

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

ФАМ ДИК КУАН

УДК 539.4

**КРИТЕРІЙ ГРАНИЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З
ВРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖУВАНOSTІ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі динаміки та міцності машин і 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», директор механіко-машинобудівного
інституту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Голуб Владислав Петрович
Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України,
завідувач відділу

кандидат технічних наук
Булах Павло Олександрович
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН
України, старший науковий співробітник

Захист відбудеться «03» грудня 2019 р., о 15:00 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, пр. Перемоги, 37, корп. №1, ауд. №166.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «30» жовтня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.О. Боронко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Термосилове експлуатаційне та технологічне навантаження елементів конструкцій різного призначення супроводжується деградацією фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів. Цей складний процес характеризується виникненням розсіяних пошкоджень у вигляді мікропор, мікротріщин на мікро та мезорівнях. Їх зародження, розвиток та об'єднання приводить до утворення макротріщин в найбільш навантажених зонах відповідальних елементів конструкцій. Цей процес є найбільш тривалим на етапі експлуатації високонавантажених виробів нової техніки та складає 80-90 відсотків всього ресурсу з врахуванням живучості.

Врахування змін в матеріалі, які викликані мікропошкодженнями дозволяє більш точно прогнозувати ресурс відповідальних елементів конструкції. Але на сьогодні, поки не розроблено адекватних моделей та критеріїв руйнування (на стадії зародження макротріщини) елементів конструкцій з урахуванням виду напруженого стану та історії термосилового навантаження. Найбільш перспективним, в розробці моделей накопичення розсіяних пошкоджень (руйнувань), з точки зору інженерного застосування, виступає феноменологічний підхід, який базується на основних положеннях континуальної механіки пошкодження (КМП). Основні ідеї цього підходу були запропоновані Л.М. Качановим та Ю.М. Работновим. Нині вони отримали досить широкий розвиток в різних напрямках механіки твердого деформованого тіла (МТДТ).

В КМП для кількісного врахування ефекту впливу мікропошкоджень в матеріалі, введено параметр пошкоджуваності, який можна представити у вигляді тензора, вектора або скаляра та який характеризує мікроструктурні зміни в матеріалі, що викликані незворотними процесами при різних термо-силових навантаженнях (деформуваннях). Цей параметр виступає в ролі характеристики оцінки деградації фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів.

Однак, на сьогодні не існує єдиної концепції аналізу закономірностей формування та еволюції пошкоджень, що ускладнює вибір критеріїв, які описують зародження та накопичення пошкоджень, а також кількісну оцінку цих явищ, враховуючи два механізми руйнування (відрив та зріз).

Нині існує велика кількість різних критеріїв руйнування (силових, деформаційних, енергетичних) і визначальних рівнянь для умов одновісного термосилового-навантаження. Однак, конкретизованих закономірностей для складного напруженого стану, з врахуванням кінетики накопичення пошкоджуваності, поки не розроблено. Також більшість моделей, які базуються на експериментальних дослідженнях, обмежені класом простих навантажень і у більшості випадків викладені у незручній для практичного використання формі.

Таким чином, актуальним є розробка критерію граничного стану конструкційних матеріалів на стадії зародження макротріщини для умов складного напруженого стану з урахуванням двох механізмів руйнування (відриву та зрізу), що становить значний науковий і практичний інтерес.

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” за держбюджетними темами: “Розроблення узагальненого методу прогнозування ресурсу експлуатації елементів конструкцій із композиційних матеріалів при складному малоцикловому навантаженні з врахуванням пошкоджуваності” (держреєстрація №0112U002444); “Розроблення узагальненого методу прогнозування ресурсу експлуатації конструкцій із композиційних матеріалів при складному малоцикловому навантаженні з врахуванням пошкоджуваності” (держреєстрація № 0115U000398); “Розробка методу прогнозування несучої здатності та температуростабільності силових платформ космічних апаратів ” (держреєстрація № 0118U003638).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – розробити та обґрунтувати узагальнений критерій граничного стану конструкційних матеріалів з урахуванням розсіяного руйнування за умов складного напруженого стану на стадії зародження макротріщини.

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

- розробити феноменологічну модель кінетики накопичення пошкодження від рівня пластичної деформації для металевих конструкційних матеріалів;
- проаналізувати кінетику накопичення розсіяних пошкоджень ряду сучасних металевих конструкційних матеріалів в залежності від механічних характеристик в умовах чистого розтягу;
- розробити ефективний метод визначення кінетики накопичення пошкодження в матеріалі з урахуванням впливу нерівномірного розподілу деформації в перерізі зразка в умовах кручення;
- модернізувати експериментальне обладнання для визначення параметрів феноменологічної моделі та критерію руйнування, а також обґрунтовування їх границь використання;
- розробити, на основі теоретично-експериментальних досліджень, ефективний феноменологічний критерій розсіяного руйнування на стадії зародження макротріщини при складному напруженому стані з врахуванням двох механізмів руйнування: відриву та зсуву;
- провести апробацію та встановити границі застосування запропонованого критерію граничного стану елементів конструкцій для умов статичного навантаження шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних.

Об’єкт дослідження: кінетика накопичення розсіяних пошкоджень та величини критичного значень пошкоджень в металічних конструкційних матеріалах за умов складного напруженого стану.

Предмет дослідження: моделювання процесів накопичення мікропошкоджень та мікроруйнувань з визначенням критерію руйнування металевих конструкційних матеріалів на стадії зародження макротріщини.

Методи досліджень. Експериментально-теоретичні методи визначення закономірностей накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах для умов статичного навантаження (деформування), що базуються на основі

положень КМП та МТДТ. При аналітичних розрахунках використані метод найменших квадратів, методи статистичної обробки експериментальних даних, регресійний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів

- вперше розроблено та обґрунтовано узагальнений критерій граничного стану металевих конструкційних матеріалів при складному напруженому стані з врахуванням кінетики накопичення розсіяних руйнувань (пошкоджень), який враховує два типи руйнування (відрив та зріз);
- визначено залежності, що пов'язують феноменологічні параметри пошкоджуваності та її критичне значення на стадії зародження макротріщини з пружно-пластичними характеристиками матеріалу за умов статичного навантажування при розтязі;
- розроблено модель, що описує процес накопичення пошкоджень в металевих конструкційних матеріалах при розтязі;
- розроблено методику визначення кінетики накопичення пошкодження з урахуванням впливу нерівномірного розподілу деформації в перерізі зразка в умовах кручення;

Практичне значення одержаних результатів полягає у :

- використанні отриманої феноменологічної моделі накопичення розсіяних мікропошкоджень та критерія руйнування для розв'язку практичних інженерних задач з метою уточнення напружено-деформованого та граничного стану несучих елементів конструкції;
- розробці адекватної інженерної методики оцінки кінетики накопичення пошкодження за умов зсуву, яка базується на випробуванні циліндричних зразків;
- встановлені та обґрунтовані границі використання критерія граничного стану з урахуванням пошкодження при складному напруженому стані, що дозволить більш точно прогнозувати ресурс відповідальних елементів конструкції на стадії проектування та їх залишковий ресурс.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в інженерну практику ДП «КБ Південне».

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 написаних у співавторстві здобувачеві належать проведення експериментальних досліджень, чисельний розрахунок конструктивних елементів, аналіз підходів щодо розрахунку параметра пошкоджуваності, визначення кінетики накопичення пошкоджень при статичному навантаженні та розрахунок їх критичних значень у вигляді критерію.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися на міжнародних конференціях «Прогресивна техніка і технологія» (м. Київ, 2017 – 2018). Повністю робота доповідалась на засіданні кафедри ДММ та ОМ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 8 наукових праць, з них 6 статей у фахових виданнях (з яких 4 в українських виданнях, що входять до наукометричних баз даних та 2 статті у іноземному виданні), 2 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 2-ох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 159 сторінок, у тому числі основного тексту дисертації 127 сторінки, 108 рисунків, 11 таблиць, список використаних джерел зі 115 найменувань на 12 сторінках, додатків на 4 сторінках, що містять 1 рисунок.

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 та апробацію роботи.

У **першому розділі** проведено критичний аналіз сучасних досліджень процесу накопичення розсіяних пошкоджень та існуючих інженерних моделей для їх опису. Показано, що основні положення КМП є перспективними в якості основи методів розрахунку, як на стадії проектування виробів нової техніки так і на стадії її експлуатації. Основоположниками цього наукового напрямку в МТДТ були Л. М. Качанов та Ю. М. Работнов, які ввели поняття пошкоджуваності, як феноменологічний параметр, що описує мікроструктурні зміни в матеріалі при термосилових навантаженнях та характеризує деградацію механічних властивостей матеріалів.

Проаналізовано та описано сучасні методи експериментального дослідження кінетики накопичення розсіяних пошкоджень конструкційних матеріалів, які базуються на різних підходах та враховують деградацію їх механічних властивостей, феноменологічні моделі та критерії.

Проведено аналіз досліджень, які пов'язані з розробками феноменологічних моделей та критеріїв зародження макротріщини при пружно-пластичному деформуванні за умов складного напруженого стану з урахуванням пошкоджуваності при простому навантаженні.

Показано, що на сьогодні, велика кількість робіт спрямована на створення феноменологічних моделей кінетики накопичення пошкоджень та критеріїв руйнування при одновісному розтязі, але недостатньо висвітлені дані залежності кінетики накопичення пошкоджень при складному напруженому стані, не розроблено відповідно узагальненої феноменологічної моделі та критерію руйнування. Однією з причин є складність проведення експериментів для дослідження впливу виду напруженого стану.

На основі аналізу встановлено, що існує необхідність в розробці інженерних методів визначення впливу виду напруженого стану на кінетику накопичення розсіяних пошкоджень у вигляді узагальненої феноменологічної моделі та критерія руйнування на стадії зародження макротріщини.

У другому розділі наведено опис експериментальних установок типу УМС-10ТМ та модернізованої експериментальної установки TIRAtest 2300, в якому був вдосконалений вузол збору, обробки та виведення вихідних даних з експерименту в реальному часі. Це в свою чергу дозволило проводити експерименти з більшою кількістю досліджуваних факторів. Наведені методики проведення досліджень. Випробування проводилось на зразках, які були виготовлені з конструкційних матеріалів типу Д16Т, ВТ22, 07Х16Н6, 18Х2Н4ВА, 15ХСНД, 30ХГСА, 12Х18Н10Т, Сталь 45 та АМг2 за умов статичного навантаження з постійним вимірюванням зміни питомого електроопору та модулів пружності.

Отримано закономірності кінетики накопичення та критичні значення пошкодження для конструкційних металевих матеріалів при простому навантаженні, використовуючи різні підходи:

- визначення кінетики накопичення пошкодження через деградацію модуля пружності

$$D_1 = 1 - \frac{\tilde{E}}{E_0}, \quad (1)$$

$$D_1 = -\frac{1}{2} \ln \frac{\tilde{E}}{E_0}, \quad (2)$$

$$D_1 = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E_0}}, \quad (3)$$

де D_1, E_0, \tilde{E} – величина пошкодження при розтязі, початковий та поточний модуль пружності конструкційного матеріала за умов пружно-пластичного деформування, відповідно;

- визначення кінетики накопичення пошкодження через зміну величини ентропії, який запропоновано В.С. Дзюбою:

$$D_1 = \frac{S_i}{S_R}, \quad (4)$$

де S_i, S_R – поточна і критична величина ентропії;

- визначення кінетики накопичення пошкодження через накопичення енергії деформації, який запропоновано А. Фарсахом:

$$D_1 = 1 - \sqrt{\frac{U_e + \frac{2(K(U_p) - BC(U_p)^C)}{[1 + \frac{U_s}{U_e}(U_s - 2U_e)(BC(U_p)^{C-1} - K)]}}{U_s}}, \quad (5)$$

де U_s, U_e, U_p, B, C, K – повна питома енергія деформацій, енергія пружної складової, питома енергія пластичної складової і параметри матеріалу, відповідно.

На кафедрі ДММ та ОМ КПІ ім. Ігоря Сікорського був запропонований метод визначення кінетики накопичення пошкодження через зміну питомого електроопору у вигляді:

$$D = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0}, \quad (6)$$

де ρ_i, ρ_0 - поточна і початкова величина питомого електроопору матеріалу, відповідно. Оскільки застосування зазначеного методу дозволяє найбільш точно врахувати зміни в структурі матеріалу, які безпосередньо відбуваються по всьому його об'єму внаслідок пружно-пластичного деформування, то в роботі він був обраний в якості найбільш достовірного експериментального методу оцінки параметра пошкодження.

Ж. Леметром для умов одновісного напруженого стану було запропоновано залежність критичного значення пошкодження, який отриманий з дослідження багатьох експериментів, як:

$$D_{1R} = 1 - \frac{\sigma_k}{\sigma_B}, \quad (7)$$

де σ_k, σ_B - напруження руйнування і межа міцності на умовній діаграмі розтягу, відповідно.

Таким чином, використовуючи отримані експериментальні данні по зміні модуля пружності, на рис. 1 побудовані криві накопичення пошкодження за вищезазначеними методами для алюмінієвого сплаву АМг2.

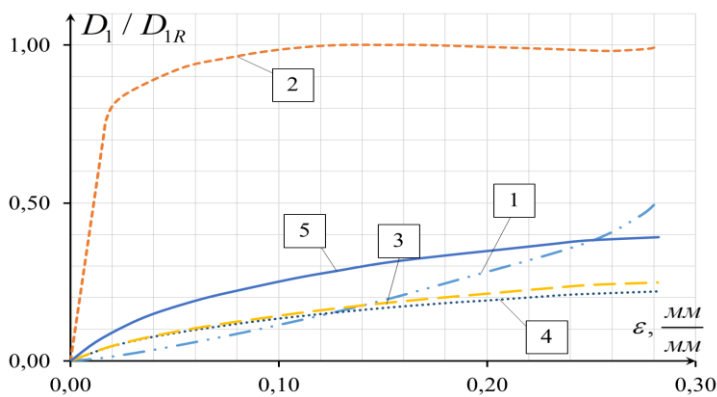
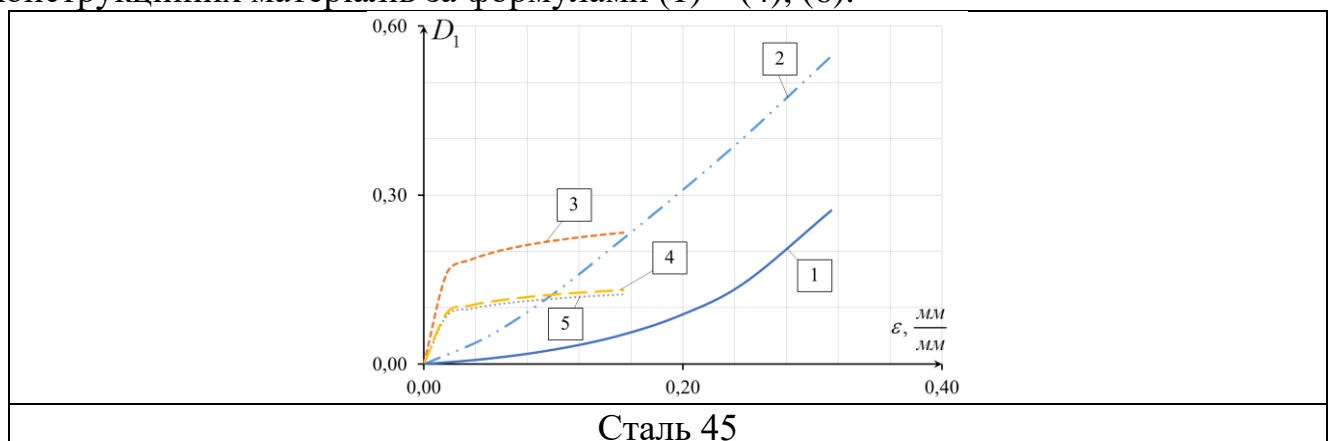


Рис.1. Кінетика накопичення пошкоджень для сплаву АМг2: 1 - за формулою (4), 2 - (5), 3 - (3), 4 - (2), 5 - (1)

З нього видно, що крива кінетики накопичення пошкоджень, яка запропонована формулою (5), має характер кривої, яка не характерна для металевих сплавів, а також є складною у використанні. Тому в подальшому цей метод не розглядався.

На рис.2. представлені криві накопичення пошкодження для різних металевих конструкційних матеріалів за формулами (1) – (4), (6).



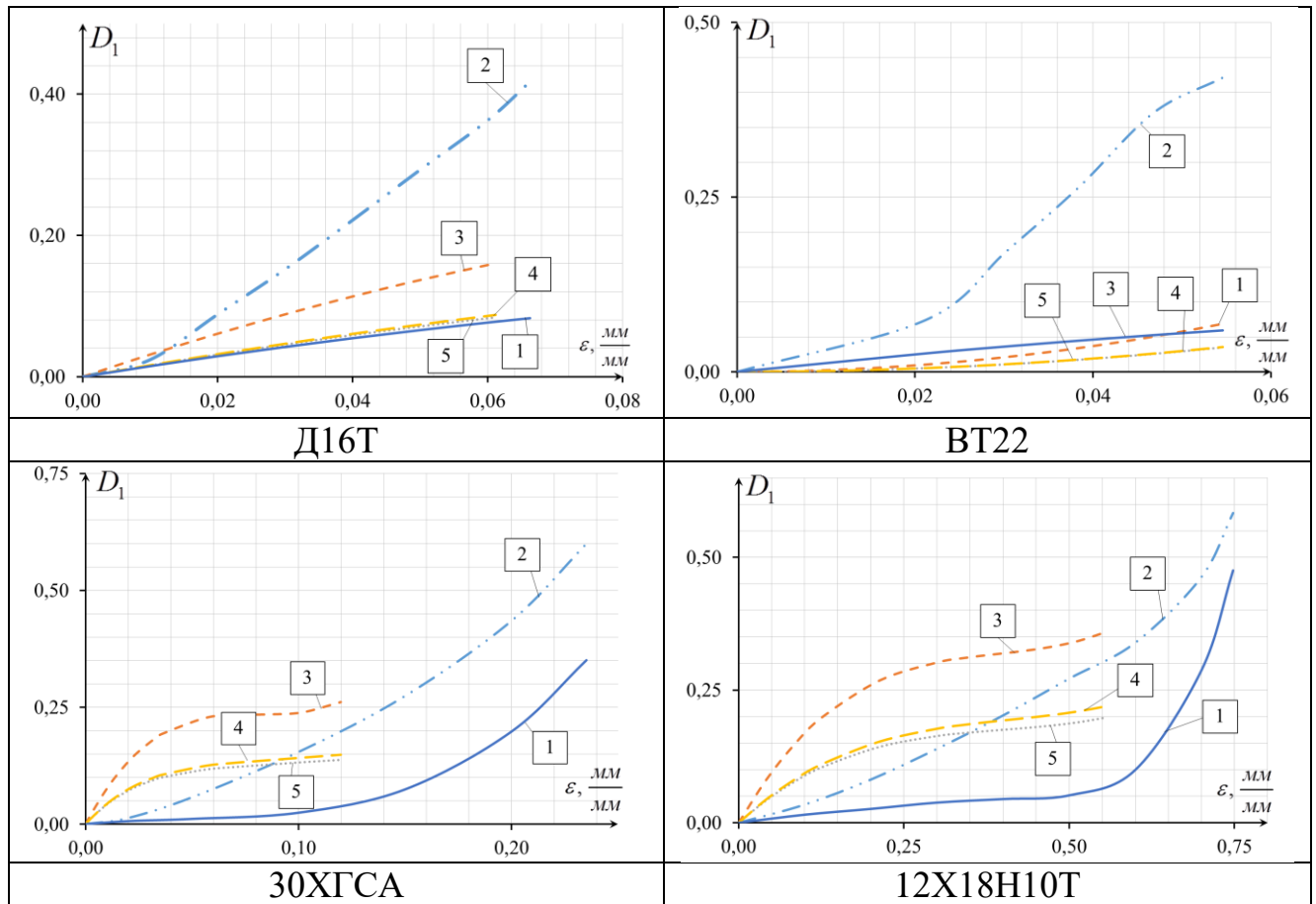


Рис.2. Кінетика накопичення пошкоджень: 1 – експериментальна крива за формулою (6), 2 – (4), 3 – (1), 4 – (2), 5 – (3)

Аналіз результатів (рис. 2), показав, що в залежності від матеріалу, крива кінетики накопичення пошкоджень при розтязі може мати лінійний (для крихких матеріалів - Д16Т, ВТ22) або нелінійний (для пластичних матеріалів - 30ХГСА, 12Х18Н10Т, Сталь 45) характер. Це підтверджується висновками, наведеними в роботах Л.М. Качанова і Ю.М. Работнова. Крім того, видно характер кривих накопичення пошкоджень при розтязі металевих матеріалів, отриманих на підставі залежності (6) від рівня пластичної деформації. Для опису кінетики накопичення пошкодження кривої 1 (рис.2), було модернізовано модель накопичення пошкодження Н.Бонори:

$$\frac{D_1}{D_{1R}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1R}} \right)^\alpha \right] \quad (8)$$

де D_{1R} , α , ε_1 , ε_{1R} - критична величина параметра пошкодження матеріалу, параметр кривизни кривої накопичення пошкоджень, поточне і граничне значення деформації при розтязі, відповідно.

На рис.3а представлена у відносних координатах кінетика накопичення пошкодження при різних параметра α за рівнянням (8). Але, як видно з експериментальних результатів кривої 1 (рис. 2), В матеріалі відбувається накопичення пошкодження зі значно меншою швидкістю на початкових етапах деформування при $\alpha < 1$ та зі значно більшою швидкістю при $\alpha > 1$. Було запропоновано модифікувати праву частину рівняння (8) у вигляді:

$$\frac{D_1}{D_{1R}} = \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1R}} \right)^\alpha \quad (9)$$

Результати розрахунків за формулою (9) представлені на рис. 3б.

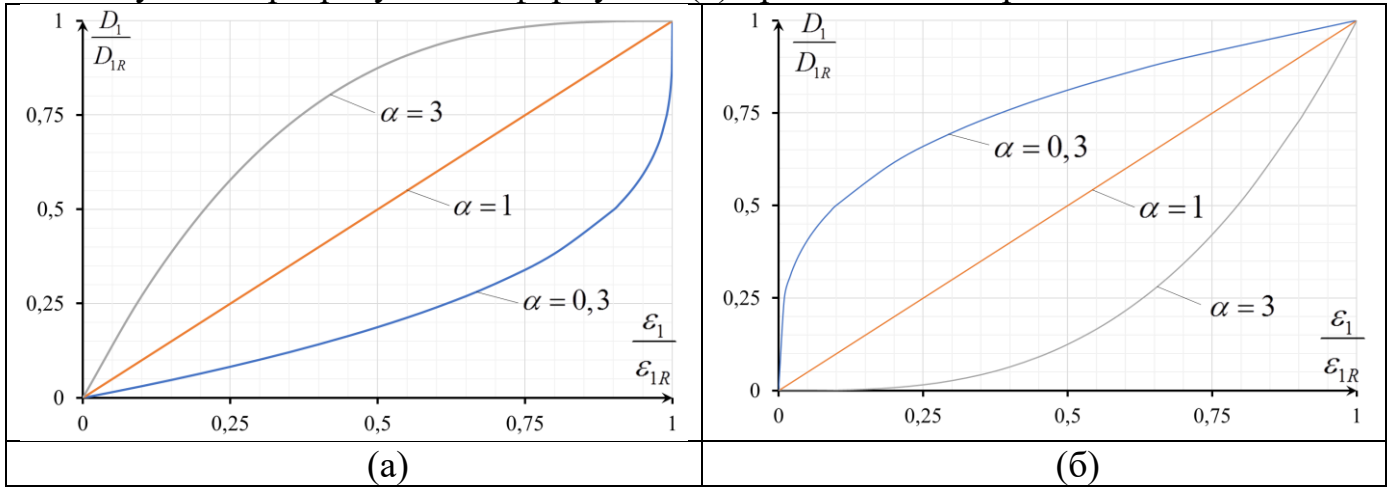


Рис.3. Криві кінетики накопичення пошкоджень в залежності від параметра α : а – за формулою (8), б – за (9)

У рівнянні (9) параметр α приймає значення наближене до 1 - для крихких матеріалів і більше 1 для випадку більш пластичних матеріалів.

В результаті проведеної статистичної обробки експериментальних даних отриманих в умовах одновісного розтягу для сплавів Д16Т, ВТ22 і сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, Сталь 45 було проведено регресійний аналіз для отримання рівняння залежності параметра α від механічних властивостей металічних конструкційних матеріалів, яка після спрощення представлено у наступному вигляді:

$$\alpha = \frac{\sigma_B}{\sigma_k} \cdot \left[10,3 \cdot E_0 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_{1R} - 2,4 \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_k} + 4,3 \right] - \varepsilon_{1R} [9,1 \cdot \varepsilon_{1R} + 11,5] - E_0 \cdot 10^{-5}, \quad (10)$$

де σ_B , σ_k , E_0 - границя міцності з умовної діаграми [МПа], напруження руйнування з умовної діаграми [МПа], перший модуль пружності [МПа], відповідно.

Крім того, на підставі статистично оброблених експериментальних даних значень пошкоджуваності та використовуючи регресійний аналіз було отримано залежність величини критичного значення скалярного параметра пошкодження від механічних характеристик матеріалу. Залежність з урахуванням спрощення представлено у наступному вигляді:

$$D_{1R} = \frac{1}{100} \left\{ \frac{\sigma_B}{\sigma_k} \cdot \left[25 \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_k} - 2 \cdot E_0 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_{1R} - 7 \right] + E_0 \cdot 10^{-5} [9 \cdot E_0 \cdot 10^{-5} - 20] + \varepsilon_{1R} [43 \cdot \varepsilon_{1R} - 4] \right\}, \quad (11)$$

На рис.4. показано порівняння розрахункової кривої кінетики накопичення пошкоджень, отриманої за формулою (9), з експериментальними значеннями параметра пошкодження, отриманими на підставі залежності (6) та за формулою (8) для найбільш пластичних матеріалів, представлених в роботі.

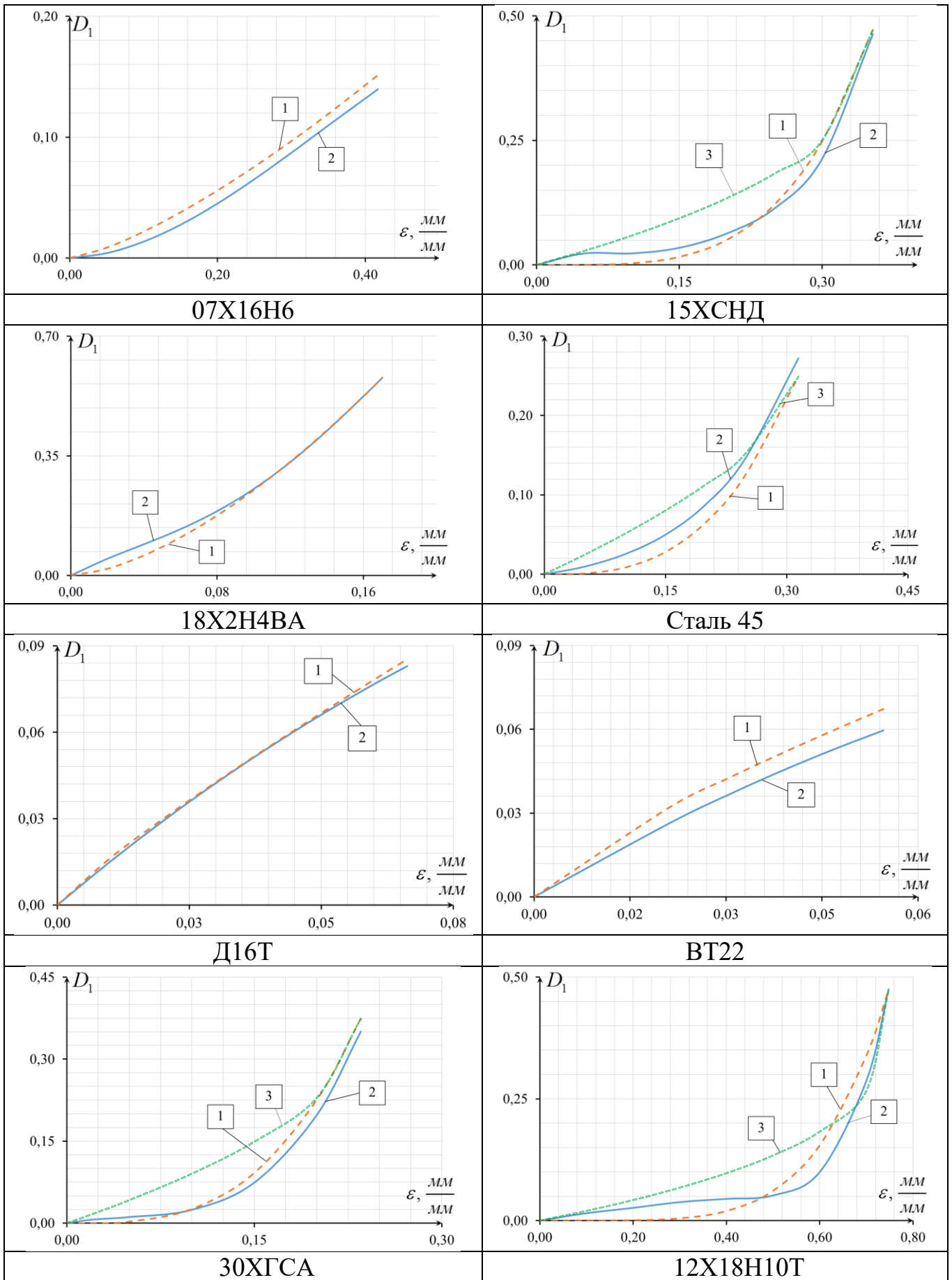


Рис.4. Кінетика накопичення пошкоджуваності: 1 - теоретична крива за формулою (9), 2 - експериментальна крива згідно (6)

При цьому була оцінена похибка розрахункового значення параметра пошкодження, отриманого на підставі розглянутих в роботі підходів (4), (7) і (11) по відношенню до експериментального. Величини похибки для розглянутих в роботі конструкційних матеріалів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Критичні значення пошкоджуваності і величина похибки щодо експериментального значення за формулою (8).

Рів-ня Матеріал	(4)		(7)		(11)		(6)
	D_{1R}	$\delta, \%$	D_{1R}	$\delta, \%$	D_{1R}	$\delta, \%$	D_{1R}
12X18H10T	0,58	20,8	0,74	-45,40	0,47	-2,0	0,48
30ХГСА	0,60	71,4	0,71	-16,46	0,37	5,7	0,35
ВТ22	0,42	600,0	0,99	-99,09	0,07	16,7	0,06
Д16Т	0,42	425,0	0,99	-91,40	0,09	12,5	0,08
Сталь 45	0,55	103,7	0,83	-39,14	0,25	-7,4	0,27
18Х2Н4ВА	0,66	13,8	0,56	-25,17	0,58	0,0	0,58
15ХСНД	0,65	41,3	0,62	-18,54	0,47	2,2	0,46
07Х16Н6	0,43	207,1	0,99	-99,94	0,15	7,1	0,14

Як видно з рис. (4) та результатів табл. 1, запропонована модель накопичення пошкоджень і критерій граничного стану дає задовільну збіжність з експериментальними даними і має похибку до 17% для розглянутих в роботі металевих матеріалів у порівнянні з іншими підходами. Для застосування розробленої моделі необхідні тільки значення механічних характеристик матеріалу, які можуть бути отримані з експерименту на простий розтяг.

Для дослідження механічних властивостей металевих конструкційних матеріалів та кінетики накопичення пошкоджень за умов зсуву, було вдосконалено методика. При цьому враховано нерівномірний розподіл деформації в перерізі по визначенню кінетики накопичення пошкодження на основі використання циліндричних зразків та обґрунтовано достовірність результатів.

Накопичення пошкодження D_{icm} за умов кручення тонкостінного зразка-трубки, визначеного через зміну питомого електроопору від кута закручування γ_{max} , описано по аналогії з рівнянням (9):

$$D_{icm}(\gamma_{max}) = D_{icm}^{KR} \left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_R} \right)^{\beta_{icm}} \quad (12)$$

де $D_{icm}^{KR}, \beta_{icm}$ - критична величина пошкодження та параметр пластичності матеріалу при крученні тонкостінної трубки.

З експериментів на кручення суцільних циліндричних зразків за формулою (6) отримуємо умовну кінетику накопичення пошкодження $D_{ум}$, яка вказує кількісно пошкодження в перерізі з гіпотезою рівномірного розподілу пошкодження вздовж радіуса в перерізі зразка. Залежність величини умовного пошкодження $D_{ум}$ від деформації γ_{max} , можна представити по аналогії з (9), у вигляді:

$$D_{ym}(\gamma_{\max}) = D_{ym}^{KR} \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_R} \right)^{\beta_{ym}} \quad (13)$$

де D_{ym}^{KR}, β_{ym} - критична величина пошкодження та параметр пластичності матеріалу при крученні циліндричного зразка.

Прийнято зміню кута зсуву і дотичні напруження уздовж радіуса циліндричного зразка, як представлено на рис. 5.

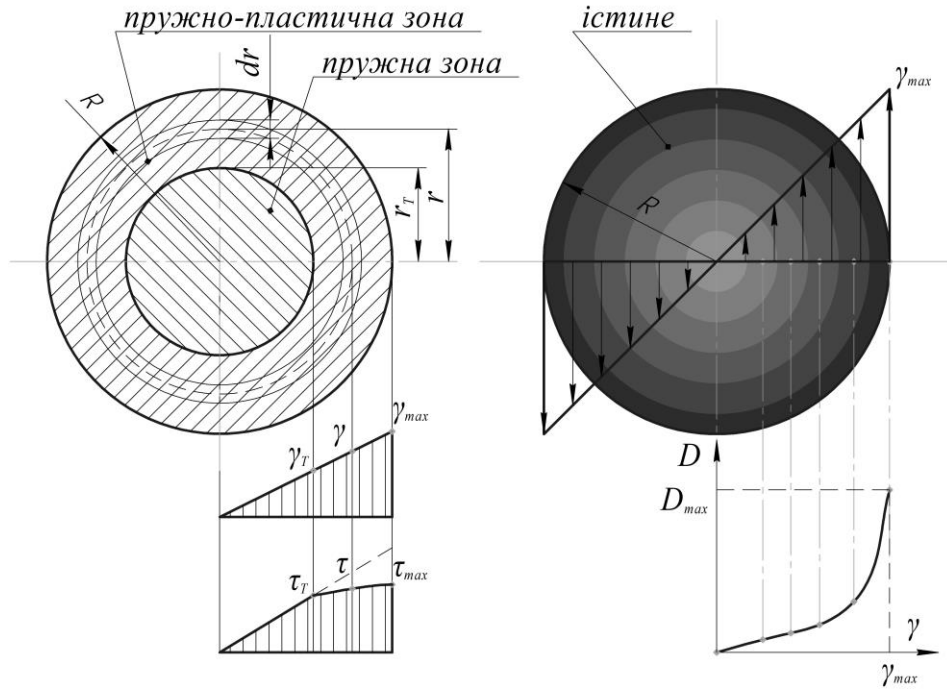


Рис. 5. – Розподіл напруження, пошкодження та деформацій уздовж радіуса циліндричного зразка за умов кручення

Враховуючи, що навантаження при крученні жорстке, можна записати лінійну залежність кута зсуву γ від радіуса r для циліндричних зразків при крученні:

$$\gamma(r) = \frac{\gamma_{\max}}{R} r \quad (14)$$

де R - максимальний радіус циліндричного зразка.

Тоді підставляючи $\gamma(r)$ замість γ_{\max} у вираз (12), отримаємо:

$$D_{icm}(\gamma) = D_{icm}(\gamma_{\max}, r) = D_{icm}^{KR} \left(\frac{\gamma_{\max}}{R \cdot \gamma_R} r \right)^{\beta_{icm}} \quad (15)$$

Рівняння (15) показує величину пошкоджуваності в кільці з середнім радіусом r і незмірно малою шириною dr (рис.5.) з площею $S(r) = 2\pi r dr$.

Знаючи величину пошкоджуваності в поточний момент часу кільця з середнім радіусом r і повну площу кільця, можна знайти теоретичну ефективну площу дефектів $S_{nop}^{теор}(\gamma_{\max}, r)$ у вигляді :

$$S_{nop}^{теор}(\gamma_{\max}, r) = S(r) \cdot D_{icm}(\gamma_{\max}, r) = 2\pi r dr \cdot D_{icm}^{KR} \left(\frac{\gamma_{\max}}{R \cdot \gamma_R} r \right)^{\beta_{icm}} \quad (16)$$

Інтегруючи вираз по радіусу r , отримаємо теоретичну площу мікропошкоджень перерізу циліндричного зразка з радіусом R в залежності від кута зсуву γ_{\max} :

$$S_{\text{пор}}^{\text{теор}}(\gamma_{\max}) = \int_0^S S_{\text{пор}}^{\text{теор}}(\gamma_{\max}, r) dS = \frac{2\pi \cdot D_{\text{icm}}^{KR} \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_R} \right)^{\beta_{\text{icm}}} \cdot R^2}{\beta_{\text{icm}} + 2} \quad (17)$$

Тоді експериментальна величина площі мікро дефектів в відповідний момент часу розраховується, як:

$$S_{\text{пор}}^{\text{екс}}(\gamma_{\max}) = \pi R^2 \cdot D_{\text{ym}}(\gamma_{\max}) = \pi R^2 \cdot D_{\text{ym}}^{KR} \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_R} \right)^{\beta_{\text{ym}}} \quad (18)$$

Порівнюючи рівняння (17) і (18), отримаємо:

$$S_{\text{пор}}^{\text{теор}}(\gamma_{\max}) = S_{\text{пор}}^{\text{екс}}(\gamma_{\max}) \quad (19)$$

Відповідно:

$$\frac{2\pi \cdot D_{\text{icm}}^{KR} \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_R} \right)^{\beta_{\text{icm}}} \cdot R^2}{\beta_{\text{icm}} + 2} = \pi R^2 \cdot D_{\text{ym}}^{KR} \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_R} \right)^{\beta_{\text{ym}}} \quad (20)$$

Формула (15) - є теоретичною істинною кривою кінетики накопичення пошкодження при крученні трубки з нескінченно малою стінкою. Тому було зроблено перерахунок з врахуванням товщини стінки. Для цього в (17) підставлено границі інтегрування, які відповідають внутрішньому і зовнішньому діаметру трубки.

Результати визначення кінетики накопичення пошкодження з використанням циліндричних зразків за запропонованою методикою у порівнянні з результатами кінетики накопичення пошкодження з використанням зразка у вигляді трубки, для сплаву типу Д16Т показано на рис. 6.:

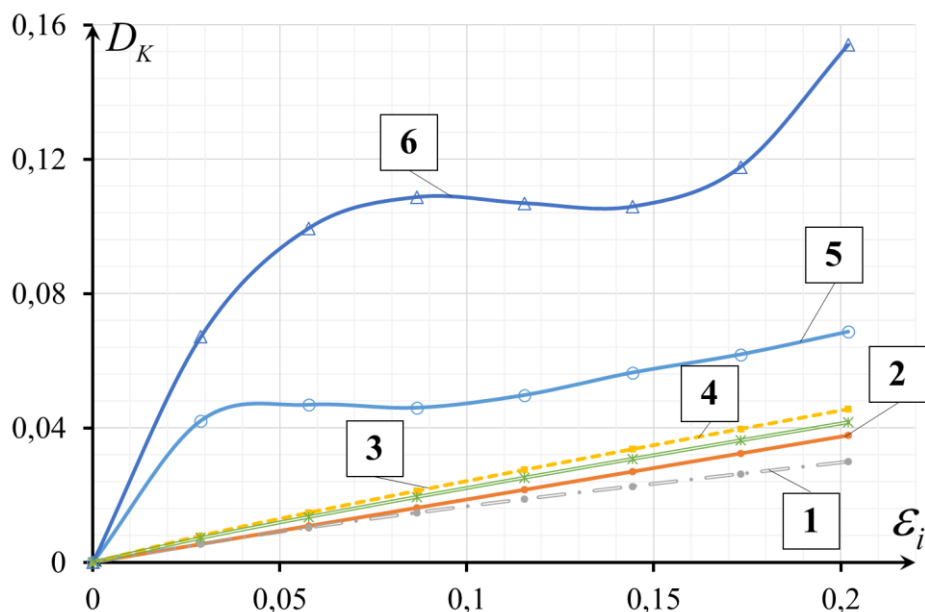


Рис. 6 – Порівняння теоретичних та експериментальних результатів кінетики накопичення пошкоджень для сплаву Д16Т.

На ньому: крива 1 – є експериментальною кривою кінетики накопичення пошкоджуваль за формулою (6) для циліндричного зразка, 2 – крива кінетики накопичення пошкодження за (6) для трубки, 3 – за формулою (12) та врахуванням товщини стінки зразка, 4- за формулою (12) , 5 та 6- відповідно залежностей (2) та (1) для трубки, якщо замінити в них модуль пружності першого роду (E) на модуль пружності при крученні (G).

Згідно рис. 6 видно адекватність моделі (12). Вона дає похибку до 30% для сплаву Д16т. Це більш точні результати в порівнянні з іншими існуючими на сьогодні методами, а методика більш проста в інженерному застосуванні.

У **третьому розділі** описано розроблений критерій руйнування на стадії зародження макротріщини, який враховує параметри виду напруженого стану (ВНС). При цьому враховуються три інваріанти тензора напружень.

В якості параметра виду напруженого стану в роботі використано параметр жорсткості виду напруженого стану η , який враховує вплив першого інваріанта тензора напруження I_1 та другого інваріанта девіатора напружень J_2 , у вигляді:

$$\eta = \frac{\sigma_0}{\sigma_i} \quad (21)$$

Другий параметр виду напруженого стану – це параметр ξ , який є нормалізованим третім інваріантом (J_3):

$$\xi = \frac{27}{2} \frac{J_3}{\sigma_i^3} \quad (22)$$

де σ_i - інтенсивність напружень.

Представлених параметрів достатньо для опису будь-якої точки напруженого стану на поверхні Мізеса в координатах головних напружень, як показано на рис. 7, де: φ - кут виду напруженого стану, σ_0 - середнє напруження, θ - кут Лоде.

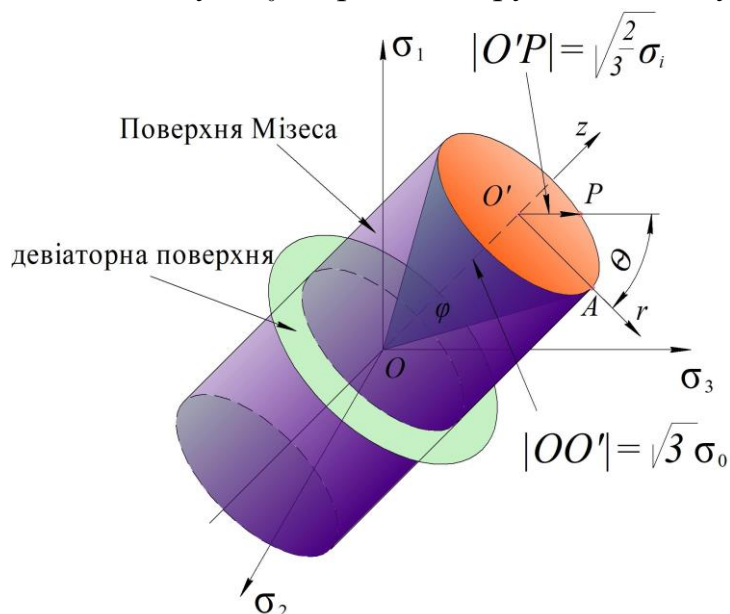


Рис. 7. – Поверхня Мізеса в координатах головних напружень.

Враховуючи наведене, було запропоновано опис критичного значення пошкодження в залежності від виду напруженого стану.

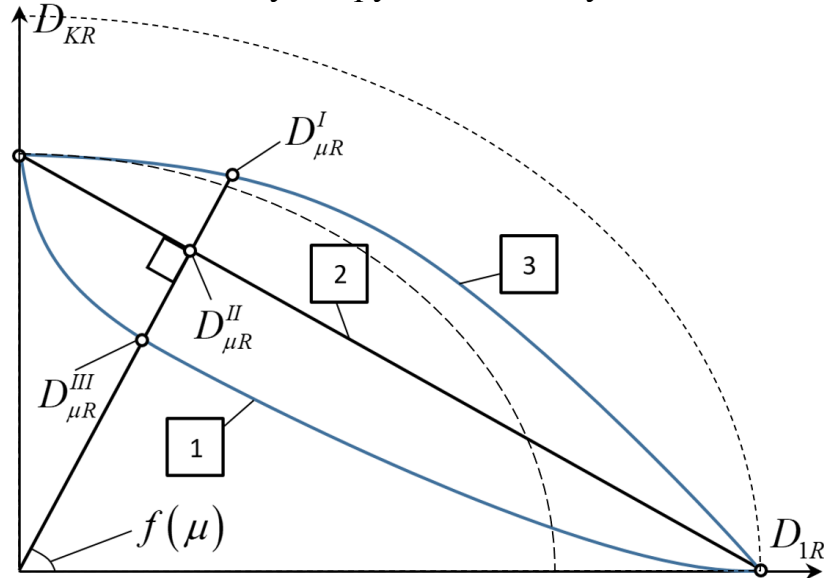


Рис. 8. Можливі варіанти зміни величини критичного значення пошкодження від виду напруженого стану.

При цьому використано модель Давіденкова-Фрідмана, яка враховує два механізми руйнування: відрив та зріз. Таким чином залежність величини критичного значення пошкодження від функції виду напруженого стану можна представити трьома кривими, (рис. 8). Функція впливу виду напруженого стану враховується кутом $f(\mu)$.

У ролі параметра для функцій виду напруженого стану $f(\mu)$ було прийнято використовувати параметр Надаї-Лоде по напруженнях, у вигляді:

$$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (23)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні напруження.

Даний параметр дозволяє описати не тільки вид напруженого стану та вплив другого головного напруження, а й вид похилих площадок, за якими відбувається ковзання (як один з механізмів пластичного деформування). Він вказує на вплив інших двох екстремальних дотичних напружень:

$$\tau_{23} = (\sigma_2 - \sigma_3) / 2; \quad \tau_{12} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$$

Перевагою такого підходу є можливість показ напружено - деформованого стану для різних матеріалів на підставі узагальненої діаграми Мора. Відомо, що при одновісному розтягуванні $\mu = -1$, при крученні $\mu = 0$, а при стиску $\mu = 1$.

З рис.8 видно вплив параметра Надаї-Лоде на функцію виду напруженого стану. З урахуванням того, що даний параметр приймає значення від -1 до 1, то їх залежність представлена, в першому наближенні, законом косинуса, рис.9:

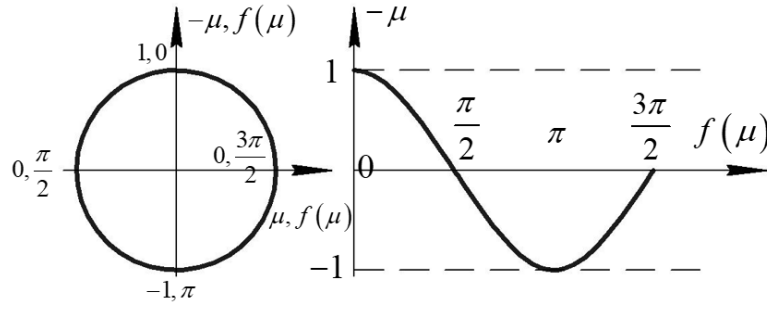


Рис. 9. Залежність функції виду напруженого стану від параметра Надаї-Лоде

Таким чином, функцію виду напруженого стану можна описати у вигляді:

$$f(\mu) = \arccos(-\mu) \quad (24)$$

З великої кількості експериментальних даних було встановлено закономірність, при якій критична величина пошкодження D_{1R} при розтязі та D_{KR} при крученні можуть приймати мінімальні та максимальні значення.

При інших видах напруженого стану накопичення пошкодження відбувається від дії одночасно двох механізмів руйнування: відриву та зрізу. Тоді критична величина пошкодження $D_{\mu R}$ при складному напруженому стані буде приймати значення в межах:

$$\begin{cases} D_{KR} \leq D_{\mu R} \leq D_{1R}, \text{ при } \mu \leq 0 \\ D_{KR} \leq D_{\mu R} \leq D_{-1R}, \text{ при } \mu \geq 0, D_{KR} \leq D_{-1R} \\ D_{KR} \geq D_{\mu R} \geq D_{-1R}, \text{ при } \mu \geq 0, D_{KR} \geq D_{-1R} \end{cases} \quad (25)$$

де D_{-1R} -критичне значення пошкодження при одновісному стисненні.

Враховуючи систему нерівностей (25), єдиною кривою, яка задовольняє всі умови – це крива 3 (рис.8). Математично, в першому наближенні, цю криву було описано частиною еліпса. Тоді критичне значення пошкоджуваності $D_{\mu R}$ в залежності від функції виду напруженого стану $f(\mu)$, який виступає в ролі кута (рис.9), отримано у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} D_{\mu R} = \frac{D_{1R} \cdot D_{KR}}{\sqrt{D_{KR}^2 \cdot \cos^2 f(\mu) + D_{1R}^2 \cdot \sin^2 f(\mu)}}, \mu \leq 0 \\ D_{\mu R} = \frac{D_{-1R} \cdot D_{KR}}{\sqrt{D_{KR}^2 \cdot \cos^2 f(\mu) + D_{-1R}^2 \cdot \sin^2 f(\mu)}}, \mu > 0 \end{cases} \quad (26)$$

Враховано, що кінетика накопичення пошкоджень і критична величина пошкодження при розтязі (D_{1R}) відрізняється від названих умов стиснення (D_{-1R}). Залежність критичної величини пошкодження від функцій виду напруженого стану повинна описуватися двома еліпсами. Перше рівняння в системі рівняння (26) описує еліпс -А в 2 і 4 четвертині на рис.10, який характеризується видом напруженого стану при комбінації розтягу та кручення. Друге рівняння описує еліпс -В в 1 і 3 четвертині на рис.10. Ця частина характеризується видом напруженого стану при комбінації стиснення та кручення. Таким чином система рівнянь (26) описує фігуру-С, яка складається з двох еліпсів А та В.

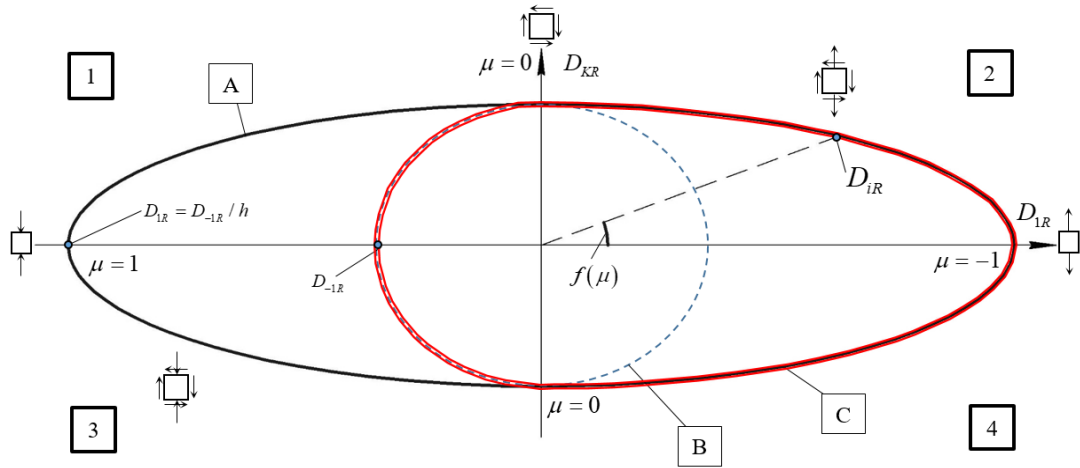


Рис. 10. Залежність критичної величини пошкодження від функцій виду напруженого стану в системі еліптичних координат

Відомо, що залежність критичного значення величини пошкодження при стисненні D_{-1R} від величини критичної величини пошкоджуваності при розтягуванні D_{1R} записується, як:

$$h \cdot D_{1R} = D_{-1R} \quad (27)$$

де h - параметр заліковування, який визначається експериментально.

Введено, враховуючи (27), функцію яка враховує знак параметра Надаї-Лоде та впливає на критичне значення пошкоджуваності $D_{\pm 1R}$, за умов розтягу або стиску. Тоді:

$$D_{\pm 1R} = D_{1R} \left[\frac{\left(\frac{\mu}{|\mu|} + 1 \right) (h-1)}{2} + 1 \right], \quad (28)$$

Якщо підставити рівняння (27) і (28) в перше рівняння системи (26), отримаємо:

$$D_{iR} = \frac{D_{\pm 1R} \cdot D_{KR}}{\sqrt{D_{KR}^2 \cdot \cos^2 \arccos(-\mu) + D_{\pm 1R}^2 \cdot \sin^2 \arccos(-\mu)}} \quad (29)$$

Рівняння (29) повністю описує фігуру С на рис.10, що дозволяє визначати критичну величину пошкоджуваності від впливу виду напруженого стану з урахуванням різних механізмів руйнування при розтязі та стиску.

Аналогічно, отримано рівняння залежності критичного значення інтенсивності деформацій ε_{iR} від виду напруженого стану, у вигляді:

$$\varepsilon_{iR} = \frac{\varepsilon_{\pm 1R} \cdot \varepsilon_{KR}}{\sqrt{\varepsilon_{KR}^2 \cdot \cos^2 \arccos(-\mu) + \varepsilon_{\pm 1R}^2 \cdot \sin^2 \arccos(-\mu)}} \quad (30)$$

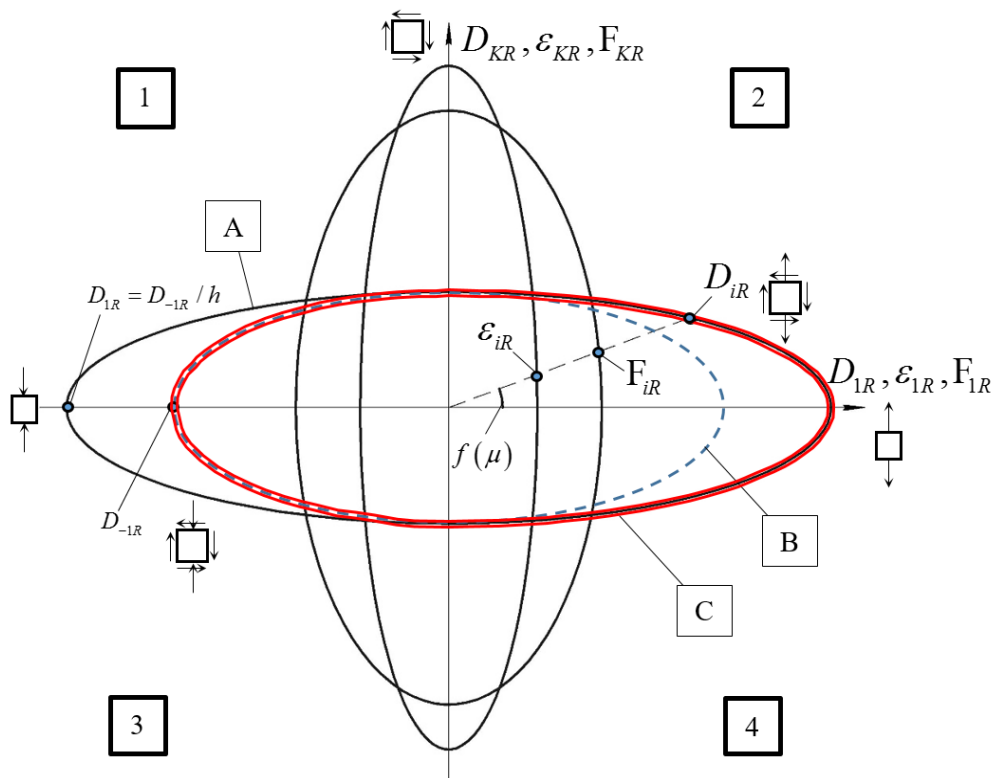


Рис. 11. Залежність критичної величини пошкоджуваності і інтенсивності деформацій від функцій виду напруженого стану в еліптичній координаті

Система рівнянь з (29) та (30) описує граничні величини пошкоджуваності та інтенсивності деформацій від виду напруженого стану і пов'язує їх між собою як представлено на рис.11.

Граничні значення пошкодження та інтенсивності деформації при крученні для Д16Т, 30ХГСА і 12Х18Н10Т представлено в табл. 2

Таблиця 2

Експериментальні дані критичної величини пошкоджуваності і інтенсивності деформацій при розтягуванні, крученні Д16Т, 30ХГСА і 12Х18Н10Т.

Матеріал	Д16Т	30ХГСА	12Х18Н10Т
D_{KR}	0,022	0,0151	0,067
ε_{KR}	0,189	0,742	1,057

Згідно даних з табл. 2 і системи рівнянь з (29) та (30), отримано залежність критичної величини пошкоджуваності від інтенсивності деформацій в залежності від виду напруженого стану для сплавів типу Д16Т, 30ХГСА, 12Х18Н10Т (крива 3) на рис.12. Відповідно крива 1 та 2 – криві кінетики накопичення пошкодження на розтяг та кручення.

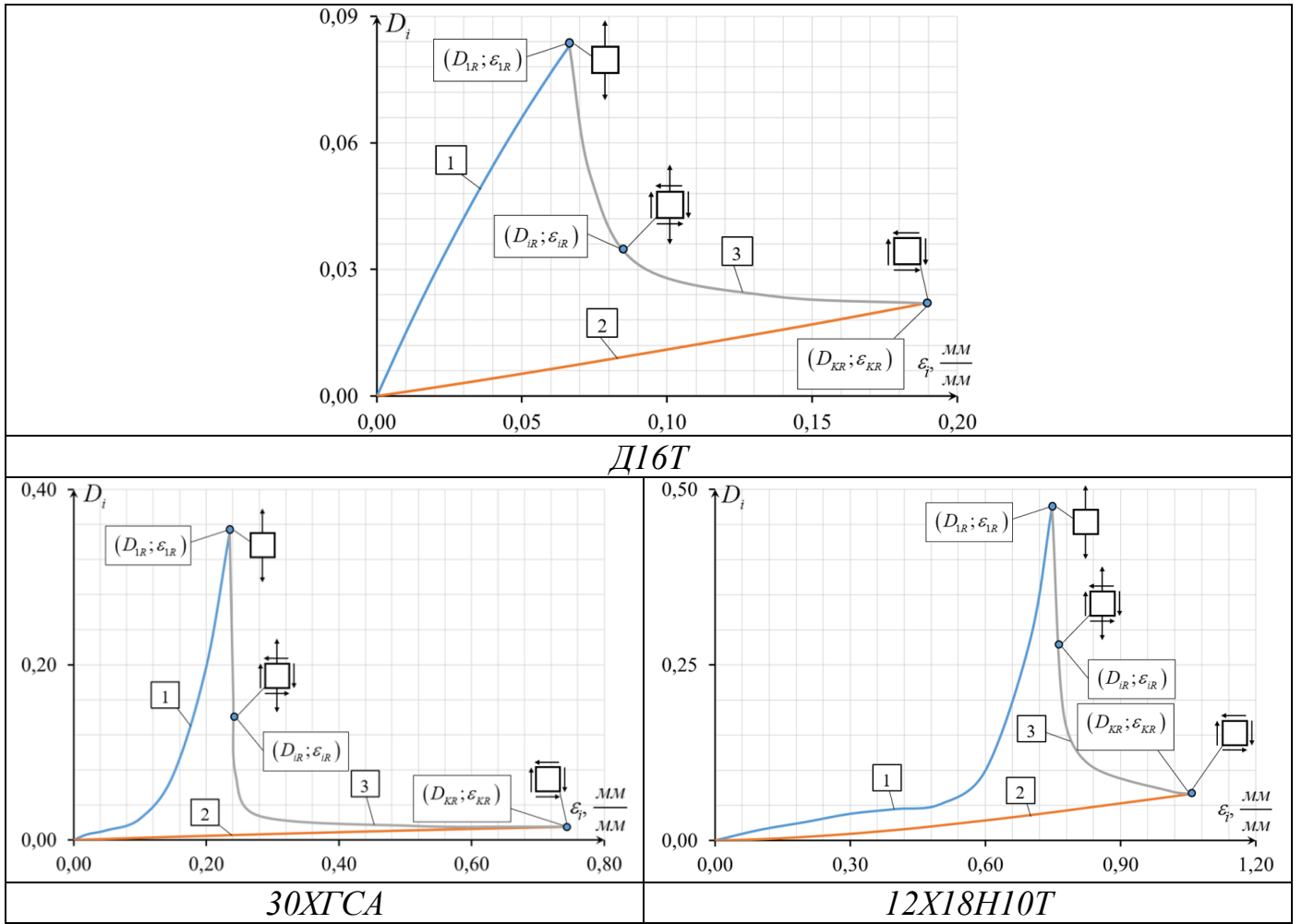


Рис. 12. Залежність критичної величини накопиченого пошкодження щодо інтенсивності деформацій від впливу виду напруженого стану

Вплив першого інваріанта тензора напруження та другого інваріанта девіатора напруження в деформаційному критерії за формулою (30), було враховано параметром η , у вигляді:

$$\varepsilon_{\mu R}^{(\eta)} = C_{1\mu} e^{-C_{2\mu}\eta} \quad (31)$$

де $C_{1\mu}, C_{2\mu}$ - константи матеріалу, які визначаються експериментально при заданому μ .

Підставляючи (31) в рівняння (30), отримаємо:

$$\varepsilon_{iR}(\eta; \mu) = \frac{\left\{ \varepsilon_{1R}(\eta) + \frac{\left[\frac{\mu}{|\mu|} + 1 \right] [\varepsilon_{-1R}(\eta) - \varepsilon_{1R}(\eta)]}{2} \right\} \cdot \varepsilon_{0R}}{\sqrt{\varepsilon_{0R}^2(\eta) \cdot \cos^2 \arccos(-\mu) + \left\{ \varepsilon_{1R}(\eta) + \frac{\left[\frac{\mu}{|\mu|} + 1 \right] [\varepsilon_{-1R}(\eta) - \varepsilon_{1R}(\eta)]}{2} \right\}^2 \cdot \sin^2 \arccos(-\mu)}} \quad (32)$$

Враховуючи, що параметр Надаї-Лоде має залежність з параметром μ , отримано:

$$\xi = \cos \left(3 \cdot \left\{ \arctg \left[\frac{\mu}{\sqrt{3}} \right] + \frac{\pi}{6} \right\} \right), \quad (33)$$

Проекція поверхні граничного стану на площину $\eta - \xi$ показана а рис.13.

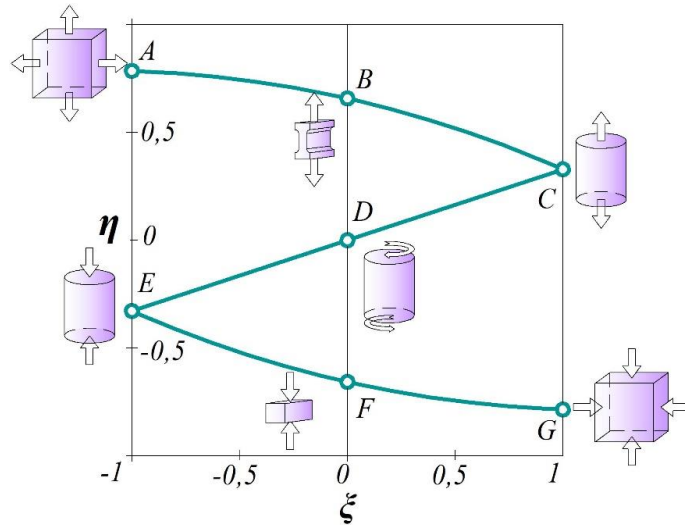


Рис. 13. Проекція поверхні інтенсивності незворотної деформації на площину $\eta - \xi$

З рис.13 видно, що критерій у вигляді (30) дозволяє описати тільки лінію поверхні, проекція якого відображається кривою C, D, E. В той же час, критерій за формулою (32) дозволяє описати повну поверхню в будь-якій точці на площині $\eta - \xi$.

Четвертий розділ присвячений чисельному моделюванню та перевірці границь використання запропонованого критерію. Для точного визначення параметрів виду напруженого стану та параметрів моделі використано ефективні криві розтягу в координатах $\sigma - \varepsilon$, які враховують пошкоджуваність матеріалу.

Змодельовані експерименти по визначенню граничної величини незворотної деформації в зразках з різними радіусами виточок, для дослідження впливу ВНС, використовуючи експериментальні дані в роботі Бао. Отримано поля розподілу інтенсивності напружень, параметра η та ξ (рис. 14).

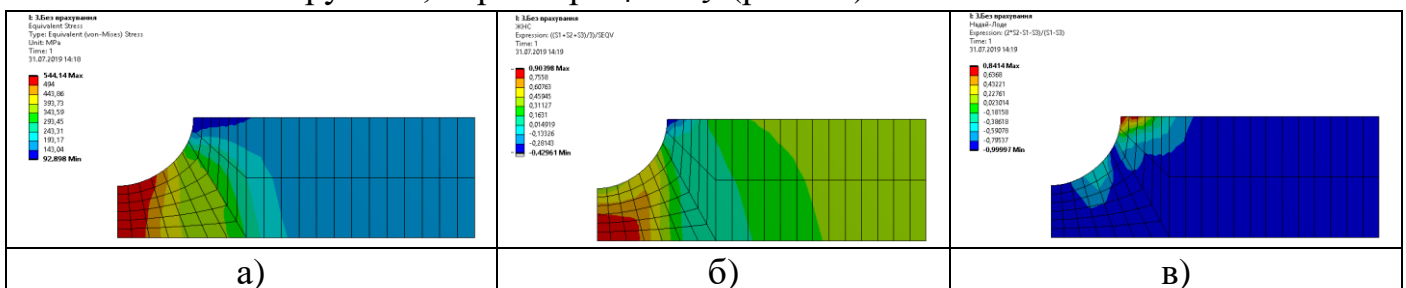


Рис. 14. Поля розподілу: (а)-інтенсивності напружень, (б)-параметра η , (в)-параметра μ ,

За результатами чисельного моделювання отримано залежність зміни параметрів виду напруженого стану для небезпечної точки в залежності від переміщення з врахуванням та без врахування пошкоджуваності (рис. 15).

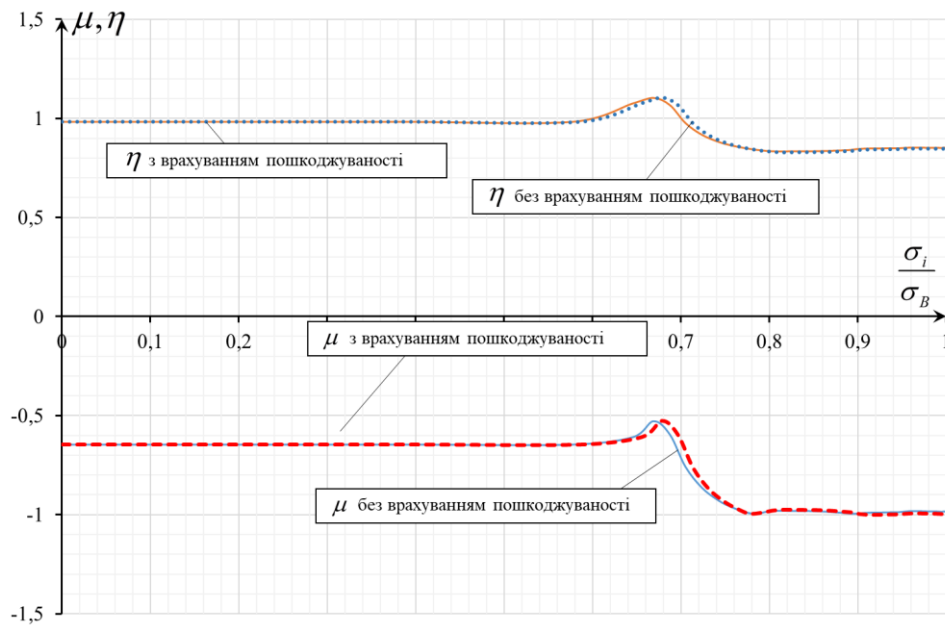


Рис. 15. Порівняння параметрів виду напруженого стану в процесі пружно-пластичного деформування з врахуванням та без врахування кінетики накопичення пошкодження

На рис. 16 побудовано, з використанням результатів чисельного моделювання та експериментальних даних, поверхню інтенсивності незворотної деформації за критерієм (32) в залежності від двох параметрів (ВНС) для сплавів типу 2024-T351.

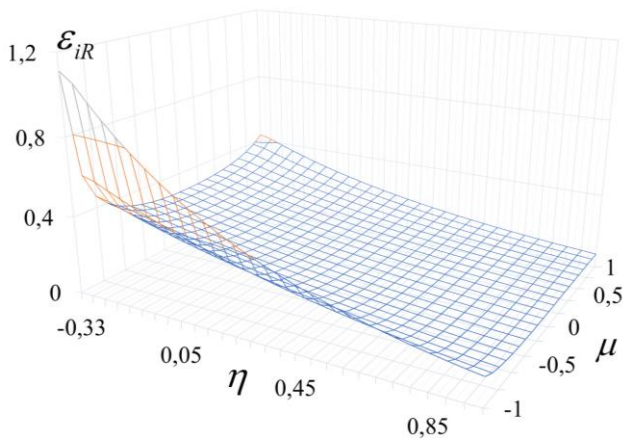


Рис. 16. Поверхня критичного значення інтенсивності незворотної деформації для сплаву типу 2024-T351 в залежності від ВНС з урахуванням пошкодження

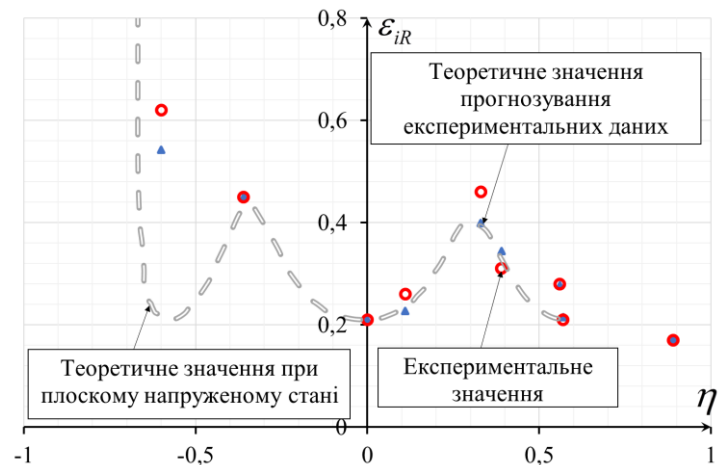


Рис. 17. Порівняння результатів за критерієм (32) по відношення до експериментальних на прикладі сплаву 2024-T351

Порівняння експериментальних даних з теоретичними значеннями за критерієм (32) представлено на рис. 17. Також тут представлено гриву граничного стану за інтенсивністю деформації при плоскому напруженому станів, що відповідає точкам на кривій крива (A, B, C, D, E, F, G) представленої на рис.14.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

- 1) Розроблена феноменологічна модель кінетики накопичення пошкодження та критерій руйнування на стадії зародження макротріщини в конструкційному матеріалі. Встановлено залежність параметрів моделі та критерія від пружно-пластичних характеристик конструкційних матеріалів. Показано порівняння експериментальних даних з теоретичними та встановлені їх границі використання. Що дало змогу отримати кінетику накопичення пошкодження для конструкційних матеріалів більш простим методом, та забезпечити високу збіжність з експериментальними даними.
- 2) На основі зміни питомого електроопору в металічних матеріалах розроблена ефективна методика розрахунку кінетики накопичення пошкоджень за умов зсуву з використанням циліндричних зразків. Методика враховує нерівномірний розподіл деформації вздовж радіуса зразка та дозволяє отримати закономірності кінетики накопичення пошкоджуваності, яке еквівалентне кінетиці накопичень пошкоджень в тонкостінних зразках.
- 3) Вперше розроблено та обґрунтовано узагальнений деформаційний критерій на стадії зародження макротріщини при складному напруженому стані з врахування двох механізмів руйнування (відриву та зрізу).
- 4) Розроблено деформаційний критерій граничного стану для металевих конструкційних матеріалів з урахуванням пошкоджуваності, який враховує вплив першого інваріанта тензора напруження, другого і третього інваріанта девіатора напруження. Обґрунтовано узагальнений деформаційний критерій граничного стану конструкційних матеріалів за умов складного напруженого стану, який враховує два механізми руйнування (відрив та зріз). Перевірено достовірність запропонованого критерія на сплаві 2024-T35.
- 5) Модернізовано експериментальний стенд TIRArest 2300 для визначення механічних характеристик матеріалів з урахуванням поставлених задач визначення кінетики накопичення мікропошкоджень під час пружно-пластичного деформування. Це дало змогу розширити можливості проведення більш складних експериментів при вивченні великої кількості різних факторів, за допомогою розробленої нової програми та створенні більш сучасного та ефективного блоку збору та збереження даних.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фам Дик Куан, Поврежденность и эффективная диаграмма деформирования алюминиевого сплава АМг2/ Фам Дик Куан, О. П. Халімон // Технічні науки та технології , 2014 , №3 (72) С. 145–151. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus) *Здобувачем виконані обробка експериментальних даних та побудова залежностей пошкоджуваності від рівня пластичної деформації.*
2. Фам Д. К. и др. Кинетика накопления повреждений и критерий предельного состояния конструкционных материалов //Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – Т. 1. – №. 82. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus) *Здобувачем виконано*

розробку моделі та критерія граничного стану з врахуванням результатів експерименту.

3. О. В. Timoshenko,. The influence of plastic deformation on the low-cycle fatigue during the burnishing of holes in flat specimens of D16chT steel / О. В. Timoshenko, А. М. Babak, D.K. Pham, Yu. М. Sydorenko // Strenght of materials. – 2018. – Vol 50 (№3). – p. 448–452. (Входить до НМБ Scopus) (іноземна) *Здобувачем розроблено математичну модель залежності кількості циклів до руйнування від рівня пластичної деформацій при дорнуванні та максимальних напружень.*

4. Фам Дик Куан, Пошкоджуваність металевих матеріалів з урахуванням виду напруженого стану/ Фам Дик Куан, О. В. Тимошенко, В.В. Коваль, А.М. Бабак // Технічні науки та технології, 2018, №2 (12) С. 49–58. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar) *Здобувачем розроблено критерій граничного стану враховуючи 2 механізми руйнування.*

5. Фам Дик Куан, Прогнозування довговічності силових елементів з функціональними отворами при малоцикловій втомі / Фам Дик Куан, О. В. Тимошенко, А.М. Бабак // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2018, №2 (65) С. 56–67. (Входить до РІНЦ (eLibrary), Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky)). *Здобувачем виконані обробка експериментальних даних та побудова залежностей пошкоджуваності від впливу виду напруженого стану.*

6. V. Pimanov, Definitionsof mechanical properties of steels under conditions of action differentiated / D.Pham, V. Kalyuzhny, V. Pimanov, V. Timoshenko. // Polish journal of science. – 2019. – №16. – С. 27–37. (Входить до НМБ Google Scholar) (іноземна) *Здобувачем виконані обробка експериментальних даних.*

7. Фам Д.К. Кінетика накопичення пошкоджень і критерій граничного стану металевих конструкційних матеріалів / Бабак А.М., Демидюк Т.П. // ХІХ міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Матеріали конференції. – Київ, 2018.– С. 59.

8. Фам Д.К. Оцінка впливу експлуатаційних навантажень на міцність силових конструктивних елементів з отвором після дорнування / Бабак А.М., Федосенко П.В. // ХVІІІ міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Матеріали конференції. – Київ, 2017.– С. 79.

АНОТАЦІЯ

Фам Д.К. критерій граничного стану конструкційних матеріалів з врахуванням пошкоджуваності. – 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, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробці критерія граничного стану конструкційних матеріалів, які працюють в умовах складного напруженого стану у випадку статичного навантаження з урахуванням пошкоджуваності.

Для визначення величини параметра пошкоджуваності використовувалися різні енергетичні підходи, які базуються на зміні фізико-механічних характеристик матеріалів при простих навантаженнях (розтяг та кручення).

На основі отриманих експериментальних результатів на різних конструкційних матеріалах, вдосконалено модель опису кінетики накопичення пошкодження, запропонований Бонора, в залежності від рівня пластичної деформації. Отримано залежність параметрів моделі та критерія граничного стану від пружно-пластичних характеристик матеріала. Проведено порівняння отриманих теоретичних значень з експериментальними.

Розроблена методика визначення кінетики накопичення пошкодження у випадку кручення циліндричних зразків з врахуванням неоднорідності розподілу деформації в перерізі зразка.

На основі підходу Давіденкова-Фрідмана розроблено критерій граничного стану конструкційних матеріалів з врахуванням виду напруженого стану та пошкоджуваності. Представлено порівняння результатів граничного стану, отриманих за розробленим критерієм, експериментальними даними, та іншими методами.

Ключові слова: пошкоджуваність, складний напружений стан, ефективні напруження, вид напруженого стану, граничний стан, енергетичний підхід, критерій руйнування.

АННОТАЦИЯ

Фам Д.К. Критерий предельного состояния конструкционных материалов с учетом повреждаемости. – 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, 2019.

Диссертационная работа посвящена разработке деформационного критерия предельного состояния конструкционных материалов с учетом повреждаемости при статическом нагружении.

В данной работе для определения кинетики накопления повреждаемости конструкционных материалов использовались различные энергетические подходы, основанные на изменении физико-механических характеристик материалов в условиях простого нагружения (растяжение и кручение).

На основании анализа экспериментальных данных получено закономерность накопления рассеянных повреждений от уровня пластической деформаций, для описания которого было модернизировано модель накопления повреждаемости передоложенным Бонора. Установлено зависимость параметров модели и критерия от упруго-пластических характеристик материала, представлено сравнение теоретических значений за представленной моделью и критерием с экспериментальными значениями.

Разработана методика получения истинной кинетики накопления повреждений при кручении цилиндрических образцов с учетом неоднородности распределения

деформации в поперечном сечении образца. Получена кинетика накопления повреждений при кручении для Д16Т, 30ХГС и 12Х18Н10Т.

На основе подхода Давиденко-Фридмана с учетом двух механизмов разрушения (отрыва и сдвига) представлен критерий предельного состояния конструкционных материалов с учетом вида напряженного состояния и повреждаемости. Представлено сравнение результатов предельного состояния, полученных по представленному критерию с экспериментальными данными.

Ключевые слова: поврежденность, предельное состояние, вид напряженного состояния, критерий предельного состояния, параметр жесткости вида напряжённого состояния, энергетический подход.

SUMMARY

Pham D.Q. Failure criterion of structural materials with taking into account damage. – Manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in the specialty 01.02.04 – mechanics of deformable bodies. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of the failure criterion of structural materials, working under complex stress conditions in the case of static load, taking into account damage.

In this work, to determine the value of the damage parameter, various energy approaches were used, based on changes in the mechanical characteristics of materials. Based on the obtained experimental results of various structural materials, the model of a description of kinetics of damage accumulation proposed by Bonora was modernized depending on the level of plastic deformation. The dependence of model parameters and the criterion on elastic-plastic characteristics of the material under tension is established. The efficiency and advantage of the proposed model to predict kinetics of damage accumulation and the criterion in comparison with other modern approaches in relation to experimental data, in the simplicity of application and convergence of the results is shown.

To predict the value of damage accumulated in the process of destruction by the shear mechanism, a model based on a change in electrical resistance using cylindrical samples, taking into account the uneven distribution of deformations along the radius, is proposed. The method of determining the model parameters is presented. A comparison between theoretical results of the proposed model and existing methods with respect to experimental data obtained using thin-walled samples is shown. What has shown the advantage of this method in the convergence of results with experimental data and the simplicity of its implementation relative to existing methods.

Based on the Davidenko-Friedman approach, taking into account two fracture mechanisms (separation and shear), in which the minimum and maximum of the critical damage value of the structural material are accepted, the criterion of the limiting state by the limiting value of damage from functions of the type of stress state is developed. As a parameter of functions of the type of stress state, the Nadai-Lode parameter was used. From the point of the engineering views, use of such a parameter, it is convenient, since it

takes the value -1 tension, 0 - torsion, 1 - compression. This, in turn, made it possible to describe the function of the type of stress state from the Nadai-Lode parameter in the form of a cosine law. To take into account the influence of the sign of the stress state parameter on the damage limit value, a function is represented taking into account the healing parameter. By analogy with the criterion of the limit state for damage, a deformation criterion was obtained.

In the work, the von-Mises stress hypersurface was used as the limiting surface for stresses, which showed the need to take into account the influence of the first stress invariant and the second invariant of the stress deviator through the parameter of the triaxiality. Using the Nadai-Lode parameter, which takes into account the third invariant of the stress deviator and the stress triaxiality parameter, allows us to describe any point on the von-Mises hypersurface.

To expand the range of applicability of the limit state criterion, an exponential dependence of the limit strain on the stress triaxiality parameter obtained by analyzing the experimental data of various structural materials is introduced.

Numerical modeling for samples with stress concentrators was carried out using the effective tensile curve. Fields of the stress intensity distribution, the Nadai-Lode parameter and the stress triaxiality parameter are obtained. The values of the parameters of the type of stress state from the magnitude of deformations are analyzed and compared with taken into account the value of damage and without.

The limiting state surfaces are obtained for alloys of type 2024-T351. The results of the presented criterion of the limiting state are compared with modern approaches with respect to experimental results.

Based on the research, a deformation criterion of the limiting state was developed taking into account the value of damage, two fracture mechanisms, three invariants of the stress tensor. The efficiency of the developed deformation criterion of the limiting state is shown, which allows one to obtain the magnitude of the limiting value of irreversible deformations for types of stress state that cannot be experimentally reproduced under static loads.

Keywords: damage, complex stress state, effective stress, type of stress state, limiting state, energy approach, failure criterion, parameter of the type of stress state, Nadai-Lode.

