. Предложенная модель позволяет с высокой достоверностью строить кривые кинетики накопления повреждаемости в материале в зависимости от направления расположения продольной оси образца относительно направления проката, основываясь только на эксперименте на одноосное растяжение.

Установлено существенное влияние анизотропии пластической деформации на закономерности кинетики накопления повреждений. Приведен комплекс кинетических диаграмм повреждаемости анизотропных металлических конструкционных материалов. Установлено, что среди применяемых в настоящее время показателей анизотропии наиболее объективными являются коэффициенты поперечной деформации, которые, в отличие от коэффициентов Р. Хилла и коэффициентов нормальной анизотропии, могут быть рассчитаны с высокой точностью для тонколистовых материалов, хорошо нормированные и обеспечивают подражания соотношений при переходе с упругой области в пластическую. Установлена связь между коэффициентами анизотропии пластического деформирования и анизотропией повреждаемости, о чем свидетельствуют полученные обобщенные диаграммы анизотропии.

Ключевые слова: повреждаемость, анизотропия, статическое нагружение, эффективные напряжения, деформации, параметр Ленкгоффа, коэффициенты анизотропии.

SUMMARY

Bondarets O.A. Model of scattered damage accumulation in anisotropic structural materials under elastoplastic deformation. – Qualification scientific work in manuscript under copyright.

The dissertation for a Ph.D. degree in specialty 01.02.04 – Mechanics of Deformed Solid. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development of a generalized model of accumulation of scattered microdamages taking into account the parameters of anisotropy for solving practical engineering problems to refine the stress-strain state of the load-bearing elements of structures. It allows to significantly reduce the number of basic experiments to determine the components of the damage tensor for anisotropic structural materials.

The development of the basic principles of the thermodynamics of irreversible processes with respect to the equations of the kinetics of the accumulation of anisotropic damages during elastic-plastic deformation is considered and detailed. It is shown that for today a parameter has not yet been determined that would unambiguously describe the process of accumulation of microdamages in an anisotropic structural material.

The boundaries of these approaches are shown and substantiated for the experimental determination (assessment) of the damage parameter by the method of changing the elastic modulus, based on the concept of equivalence of deformations, increment of additional elastic energy and equivalence of elastic energy. Based on these concepts, a generalized phenomenological model of damage anisotropy in structural materials under elastoplastic deformation was developed and substantiated.

An engineering method has been developed for determining the parameters of the damage model and the anisotropy coefficients of structural materials based on measuring the change in the elastic modulus. A method is proposed for studying the kinetics of scattered damage accumulation, taking into account the anisotropy of mechanical properties. The dependence of the limiting values of scattered damage on the anisotropy coefficients is shown.

A complex of experimental studies on the laws of the kinetics of the accumulation of anisotropic damages in structural materials by various methods and their relationship with the indicators of anisotropy of plastic deformation has been carried out. The results of calculating the corresponding parameters of the approaches and models are presented. The tests were performed on flat samples made of aluminum alloy AMg2, 5025 and on alloy type 2024-T351 by laser cutting from sheet. The samples were cut at angles of 0, 45 and 90 degrees to the direction of rolling. To measure the values E , ν and variable damage D were conducted a series of experiments on uniaxial tensile with unloading of samples cut at angles of 0, 45 and 90 degrees to the direction of rolling. A set of diagrams of changes in the modulus of elasticity and damageability versus the level of deformation is obtained, depending on the rolling direction of the material. The maximum degradation of the elastic modulus has reached 41% compared to the initial value. In this case, the dependence of the change in the initial elastic modulus on the angle is not pronounced. Based on the experimental data, we can conclude that in specimens cut at an angle of 45 degrees, the transverse deformation is 19% greater than in specimens cut at an angle of 0 and 90 degrees. It is shown that the Lemaitre model gives overestimated values of the damage parameter in comparison with the Chow and Luo models, which are based on the energy approach and give very close numerical values. The energy approach is more acceptable for describing the process of damage accumulation in aluminum alloys in comparison with the one proposed by Lemaitre.

The obtained conditional and effective deformation diagrams were compared with real distributions of effective and actual stresses obtained numerically at various levels of deformations.

A significant effect of the anisotropy of plastic deformation on the kinetics of damage accumulation is shown. A complex of kinetic diagrams of damageability of anisotropic metal structural materials is presented. It is shown that the initial modules of elasticity of a material in different directions hardly differ from each other, which gives grounds to carry out calculations in the elastic region for materials as isotropic. However, already the conditional yield strength and ultimate fracture resistance differ significantly, which must be taken into account when calculating the strength of structures made of this material.

The proposed energy approach is more suitable for describing the process of damage accumulation in aluminum alloys in comparison with the one proposed by Lemaitre. The damage curve obtained from the change in electrical resistivity was taken as true.

As a result of experimental studies, it was found that the limiting degradation of the elastic modulus reaches 41% compared with the initial value for aluminum alloys. Samples cut at 45 degrees have 19% more transverse deformation than samples cut at 0 and 90 degrees.

The relationship between the anisotropy coefficients of plastic deformation and the anisotropy of damage is established, as evidenced by the obtained generalized anisotropy diagrams.

Keywords: damage, anisotropy, static load, effective stress, strain, Langford parameter, damage model, aluminum alloys, anisotropy coefficients.