

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

КОВАЛЬ ВІКТОР ВІКТОРОВИЧ

УДК 539.4

**МАЛОЦИКЛОВА ВТОМА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З
УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖУВАНOSTІ**

05.02.09 – динаміка та міцність машин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2018

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
Національної академії наук 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
Ігнатович Сергій Ромуальдович
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри конструкції літальних апаратів

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

Захист відбудеться «11» червня 2018 р., о 15⁰⁰ 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 «02» травня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.О. Боронко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розрахунок на малоциклову втому є одним із обов'язкових видів розрахунку на міцність та довговічність як на стадії проектування, так і під час визначення залишкового експлуатаційного ресурсу відповідальних елементів конструкцій у наукоємних та високотехнологічних сегментах машинобудівного комплексу (авіакосмічна галузь, енергомашинобудування, нафтогазова промисловість, тощо). В свою чергу оцінка довговічності конструкцій та їх високонавантажених елементів в умовах малоциклової втоми базується на оцінці напружено-деформованого стану в зонах концентрації напружень та деформацій, які є найбільш небезпечними з точки зору виникнення макротріщини.

Вирішення комплексної задачі оцінки довговічності відповідальних елементів конструкцій здійснюється на основі результатів, отриманих за допомогою статичного експерименту, які можуть бути частково доповнені даними стандартних випробувань на малоциклову втому. Більшість існуючих аналітичних розрахункових методів визначення довговічності елементів конструкцій дають можливість знайти максимальні напруження та деформації шляхом введення у рівняння відповідних коефіцієнтів концентрації напружень. У більшості підходів розрахунки виконуються з використанням статичних та циклічних механічних характеристик матеріалів без врахування впливу процесу накопичення мікропошкоджень. Цей процес є невід'ємною частиною пружно-пластичного деформування та, безумовно, впливає на деградацію фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів. Отже, для достовірної оцінки ресурсу конструкції необхідно врахувати вплив пошкоджуваності на статичне та циклічне пружно-пластичне деформування конструкційного матеріалу.

Таким чином розробка ефективного методу розрахунку довговічності елементів конструкцій з урахуванням впливу пошкоджуваності для умов малоциклового навантаження є актуальною задачею, що становить науковий і практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі динаміки та міцності машин і опору матеріалів механіко-машинобудівного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського 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), та підтемою «Розробка методу прогнозування ресурсу конструктивних елементів крила літака на стадії зародження макротріщини з урахуванням кінетики накопичення розсіяних пошкоджень» (держреєстрація №0113U001855) комплексної НДР «Вплив конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів на довговічність силових конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами» (держреєстрація №0113U000249).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – розробити метод розрахунку довговічності елементів конструкцій з урахуванням впливу пошкоджуваності для умов малоциклового навантаження.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- модернізувати експериментальне обладнання для визначення механічних характеристик матеріалів з урахуванням поставлених задач з визначення кінетики накопичення мікропошкоджень під час пружно-пластичного деформування;
- проаналізувати вплив пошкоджуваності на основні механічні характеристики конструкційних металевих матеріалів;
- проаналізувати вплив неоднорідності напруженого стану на розподіл параметра пошкоджуваності у зонах концентрації напружень (деформацій);
- визначити закономірності процесу накопичення пошкоджень за умов статичного та циклічного навантаження, а також отримати параметри феноменологічної моделі накопичення пошкоджень для металевих сплавів, що розглядались у роботі;
- модифікувати залежності з визначення ефективних коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій (за Нейбером-Махутовим);
- провести апробацію запропонованого методу розрахунку довговічності елементів конструкцій для умов малоциклового навантаження шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних.

Об'єкт дослідження: малоциклова втома металевих конструкційних матеріалів

Предмет дослідження: довговічність елементів конструкцій при малоцикловій втомі з урахуванням пошкоджуваності.

Методи досліджень. Експериментальні методи визначення закономірностей накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах та конструктивних елементах для умов статичного та малоциклового навантаження (деформування), що базуються на основі положень континуальної механіки пошкоджуваності та механіки твердого деформівного тіла. При аналітичних розрахунках використовувались метод скінченних елементів, метод найменших квадратів, методи статистичної обробки експериментальних даних, регресійний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів

– розроблено метод розрахунку елементів конструкцій на малоциклову втому з врахуванням розсіяного пошкодження шляхом введення у розгляд ефективної діаграми деформування, побудованої на основі концепції ефективних напружень за Качановим-Работновим;

– встановлено, що процес деформування матеріалу у межах напружень від 0 до границі текучості супроводжується накопиченням пошкоджень;

– визначені залежності, що пов'язують параметр пошкоджуваності на рівні границі текучості та критичне значення параметра пошкоджуваності матеріалу з характеристиками пластичності за умов статичного навантажування;

– вдосконалена феноменологічна модель Ж. Леметра, що описує процес накопичення пошкоджень в металевих конструкційних матеріалах;

- розроблена методика побудови повної кінетичної діаграми накопичення пошкоджень та вдосконалена методика визначення параметрів модифікованої феноменологічної моделі пошкоджуваності Ж. Леметра;

- отримано комплекс нових закономірностей накопичення пошкоджень за умов статичного та малоциклового навантажень для матеріалів Д16Т, 18Х2Н4ВА, 15ХСНД, 07Х16Н6, ВТ22, 12Х18Н10Т. Визначено їх ефективні механічні характеристики (за Качановим-Работновим).

Практичне значення одержаних результатів полягає у

- використанні розробленого інженерного методу для прогнозування ресурсу елементів конструкцій з урахуванням впливу пошкоджуваності за умов малоциклового навантаження;

- розробці методики визначення уточнених величин ефективних коефіцієнтів концентрації за напруженнями та деформаціями для умов статичного та малоциклового режимів навантаження;

- розробці та обґрунтуванні методики визначення ефективних параметрів зміцнення металевих конструкційних матеріалів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на 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 написаних у співавторстві здобувачеві належать проведення експериментальних досліджень, чисельний розрахунок конструктивних елементів, визначення ефективних коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій з урахуванням параметру пошкоджуваності матеріалу для випадків статичного та малоциклового навантаження, аналіз підходів щодо розрахунку параметра пошкоджуваності, визначення кінетики накопичення пошкоджень при статичному та малоцикловому навантаженні та розрахунок її критичних значень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися на міжнародних конференціях «Прогресивна техніка і технологія» (м. Севастополь, м. Київ, м. Одеса, 2006 – 2017), «Міжнародна науково-технічна конференція ІПМ» (м. Київ, 2007, 2010), Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2007, 2009, 2011, 2013, 2017), «І Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 90-річчю Національної академії наук України» (м. Львів, 2008) та «Современные проблемы машиноведения: международная научно-техническая конференция» (м. Гомель, 2012, 2014, 2016). Повністю робота доповідалась на засіданні кафедри ДММ та ОМ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 15 наукових працях, з них 9 статей у фахових виданнях (з яких 4 в українських виданнях, що входять до наукометричних баз даних, 1 стаття у іноземному виданні) та 6 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 5-ти додатків. Загальний обсяг дисертації становить 208 сторінок, у тому числі основного тексту дисертації 163 сторінки, 98 рисунків, 12-ть таблиць, список використаних джерел зі 158 найменувань на 16-ти сторінках, додатків на 12-ти сторінках, що містять 9 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначена актуальність теми дослідження, сформульовані мета та задачі дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження. Відмічена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами, апробації результатів, та публікацій за темою дисертаційної роботи з визначенням власного внеску автора.

У першому розділі проведено аналіз робіт, присвячених дослідженню явища малоциклової втоми. Розглянуто існуючі загальні підходи щодо описання процесів малоциклової втоми за допомогою моделі Мазінга, циклічної діаграми Морроу та узагальненої циклічної діаграми деформування. Вказані особливості їх застосування. Відмічено, що явище пружно-пластичного деформування конструкційного матеріалу супроводжується деградацією його фізико-механічних властивостей. Цей процес може бути врахований шляхом введення параметра пошкоджуваності, що був визначений в роботах Качанова Л.М. та Работнова Ю.М. наступним чином:

$$D = 1 - \frac{\tilde{F}}{F_0} \quad (1)$$

F_0 – загальна площа перерізу, \tilde{F} – ефективна площа перерізу, що безпосередньо несе навантаження та зменшена порівняно з F_0 на сумарну площу мікрodefektів. Були проаналізовані праці вітчизняних та зарубіжних вчених щодо подальшого дослідження явища пошкоджуваності та його впливу на поведінку матеріалу в умовах статичного та малоциклового навантаження. Відмічено, що на сьогодні можна виділити три найбільш загальні підходи щодо ідентифікації параметра пошкоджуваності: за характеристиками, що пов'язані з мікроструктурою матеріалу, за макрохарактеристиками матеріалу та на базі основних положень термодинаміки незворотніх процесів. Розглянуто основні методи розрахунку елементів конструкцій на малоциклову втому. Встановлено, що вони використовують характеристики матеріалу, отримані, як правило, з умовної діаграми деформування. Це свідчить про те що не враховуються реальні процеси деградації фізико-механічних властивостей конструкційного матеріалу протягом всього часу його навантажування (деформування). Таким чином виникає необхідність розробки адекватного підходу, щодо розрахунку елементів конструкцій по параметру малоциклової втоми з урахуванням пошкоджуваності з подальшою його експериментальною перевіркою.

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

У другому розділі наведена методика та програма досліджень з визначення основних механічних характеристик досліджуваних матеріалів. Представлено загальний опис стендів для проведення механічних випробувань матеріалів за умов статичного та циклічного навантаження. Для збільшення точності отриманих результатів та зменшення невизначеності вимірювань при визначенні параметра пошкоджуваності була перебудована та вдосконалена вимірювальна система за каналом виміру електроопору. У оновленому вигляді вона представляє собою

комплекс з можливістю зміни частоти обробки та отримання експериментальних даних. У загальному вигляді її представлено на рис. 1.

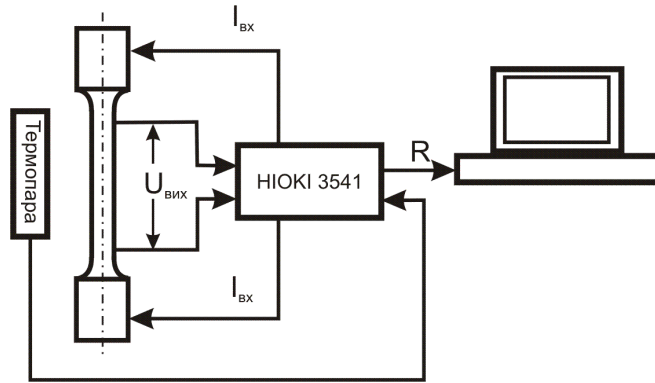


Рис. 1. Канал виміру електроопору зразка

Вимірювальна схема складається з мікроомметра НІОКІ 3541 (0-й клас точності, діапазон вимірювань $0,1\mu\Omega - 110\text{ M}\Omega$), спеціальних комутаційних кабелів низького опору з підвищеним захистом від електромагнітних впливів, відповідних елементів кріплення для фіксації на досліджуваному зразку, окремої плати з RS232-USB інтерфейсом, та промислової материнської плати.

Оновлена система дозволяє проводити вимірювання з врахуванням впливу температури зовнішнього середовища на величину електроопору. Розроблене відповідне програмне забезпечення для проведення експериментальних вимірів кінетики накопичення пошкоджень через зміну питомого електроопору при навантаженні зразка згідно залежності запропонованої Грабовським О.П.

$$D = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}, \quad (2)$$

де D – пошкоджуваність, $\Delta\rho = \rho_i - \rho_{i-1}$ – зміна величини питомого електроопору за заданий інтервал виміру, ρ_0 – початкове значення питомого електроопору зразка.

Експериментальні дослідження при статичному навантаженні проводилися для металевих матеріалів марок: 15ХСНД, 18Х2Н4ВА, 12Х18Н10Т, 07Х16Н6, ВТ22, Д16Т. Випробування на малоциклову втому проводилися для матеріалів 15ХСНД, 18Х2Н4ВА, ВТ22, Д16Т. Отримані за результатами експериментальних досліджень дані оброблялися за методиками математичної статистики. Визначені довірчі границі розподілу механічних характеристик матеріалів та коефіцієнти варіації.

У третьому розділі розглянуто вплив пошкоджуваності на діаграму деформування матеріалу та наведено результати розрахунку розподілу параметра пошкоджуваності в зоні концентраторів напружень. З урахуванням залежності (2) для металевих матеріалів, що досліджувались, були експериментально отримані криві накопичення пошкоджень при статичному навантаженні. Їх загальний вигляд наведено на рис. 2. Загалом вони характеризуються нелінійністю по всій довжині,

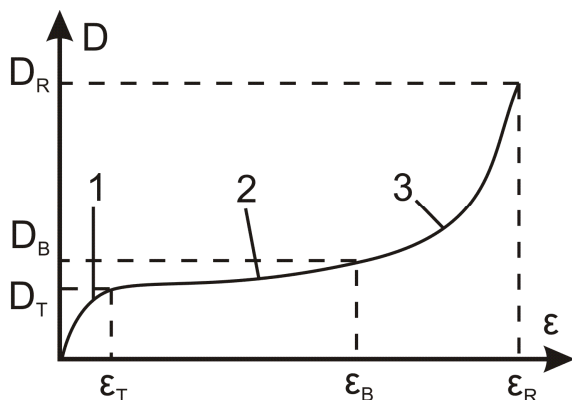


Рис. 2. Крива накопичення пошкоджень

але відповідно до отриманих експериментальних даних повну криву пошкоджуваності можна умовно розділити на три характерні ділянки. Перша ділянка характеризується значеннями деформації від нуля до величини, що приблизно дорівнює деформації границі пропорційності (текучості), тобто для цієї ділянки деформація є переважно пружною. Пошкоджуваність в рамках першої ділянки

відзначається різким зростанням до певної величини за досить невеликий відрізок часу. Для другої ділянки, яка займає більшу частину повної кривої пошкоджуваності, характерною є деяка нелінійність. Ця зона переважно відповідає пластичному деформуванню зразка до моменту шийкоутворення. Остання, третя ділянка кривої відповідає дуже швидкому наростанню величини накопиченої пошкоджуваності та співпадає з відрізком деформування зразка за границею міцності. Експериментальні початкові ділянки повної кривої пошкоджуваності представлені на рис.3.

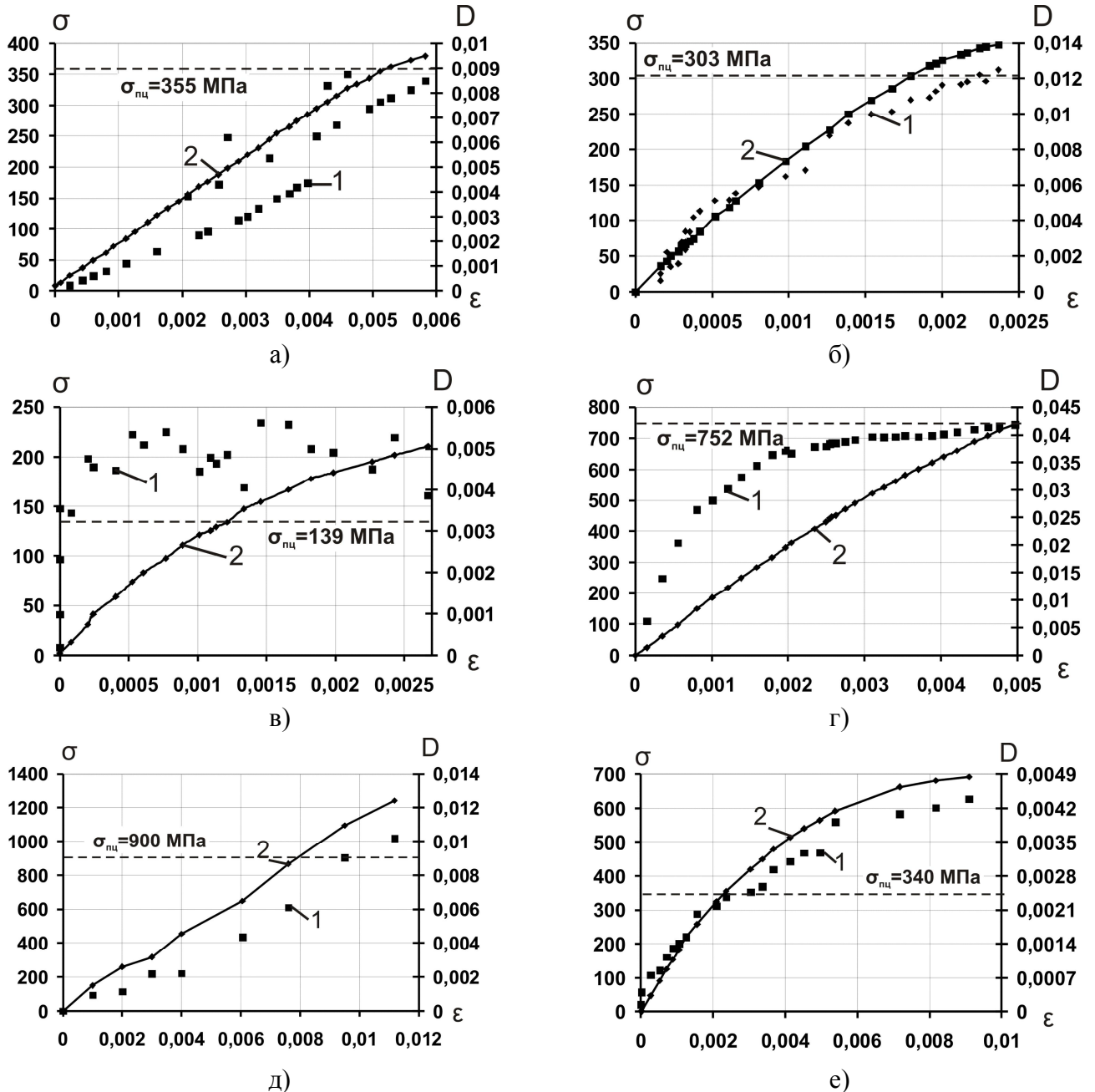


Рис. 3. Початкова ділянка кривої пошкоджуваності для: а) сплаву Д16Т, б) сталі 15ХСНД, в) сталі 12Х18Н10Т, г) сталі 18Х2Н4ВА, д) сплаву ВТ22, е) сталі 07Х16Н6, 1 – величина пошкоджуваності, 2 – діаграма деформування

Експериментально отримані величини пошкоджуваності на рівні границі текучості D_T та критичне значення пошкоджуваності, що відповідає моменту руйнування зразка D_R в залежності від характеристик пластичності матеріалу

(відносного залишкового видовження δ та відносного звуження в момент розриву ψ_R), наведені на рис. 4 та рис. 5.

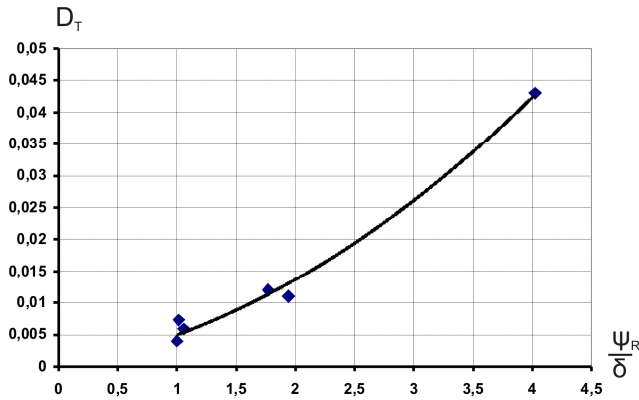


Рис. 4. Залежність параметру пошкоджуваності на рівні границі текучості від величини ψ_R / δ

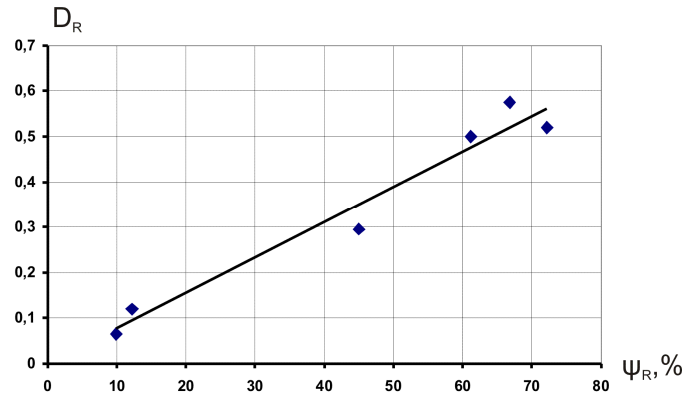


Рис. 5. Критичне значення параметру пошкоджуваності

Представлені на рис. 4 та рис. 5 залежності можуть бути записані у вигляді:

$$D_T = K_1 \cdot \left(\frac{\psi_R}{\delta} \right)^2 + K_2 \cdot \frac{\psi_R}{\delta}, \quad (3)$$

$$D_R = K_3 \cdot \psi_R, \quad (4)$$

де K_1 , K_2 та K_3 – деякі коефіцієнти, що відповідно до експериментальних результатів дорівнюють $K_1 = 19 \cdot 10^{-4}$, $K_2 = 31 \cdot 10^{-4}$, $K_3 = 78 \cdot 10^{-4}$.

Для описання другої ділянки повної кривої пошкоджуваності використовували модифіковану модель Ж. Леметра, що була отримана в КПІ ім. Ігоря Сікорського у вигляді:

$$\frac{dD}{dt} = \left[\frac{\sigma_i^2}{2E \cdot T_1} \left(\frac{2}{3}(1+\mu) \left(\chi + (1-\chi) \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)^2 + 3(1-2\mu) \cdot K_\sigma^2 \right) \right]^{T_2} \cdot \frac{d\varepsilon_i^{(p)}}{dt}, \quad (5)$$

де T_1 , T_2 – параметри матеріалу, μ – коефіцієнт Пуассона, E – модуль Юнга, χ – параметр критерію Писаренка-Лебедева для статичного навантажування, $K_\sigma = \sigma_0 / \sigma_i$ – параметр, що характеризує жорсткість навантаження. Тоді, якщо представити пластичну ділянку діаграми деформування згідно закону Рамберга-Осгуда у вигляді $\sigma_i = b(\varepsilon_i^{(p)})^m$, то після інтегрування (5) з урахуванням (3) можна отримати рівняння, що описує процес накопичення пошкоджень:

$$D_\Sigma = D_{nu} + \left[\frac{b^2}{2E \cdot T_1} \left(\frac{2}{3}(1+\mu) \left(\chi + (1-\chi) \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)^2 + 3(1-2\mu) \cdot K_\sigma^2 \right) \right]^{T_2} \cdot \frac{(\varepsilon^{(p)})^{T_3}}{T_3}, \quad (6)$$

або для випадку простого розтягування:

$$D_\Sigma = D_{nu} + \left[\frac{b^2}{2E \cdot T_1} \right]^{T_2} \cdot \frac{(\varepsilon^{(p)})^{T_3}}{T_3}. \quad (7)$$

де D_{nu} – величина пошкоджуваності на рівні границі пропорційності, що дорівнює 0,8-0,9 від величини D_T , $T_3 = 2m \cdot T_2 + 1$. Експериментально визначені параметри моделі (7) наведено у таблиці 1.

Параметри феноменологічної моделі накопичення пошкоджень

Матеріал	T_1	T_2
Д16Т	2,0	4,0
18Х2Н4ВА	4,8	3,8
15ХСНД	2,1	1,6
12Х18Н10Т	27,0	1,1
ВТ22	10,6	13,5
07Х16Н6	5,0	2,2

Відповідно до проведених експериментів для матеріалів, що досліджувались, була отримана наступна лінійна залежність, за допомогою якої у першому наближенні може бути описана третя ділянка повної кривої пошкоджуваності:

$$(D - D_B) = \frac{c_1 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_B)}{\delta^{c_2}}, \quad (8)$$

де D_B та ε_B – параметр пошкоджуваності та деформація на рівні границі міцності, $c_2 = 0.37$, $c_1 = 2$. Наближено величину D_B можна визначити з рівняння (7). Таким чином, у загальному випадку повна крива пошкоджуваності при розтягуванні може бути повністю описана за допомогою виразів (7) та (8).

На прикладі корсетних зразків зі сталі 07Х16Н6 було здійснено порівняння результатів розрахунку пошкоджуваності згідно (6) з її експериментальними величинами згідно (2). Корсетна частина різного радіусу дала змогу змодельовати різні випадки напруженого стану. Разом з експериментом у скінченно-елементному пакеті ANSYS проводилося чисельне моделювання процесу навантаження вказаних зразків. Модель пошкоджуваності у вигляді (6) була введена у чисельний розрахунок за допомогою підпрограми користувача, в результаті чого були отримані поля розподілу пошкоджень у найбільш небезпечній зоні зразка. Граничним станом при чисельному розрахунку вважався стан, при якому максимальне напруження у зразку досягало величини границі міцності. Експериментальне визначення пошкоджуваності за залежністю (2) здійснювалося з урахуванням зміни профілю кільцевої проточки (рис. 6). Виходячи з результатів чисельного експерименту

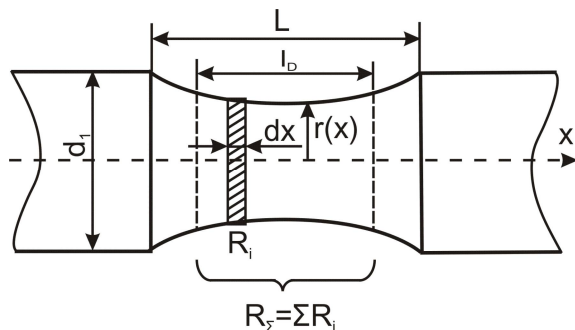


Рис. 6. Апроксимація кільцевої проточки зразка

вважалося, що при пружно-пластичній деформації зразка небезпечна зона, якій відповідає процес найбільш інтенсивного накопичення пошкоджень, знаходиться в центральній частині кільцевої проточки. Поточна величина питомого електричного опору у цій зоні розраховувалася як:

$$\rho_i = R_\Sigma / \left(\int_0^{l_D} \frac{dx}{\pi \cdot [r(x)]^2} \right), \quad (9)$$

де l_D – ширина зони кільцевої проточки, що відповідає найбільш інтенсивному процесу накопичення мікропошкоджень, $r(x)$ – поточний радіус перерізу кільцевої

проточки. Встановлено, що довжина l_D змінюється від 0 до $0.8L$ у діапазоні напружень від 0 до границі міцності. У першому наближенні прийнято припущення про лінійну залежність l_D від поточної величини максимальних напружень у корсетній частині. Профіль проточки апроксимувався за допомогою метода найменших квадратів за кількістю точок на весь профіль не меншою ніж 20.

Порівняння отриманих результатів продемонструвало, що співвідношення між розрахунковими D (згідно залежності (6)) та експериментальними D_p (згідно підходу (2)) величинами параметра пошкоджуваності залежить від виду напруженого стану та може бути описане залежністю $D_p = 0.9 \cdot D \cdot (\alpha_\sigma)^{-1.5}$, де α_σ – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень. Вона дозволяє використовуючи (2) розраховувати величину параметра пошкоджуваності у найбільш небезпечній точці для випадку неоднорідного напруженого стану.

З використанням залежності (6) методом чисельного моделювання були отримані поля розподілу пошкоджуваності для типових конструктивних елементів у вигляді пластинки з отвором та кільцевої проточки, розрахункові схеми яких наведено на рис. 7 та рис. 8. Діаметри отворів були прийняті рівними 3мм, 5мм, 10мм, 15мм. Розміри кільцевої проточки – $60^\circ \times 2,5$ мм, $50^\circ \times 1,3$ мм, $40^\circ \times 0,6$ мм

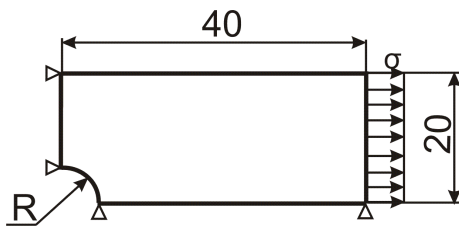


Рис. 7 Розрахункова модель пластинки з отвором

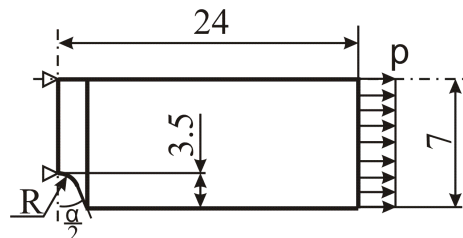


Рис. 8. Розрахункова модель циліндра з кільцевою проточною

Приклади розрахунку полів пошкоджень для пластинки з отвором та зразка з кільцевою проточною, виготовлених зі сталі 15ХСНД, наведено на рис. 9 та рис. 10.

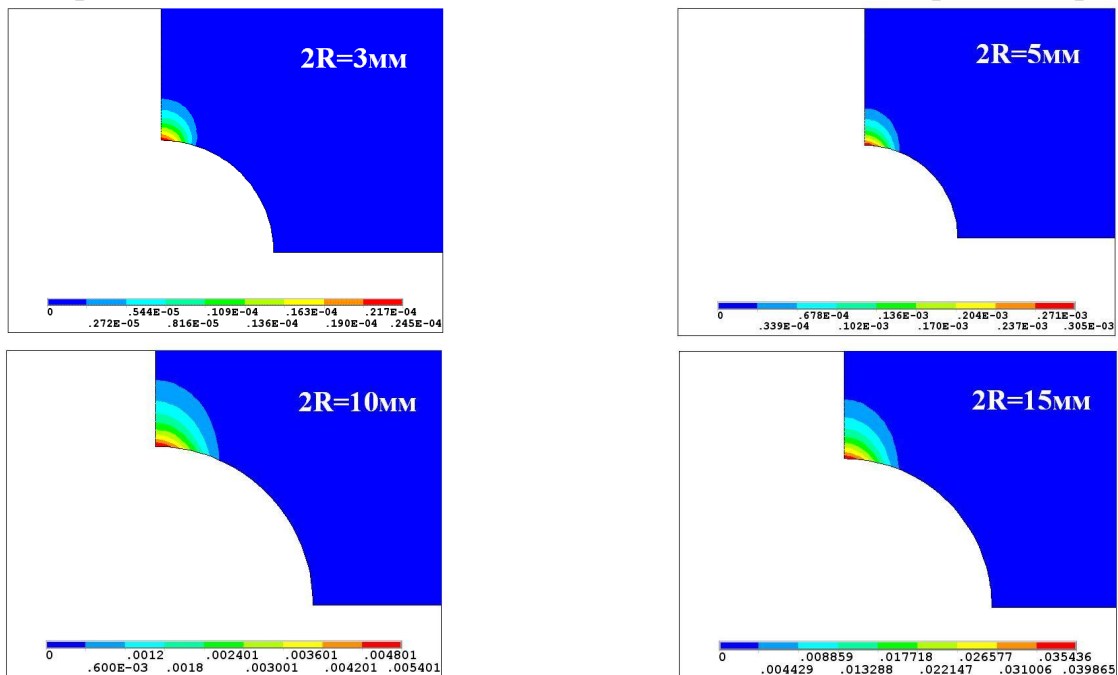


Рис. 9. Результати чисельного розрахунку пластинки з отвором різного діаметру для сталі 15ХСНД (зовнішнє навантаження 280 МПа)

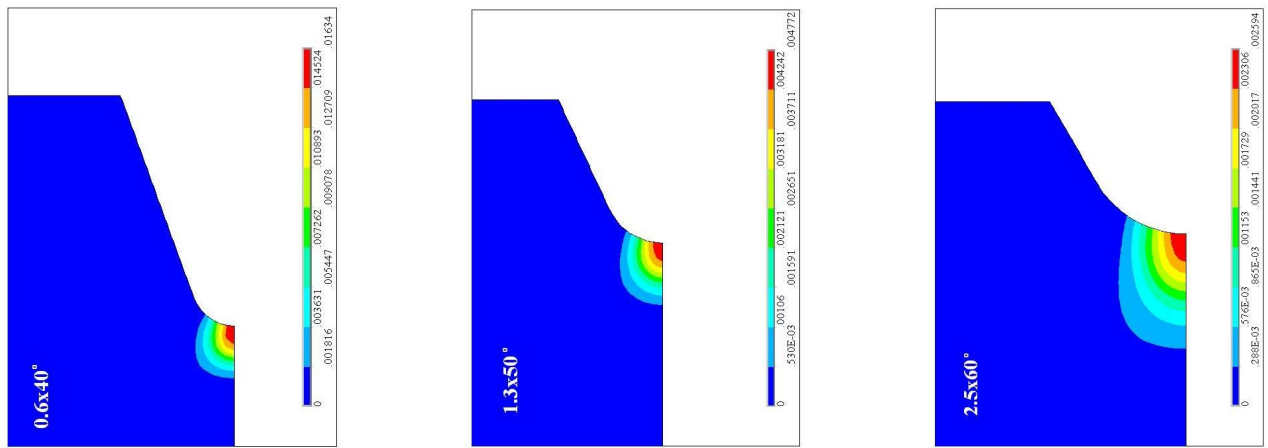


Рис. 10. Результати чисельного розрахунку циліндра з кільцевою проточною для сталі 15XCHD (зовнішнє навантаження 250 МПа)

За результатами чисельного моделювання був зроблений висновок, що незалежно від того, з якого матеріалу виготовлялася пластина з отвором: зі збільшенням діаметру отвору відбувається зростання зони пошкоджуваності у околі концентратора та збільшення її максимального значення, яке відповідає найбільш небезпечній точці на контурі отвору. Слід зауважити, що дана тенденція зберігається для будь-якого значення зовнішнього прикладеного навантаження.

Для зразка з кільцевою проточною можна стверджувати, що для всіх розглянутих матеріалів зі збільшенням теоретичного коефіцієнта концентрації напружень відбувається збільшення максимального значення величини пошкоджуваності у найбільш небезпечній точці та зменшення зони його розподілу в околі концентратора напружень.

Аналітично вплив концентрації напружень на величину максимальних напружень можна оцінити за допомогою метода Махутова-Нейбера, що дозволяє визначити максимальні напруження і деформації в околі концентратора за результатами пружного розрахунку і враховує вигляд діаграми деформування матеріалу. В роботі розглянуто модифікацію цього метода з метою врахування явища пошкоджуваності. Для цього запропоновано ввести у розгляд ефективні напруження згідно концепції Качанова Л.М. та Работнова Ю.Н.. З цієї точки зору ефективні напруження σ_{ef} , що виникають у матеріалі за умов одновісного розтягу та враховують вплив пошкоджуваності, можна представити у вигляді:

$$\sigma_{ef} = \frac{\sigma_0}{1-D}, \quad (10)$$

де σ_0 – дійсні напруження, що враховують зміну поперечного перерізу зрака. Тоді ефективна діаграма деформування може бути отримана шляхом проведення простого експерименту на розтяг з урахуванням залежностей (7) та (10).

Розглянемо апроксимацію діаграми деформування матеріалу в пружно-пластичній області у відносних величинах:

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}^m & \text{для } \sigma > \sigma_T, \\ \bar{\varepsilon} & \text{для } \sigma < \sigma_T, \end{cases} \quad (11)$$

де $\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_T$, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_T$, а σ_T та ε_T – величини напружень та деформацій, які відповідають напруженню та деформації границі текучості (пропорційності),

відповідно. Ввівши у розгляд умовні ($\sigma_y = P/F_0$, де F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка) та дійсні ($\sigma_\delta = P/F_\delta$, де F_δ – поточна площа поперечного перерізу зразка) напруження можна отримати наступні залежності, що пов’язують коефіцієнти зміцнення діаграм деформування:

$$\begin{cases} \bar{m}_{ef} = \bar{m}_d + \log_{\bar{\varepsilon}} \left(\frac{1-D_T}{1-D} \right) \\ \bar{m}_{ef} = \bar{m}_y + \log_{\bar{\varepsilon}} \left(\frac{1-D_T}{1-D} \right) + \log_{\bar{\varepsilon}} \left(\frac{1-\psi_T}{1-\psi(\varepsilon)} \right) \end{cases} \quad (12)$$

де \bar{m}_{ef} , \bar{m}_δ та \bar{m}_y – коефіцієнти зміцнення ефективної, дійсної та умовної діаграми деформування.

Якщо у першому наближенні, прийняти рівним нулю величину відносного поперечного звуження та пошкоджуваності на рівні границі текучості та за допомогою (7) визначити величину пошкоджуваності на рівні границі міцності D_B , якій відповідає відносна деформація $\bar{\varepsilon}_B$, то можна отримати:

$$\begin{cases} \bar{m}_{ef} = \bar{m}_d - \log_{\bar{\varepsilon}_B} (1-D_B) \\ \bar{m}_{ef} = \bar{m}_y - \log_{\bar{\varepsilon}_B} (1-D_B) - \log_{\bar{\varepsilon}_B} (1-\psi_B) \end{cases} \quad (13)$$

Похибка визначення ефективних коефіцієнтів зміцнення за відомими коефіцієнтами зміцнення дійсної та умовної діаграм деформування згідно залежностей (12) не перевищила 2%. У випадку використання наближених залежностей (13) для відомого дійсного коефіцієнту зміцнення максимальна похибка становить 7%, а для розрахунків за умовним коефіцієнтом зміцнення – 15%. Таким чином, ефективна діаграма деформування може бути наближено побудована шляхом застосування виразів (11)-(13) з використанням (3) для розрахунку ефективної величини границі текучості.

Враховуючи одержані залежності для визначення коефіцієнтів зміцнення у вигляді (12) або (13), метод розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій Махутова-Нейбера, з урахуванням ефективної діаграми деформування, матиме вигляд:

$$\text{для } (\bar{\sigma}_{ef})_n \leq 1: \quad (K_{ef})_\varepsilon = \frac{\alpha_\sigma^{\frac{2}{1+\bar{m}_{ef}}} (\bar{\sigma}_{ef})_n^{\frac{1-\bar{m}_{ef}}{1+\bar{m}_{ef}}}}{(\alpha_\sigma \cdot (\bar{\sigma}_{ef})_n)^{n(1-\bar{m}_{ef})} \left[1 - ((\bar{\sigma}_{ef})_n - \frac{1}{\alpha_\sigma}) \right] / (1+\bar{m}_{ef})}, \quad (14)$$

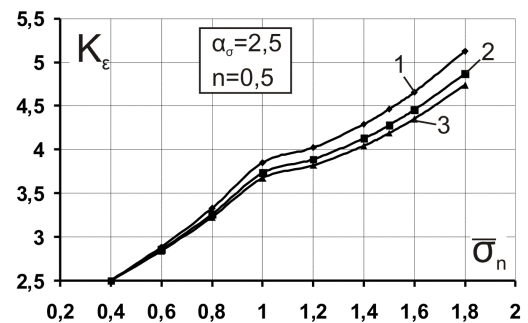
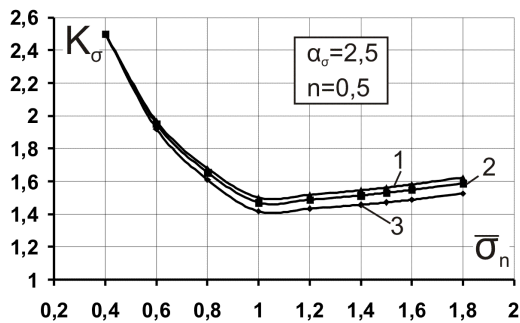
$$(K_{ef})_\sigma = \frac{\alpha_\sigma^{\frac{2\bar{m}_{ef}}{1+\bar{m}_{ef}}}}{(\bar{\sigma}_{ef})_n^{\frac{1-\bar{m}_{ef}}{1+\bar{m}_{ef}}} (\alpha_\sigma \cdot (\bar{\sigma}_{ef})_n)^{\bar{m}_{ef}n(1-\bar{m}_{ef})} \left[1 - ((\bar{\sigma}_{ef})_n - \frac{1}{\alpha_\sigma}) \right] / (1+\bar{m}_{ef})}, \quad (15)$$

$$\text{для } (\bar{\sigma}_{ef})_n \geq 1: \quad (K_{ef})_\varepsilon = \frac{\alpha_\sigma^{\frac{2\bar{m}_{ef}}{1+\bar{m}_{ef}}}}{(\alpha_\sigma \cdot (\bar{\sigma}_{ef})_n)^{n(1-\bar{m}_{ef})} \left[1 - ((\bar{\sigma}_{ef})_n - \frac{1}{\alpha_\sigma}) \right] / (1+\bar{m}_{ef})}, \quad (16)$$

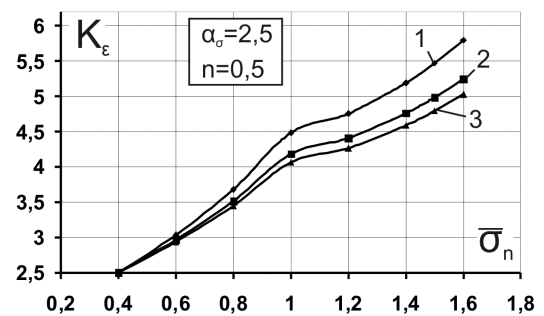
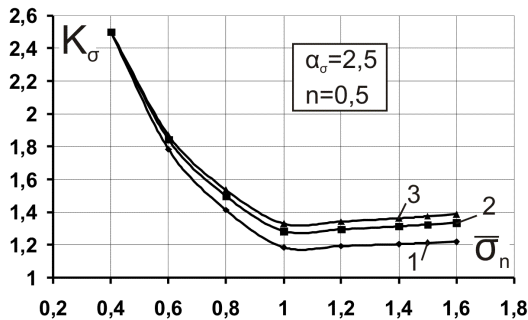
$$(K_{ef})_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}^{\frac{2\bar{m}_{ef}}{1+\bar{m}_{ef}}}}{(\alpha_{\sigma} \cdot (\bar{\sigma}_{ef})_n)^{\bar{m}_{ef}n(1-\bar{m}_{ef})} \left[1 - \left((\bar{\sigma}_{ef})_n - \frac{1}{\alpha_{\sigma}} \right) \right] / (1+\bar{m}_{ef})}}, \quad (17)$$

де n – параметр, що у більшості випадків приймається рівним 0,5, $(\bar{\sigma}_{ef})_n = \sigma_n / (\sigma_{ef})_T$, $(\sigma_{ef})_T$ – ефективне напруження на рівні границі текучості (пропорційності) в залежності від методу апроксимації діаграми деформування, σ_n – номінальне напруження, визначене з пружного розрахунку для концентратора напружень.

Приклад порівняння результатів розрахунку ефективних коефіцієнтів концентрації за модифікованим і стандартним підходом для крихкого сплаву ВТ22 та пластичної сталі 18Х2Н4ВА наведено на рис. 13 та рис. 14. При визначенні величин коефіцієнтів концентрації за дійсною та умовною діаграмою деформування у залежностях (14) – (17) замість ефективних коефіцієнтів зміцнення \bar{m}_{ef} та ефективних номінальних напружень $(\bar{\sigma}_{ef})_n$ використовувались їх дійсні або умовні значення відповідно.



а)



б)

Рис. 13. Залежності коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій від величини номінального напруження для матеріалів 18Х2Н4ВА (а), ВТ22 (б), де розрахунок за діаграмою: 1 – умовною, 2 – дійсною, 3 – ефективною

Згідно результатів розрахунків при фіксованому значенні теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_{σ} для всіх розглянутих у роботі матеріалів можна відмітити наступне: порівняно з умовним розрахунком величини коефіцієнтів концентрації напружень, отримані з використанням ефективної діаграми деформування, демонструють більш високі значення. При цьому найбільші відхилення спостерігаються у діапазоні напружень, які більші за границю текучості (пропорційності). Результати розрахунків показали, що ця різниця може становити

до 14%. Коефіцієнти концентрації деформацій, визначені на основі ефективної діаграми деформування, демонструють нижчі значення, порівняно з умовним розрахунком, їх найбільша різниця між ефективним та умовним значенням аналогічно спостерігається у діапазоні після границі текучості (пропорційності) та може досягати 15%.

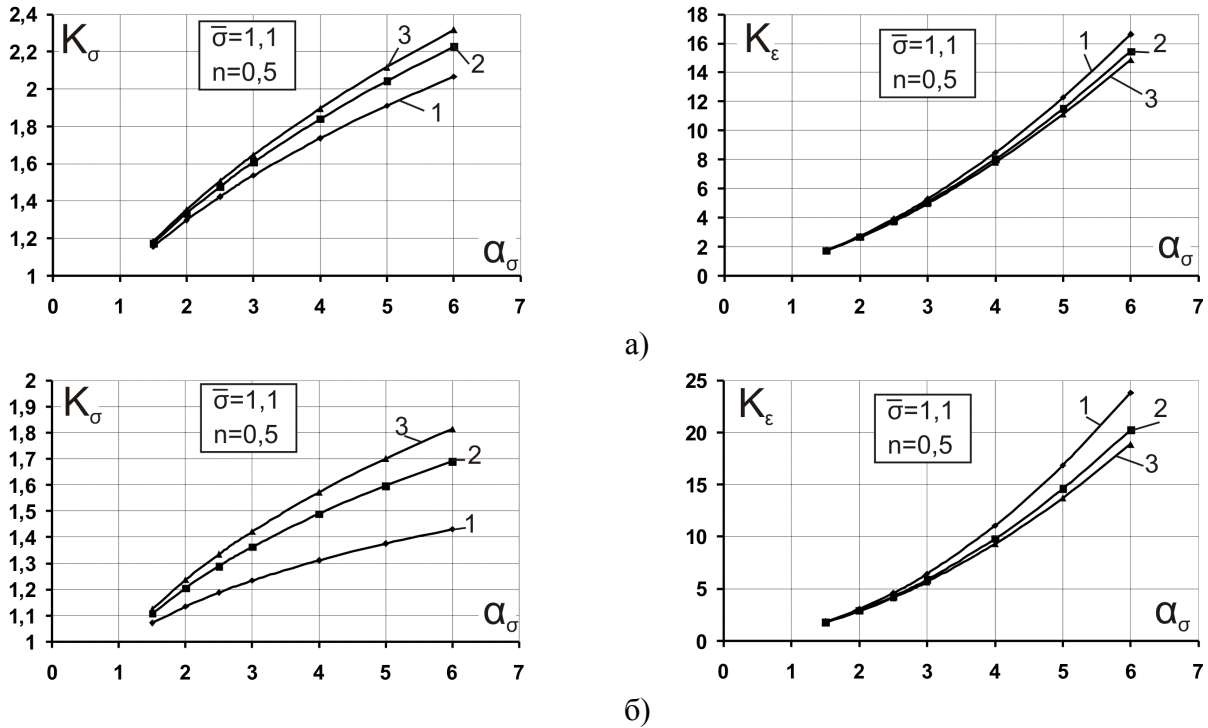


Рис. 14. Залежності коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій від величини α_σ для матеріалів 18X2H4BA (а), VT22 (б), де розрахунок за діаграмою: 1 – умовною, 2 – дійсною, 3 – ефективною

Для випадку фіксованого значення відносного номінального напруження $\bar{\sigma}_n$ можна зробити висновок, що зі збільшенням теоретичного коефіцієнта концентрації напружень вплив пошкоджуваності на значення коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій зростає. Причому, аналогічно з попередніми результатами врахування параметру пошкоджуваності через ефективну діаграму деформування призводить до зростання коефіцієнта концентрації напружень та зменшення коефіцієнта концентрації деформацій.

Четвертий розділ присвячений дослідженням процесу кінетики накопичення пошкоджень в матеріалі та розробці методу оцінки довговічності для умов малоциклового навантаження за симетричного м'якого циклу ($r_\sigma = -1$). При розробці методу було розглянуто два підходи.

Підхід, що базується на використанні параметра пошкоджуваності.

Була застосована залежність, що дозволяє оцінити величину пошкоджень в матеріалі шляхом аналізу зміни модуля пружності. Параметр пошкоджуваності для додатнього напівцикла може бути розрахований згідно формули (Ж.Леметр, N.Bonora, C.Chow та ін.):

$$D^+ = 1 - \frac{E_i^+}{E_0}. \quad (18)$$

Величина E_i^+ відповідає модулю розвантаження в додатньому напівциклі, E_0 – початковий модуль пружності для нульового напівциклу. Експериментальні криві накопичення пошкоджень для сплаву Д16Т та сталі 15ХСНД, що відповідають додатньому напівциклу навантаження (частота навантаження 3 Гц) в залежності від амплітуди навантаження наведені на рис. 15 та рис. 16. Відповідно до проведених експериментальних досліджень встановлено, що для сплаву Д16Т характерним є стан циклічного зміцнення, а для сталі 15ХСНД – циклічної стабілізації.

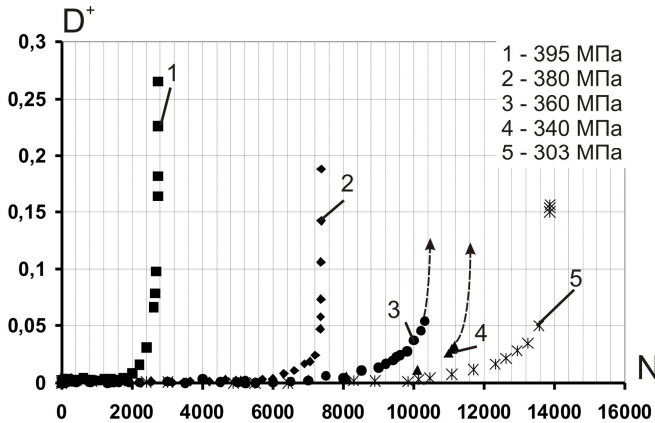


Рис. 15 Залежність D^+ від кількості циклів навантаження для сплаву Д16Т

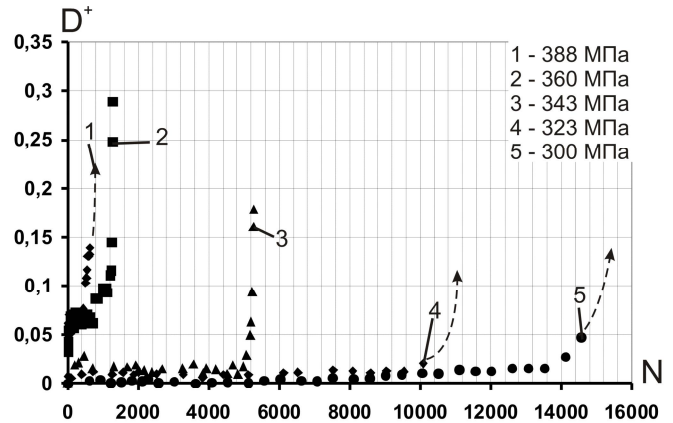


Рис. 16. Залежність D^+ від кількості циклів навантаження для сталі 15ХСНД

Згідно рис. 15 та рис. 16, можна зробити висновок, що крива накопичення пошкоджень у випадку малоциклового навантаження, так само як і у випадку статичного навантаження, має три ділянки: перша ділянка характеризується стрімким зростанням параметру пошкоджуваності до деякої величини. Для другої ділянки характерним є порівняно незначна зміна величини параметру пошкодження протягом деякого часу навантаження та його майже лінійна залежність від кількості циклів до руйнування. Третя ділянка має переважно нелінійний характер та характеризується різким збільшенням швидкості процесу накопичення пошкоджень, триває до самого руйнування зразка. Графічно це можна зобразити як показано на рисунку 17.

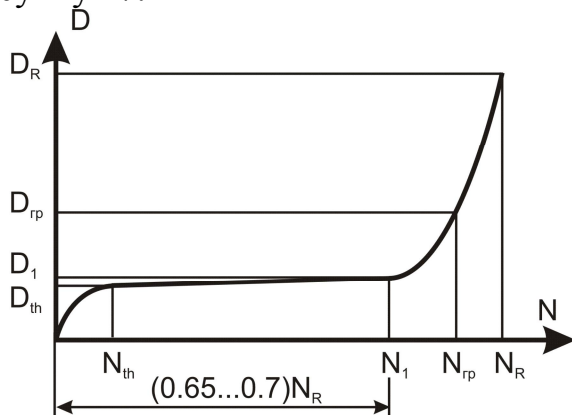


Рис. 17. Залежність величини D^+ від кількості циклів навантаження

На основі проведених експериментів було встановлено, що величина N_1 для матеріалів, що досліджувалися, становить близько 0,65-0,7 від граничної кількості циклів до руйнування N_R . Крім цього слід зауважити, що для всіх розглянутих в роботі металевих матеріалів має місце процес порівняно стрімкого зростання величини пошкоджуваності від 0 до деякого значення D_{th} протягом початкових циклів навантаження.

У матеріалах, що досліджувалися, величини D_{th} та D_1 відрізнялися не більше ніж в 2-3 рази. Оскільки на ділянці, що відповідає циклам навантаження від N_1 до N_R безпосередньо перед руйнуванням зразка спостерігалась нестійка поведінка петлі

пружно-пластичного гістерезису, пов'язана з процесами виникнення макротріщини та її росту, у якості критичного приймалося граничне значення параметра пошкоджуваності D_{ep} , що фіксувалося за останнім стійким циклом.

За результатами експериментальних досліджень були визначені залежності, що пов'язують характерні величини параметра пошкоджуваності (рис. 17) з амплітудою та кількістю циклів до руйнування.

Встановлено, що параметри D_{th} та D_{ep} нелінійно залежать від амплітуди навантаження та кількості циклів до руйнування. Аналітично це можна представити у наступному вигляді:

$$D_{ep} = H_1 \cdot (N_R)^{H_2}, \quad (19)$$

$$\ln(D_{th}) = H_5 + H_4 \cdot \ln(\sigma_a), \quad (20)$$

де H_1 , H_2 , H_4 , H_5 – константи матеріалу, що визначаються з експерименту на малоциклово втому.

Крім цього було встановлено, що параметри D_{th} та D_{ep} пов'язані між собою залежністю, що близька до лінійної:

$$D_{ep} = H_6 \cdot D_{th}, \quad (21)$$

де H_6 – константа матеріалу.

Експериментально отримані значення вищевказаних констант для матеріалів, що досліджувались, наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри матеріалів

Матеріал	H_1	H_2	H_4	H_5	H_6
Д16Т	34,15	-0,60	4,23	-31,14	81,70
15ХСНД	762,40	-1,10	13,42	-82,20	9,51
ВТ 22	14,75	-0,75	4,23	-34,54	6,21

Розв'язок системи рівнянь (19) – (21) дає можливість визначити кількість циклів до руйнування в залежності від амплітуди навантаження.

Підхід, що базується на використанні ефективної діаграми деформування.

Проаналізовано енергетичне підґрунтя процесу пружно-пластичного деформування матеріалу під дією зовнішнього навантаження.

Аналогічно (18), для від'ємного напівциклу навантаження може бути введений параметр пошкоджуваності D^- , що характеризується зміною модуля пружності при розвантаженні E_i^- у від'ємному напівциклі.

Параметр заліковування при симетричному циклі навантаження може бути визначений аналогічно роботам Ж. Леметра, та ін.:

$$h = \frac{E_0 - E^+}{E_0 - E^-}. \quad (22)$$

Тоді величина пошкоджуваності у від'ємному напівциклі запишеться як (Ж. Леметр):

$$D^- = h \cdot D^+. \quad (23)$$

Величини параметра заліковування для металевих матеріалів, що досліджувались при симетричному циклі та м'якому режимі навантаження, наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Параметр заліковування

Матеріал	Д16Т	18Х2Н4ВА	15ХСНД	ВТ22
h	0,32	0,51	0,70	0,46

Явище руйнування матеріалу може бути охарактеризоване за допомогою поглинутої механічної енергії, яка визначається за відповідною площею діаграми деформування. Тоді, виходячи з гіпотези ефективних напружень (10), механічна енергія, що відповідає за пошкодження матеріалу W^D , може бути визначена за різницею площ під ефективною та дійсною діаграмами деформування (рис. 18) та, відповідно, описана залежністю:

$$W^D = W^{ef} - W^d = \frac{1}{2} \Delta \sigma_T \cdot \varepsilon_T + \int_{\varepsilon_T}^{\varepsilon_R} \Delta \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = W_e + W_p. \quad (24)$$

Аналогічно, може бути розглянута петля пружно-пластичного гістерезису при симетричному циклі навантаження (рис. 19).

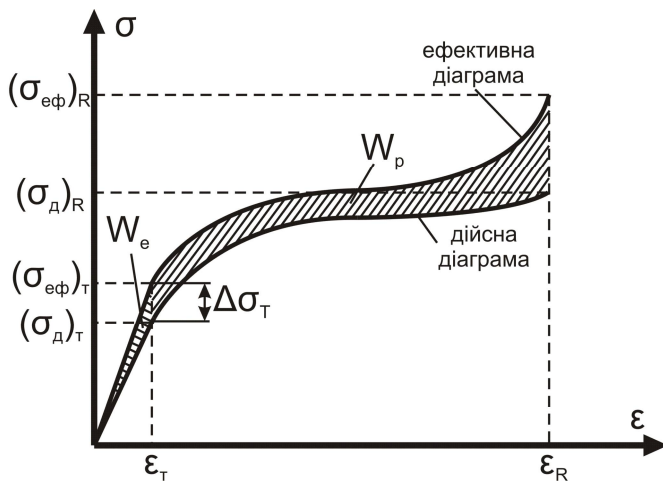


Рис. 18. До отримання W^D з ефективної та дійсної діаграм деформування

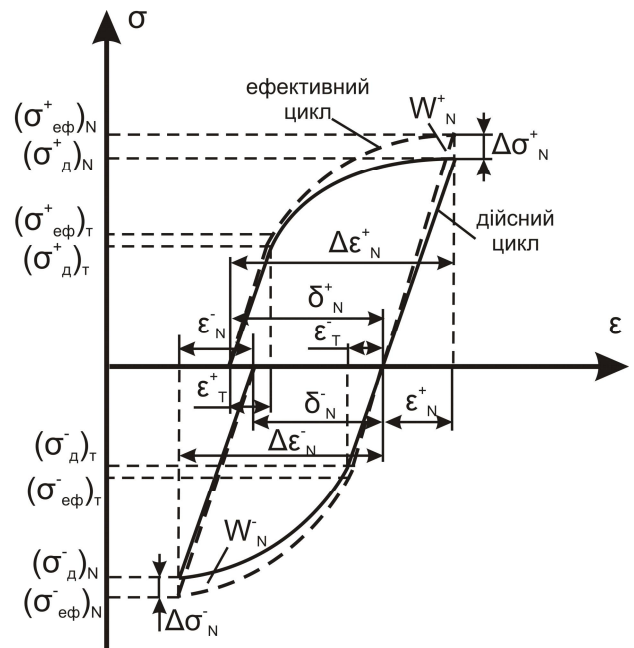


Рис. 19. Пружно-пластичний гістерезис при симетричному циклі навантаження

Загальна енергія, яка характеризує цикл навантаження, може бути розділена на дві складові: енергія за додатній напівцикл (25) та енергія за від'ємний напівцикл навантаження (26), що визначаються за різницею площ ефективного та дійсного напівциклів:

$$W_N^+ = \frac{\Delta \sigma_T^+ \cdot \varepsilon_T^+}{2} + \int_{\varepsilon_T^+}^{\varepsilon_N^+} \Delta \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{\Delta \sigma^+ \cdot \varepsilon_N^+}{2}, \quad (25)$$

$$W_N^- = \frac{\Delta \sigma_T^- \cdot \varepsilon_T^-}{2} + \int_{\varepsilon_T^-}^{\varepsilon_N^-} \Delta \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{\Delta \sigma^- \cdot \varepsilon_N^-}{2}. \quad (26)$$

Параметр пошкоджуваності при визначенні ефективного від'ємного напівциклу навантаження визначався з урахуванням (22) та (23). Величини ефективних напружень у додатньому та від'ємному напівциклах розраховувались згідно (10).

Тоді повна енергія, що відповідає за накопичення пошкоджень у циклі, дорівнює:

$$W_N^{\Sigma} = W_N^{+} + W_N^{-}. \quad (27)$$

В цьому випадку кількість циклів до руйнування може бути розрахована як:

$$N_R = \frac{W_D}{g(f(\sigma, \varepsilon); R_{\sigma}) \cdot W_{N_{CT}}^{\Sigma}}, \quad (28)$$

де $W_{N_{CT}}^{\Sigma}$ – енергія стабілізованого (умовно стабілізованого) циклу згідно (27), $g(f(\sigma, \varepsilon); R_{\sigma})$ – функція, що залежить від матеріалу, виду напруженого стану.

Для матеріалів, що досліджувались для випадку наявності стану циклічного зміцнення або циклічного знеміцнення умовно стабілізований цикл навантаження приймався на рівні 10% від N_R . За результатами експериментальних досліджень для гладких зразків було встановлено, що функція $g(f(\sigma, \varepsilon); R_{\sigma})$ є сталою величиною, значення якої наведено у таблиці 4

Таблиця 4

Значення функції $g(f(\sigma, \varepsilon); R_{\sigma})$ ($\alpha_{\sigma} = 1$, $r_{\sigma} = -1$)

Матеріал	Д16Т	18Х2Н4ВА	15ХСНД	ВТ22
$g(r_{\sigma}; f(\sigma, \varepsilon); R_{\sigma})$	1,0	2,8	0,2	0,7

Порівняння результатів розрахунку довговічності згідно залежностей (19)-(21) та (28) наведено на рис. 20 та рис. 21.

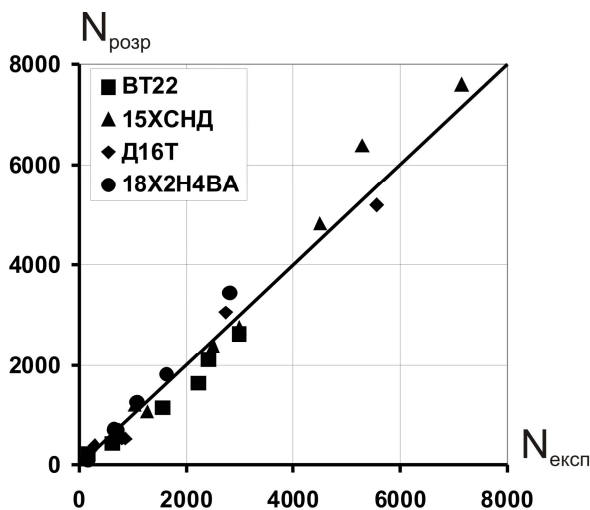


Рис. 20. Порівняння результатів розрахунку згідно залежності (28) з експериментальними значеннями

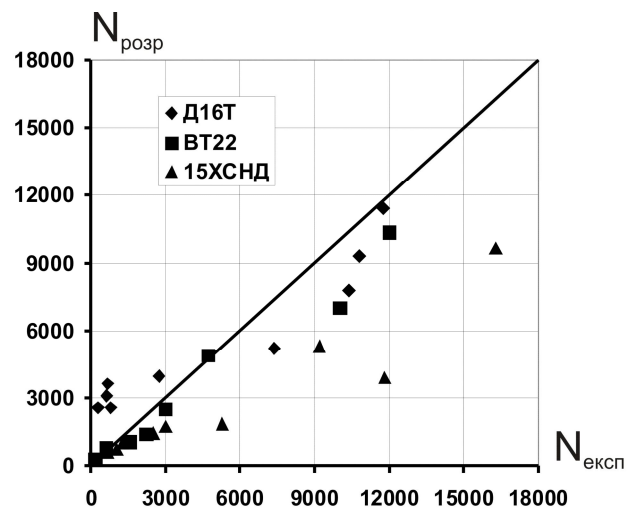


Рис. 21. Порівняння результатів розрахунку згідно залежностей (19)-(21) з експериментальними значеннями

Відносна розрахункова похибка згідно рівнянь (19)-(21) для розглянутих матеріалів становить 30-65%, при цьому у діапазоні до 1000 циклів для сплаву Д16Т розрахункова кількість циклів може бути у 3 рази більша за її експериментальне значення. Окрім цього, як видно з рис. 21, для розрахункових величин циклів характерним є досить суттєвий розкид. При застосуванні залежності (28) відносна розрахункова похибка лежить у діапазоні від 15% до 35%, розкид одержаних величин

циклів при цьому є меншим ніж у попередньому випадку. Отже, використання системи аналітичних рівнянь (19)-(21) при визначенні довговічності зразка призводить, порівняно з (28), до більших похибок. Таким чином у подальшому розглядався лише енергетичний підхід щодо визначення довговічності.

Для випадку розрахунку елементів конструкцій за наявності концентраторів напружень, була використана крива циклічного деформування у відносних координатах, запропонована Серенсеном С.В. та Шнейдеровичем Р.М. у вигляді:

$$\bar{S} = \bar{E}^{\bar{m}(k)}, \quad \bar{S} = S / \sigma_T, \quad \bar{E} = E / \varepsilon_T, \quad (29)$$

$$\bar{m}(k) = \lg(\bar{\varepsilon}^{(0)})^{\bar{m}} / \lg\left((\bar{\varepsilon}^{(0)})^{\bar{m}} + \frac{A}{2}(\bar{\varepsilon}^{(0)} - 1)\Phi(k)\right), \quad (30)$$

де $\bar{\varepsilon}^{(0)} = \varepsilon^{(0)} / \varepsilon_T$ – відносна деформація нульового напівциклу, $\Phi(k)$ – функція, що враховує циклічний стан матеріалу, A – циклічна константа.

В цьому випадку, при визначенні максимальних величин напружень та деформацій у циклі навантаження повинні бути застосовані циклічні коефіцієнти концентрації напружень та деформацій (за Махутовим М.А.), що можуть бути знайдені за формулами (14)-(17) шляхом заміни у них величин σ на S , та \bar{m} на $\bar{m}(k)$. Максимальні напруження та деформації у координатах $\bar{S}-\bar{E}$ запишуться у вигляді: $\bar{S}_{\max}^{(k)} = \bar{S}_n K_S^{(k)}$ та $\bar{E}_{\max}^{(k)} = \bar{E}_n K_E^{(k)}$, де $\bar{S}_n = (2\bar{\sigma}_n) / \bar{S}_T^{(k)}$, $K_S^{(k)}$ та $K_E^{(k)}$ – циклічні коефіцієнти концентрації напружень та деформацій, $\bar{E}_n = (2\bar{\varepsilon}_n) / \bar{E}_T^{(k)}$, $\bar{S}_T^{(k)}$, $\bar{E}_T^{(k)}$ – циклічна границя текучості та деформація, що їй відповідає. Напруження у напівциклах навантаження у координатах $\sigma - \varepsilon$ можуть бути знайдені згідно:

$$\begin{cases} \sigma_{\max}^{(k)} = \sigma_{\max}^{(k-1)} + (-1)^k S_{\max}^{(k)} \\ \varepsilon_{\max}^{(k)} = \varepsilon_{\max}^{(k-1)} + (-1)^k E_{\max}^{(k)} \end{cases} \quad (31)$$

Введення у розгляд циклічної діаграми деформування, використання циклічних коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій та залежності (31) дають можливість визначити енергію, що відповідає за накопичення пошкоджень у напівциклах навантаження згідно залежностей (25)-(27).

Для перевірки можливості застосування запропонованого підходу були проведені випробування за наявності концентратора напружень. Розглянуто циклічне навантаження циліндричного зразка діаметром 7 мм з кільцевою проточкою радіусом 1 мм. Результати розрахунку та експериментів показали, що функція $g(f(\sigma, \varepsilon); R_\sigma)$ в цьому випадку залежить від кількості циклів навантаження. В роботі запропонована її ступенева апроксимація у вигляді залежності $g(f(\sigma, \varepsilon); R_\sigma) = M_1 N_R^{M_2}$, де M_1 та M_2 – константи матеріалу, величини яких для матеріалів, що досліджувалися, були експериментально встановлені та наведені у таблиці 5.

Таблиця 5

Коефіцієнти функції $g(f(\sigma, \varepsilon); R_\sigma)$ для зразка з кільцевою проточкою

($\alpha_\sigma = 1,8$, $r_\sigma = -1$)

Матеріал	Д16Т	18Х2Н4ВА	15ХСНД
M_1	1,65	3,32	0,32
M_2	-0,52	-0,36	-0,22

Порівняння кривих довговічності, побудованих згідно залежності (28) (крива 2) та згідно стандартного методу Махутова (крива 3 згідно наближеного методу, крива 4 – у випадку розрахунку за уточненим методом), для зразка без концентратора напружень та для зразка з кільцевою проточною з експериментальними даними (крива 1) наведено на рис. 22 та рис. 23.

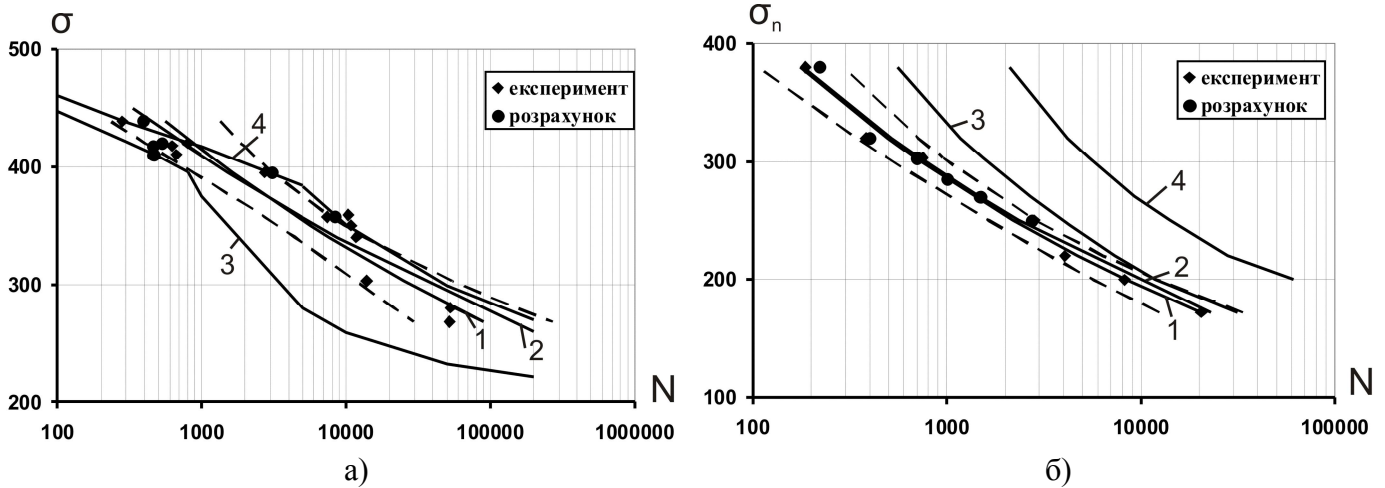


Рис. 22. Криві довговічності для сплаву Д16Т $r_\sigma = -1$: а) $\alpha_\sigma = 1$, б) $\alpha_\sigma = 1,8$

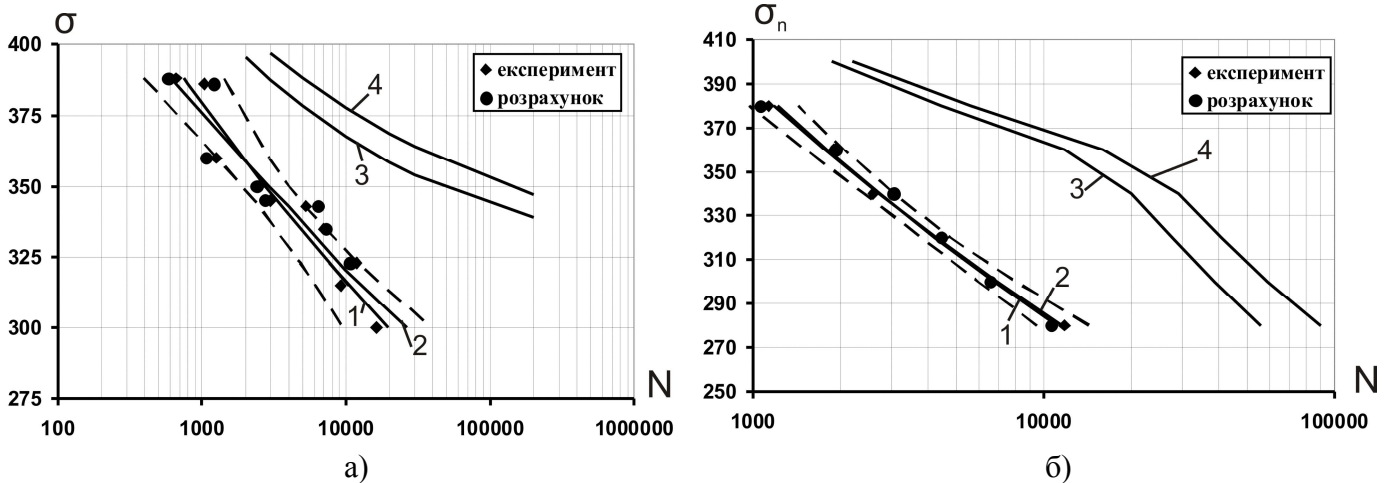


Рис. 23. Криві довговічності для сталі 15XCHD $r_\sigma = -1$: а) $\alpha_\sigma = 1$, б) $\alpha_\sigma = 1,8$

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

- 1) Розроблено метод оцінки довговічності елементів конструкцій для умов малоциклової втоми, що базується на енергетичному підході щодо визначення конструкційної міцності матеріалів та враховує вплив розсіяної пошкоджуваності. Похибка визначення кількості циклів до руйнування за цим методом для розглянутих у роботі металевих матеріалів не перевищила 35%.
- 2) Модифіковано підхід Махутова-Нейбера щодо визначення ефективних коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій при розрахунках їх максимальних значень в зоні концентратора шляхом введення у розгляд ефективної діаграми деформування, яка враховує явище накопичення пошкоджень у матеріалі.
- 3) Експериментально встановлено, що для випадків статичного та циклічного навантаження повна крива пошкоджуваності може бути представлена у вигляді трьох окремих ділянок, які характеризуються різною швидкістю накопичення

пошкоджень. Для випадку малоциклового навантаження відмічено, що повна крива накопичення пошкоджень не залежить від циклічного стану матеріалу.

4) Модернізовано експериментальний стенд по визначенню параметру пошкоджуваності, що дозволило перейти до прямих вимірів електричного опору металевих матеріалів. Це дало можливість підвищити точність вимірювання та експериментально встановити, що процес накопичення пошкоджень у матеріалі відбувається з самого початку навантажування.

5) Для металевих конструкційних матеріалів Д16Т, ВТ22, 15ХСНД, 07Х16Н6, 18Х2Н4ВА, 12Х18Н10Т визначено величину параметру пошкоджуваності на рівні границі текучості D_T (пропорційності), границі міцності D_B та в момент руйнування зразка D_R . Це дозволило уточнити модифіковану модель накопичення пошкоджень Ж. Леметра за параметром початкової пошкоджуваності. Встановлені залежності параметрів пошкоджуваності D_T та D_R від характеристик пластичності матеріалу. Для розглянутих у роботі матеріалів визначені параметри модифікованої моделі накопичення пошкоджень Ж. Леметра.

6) Для випадку симетричного циклу навантаження в умовах малоциклової втоми для матеріалів Д16Т, ВТ22, 15ХСНД, 18Х2Н4ВА, експериментально отримані значення параметру заліковування h , що дозволило визначити величину пошкоджуваності у від'ємному напівциклі навантаження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бобир М. І. Метод визначення коефіцієнтів концентрації інтенсивності напружень та деформацій з урахуванням пошкоджуваності / М. І. Бобир, В. В. Коваль. // *Машинознавство*. – 2007. – №4. – С. 20–25. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження та обробка результатів експерименту, визначено параметри моделі пошкоджуваності, проведено чисельний розрахунок конструктивного елементу та розрахунок коефіцієнтів концентрацій напружень та деформацій для умов статичного навантаження.*

2. Коваль В. В. Вплив пошкоджуваності на НДС пластинки з отвором при статичному навантаженні / В. В. Коваль. // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*, серія “Машинобудування”. – 2007. – №50. – С. 162–168.

3. Коваль В. В. Напружено-деформований стан конструктивного елементу з урахуванням розсіяних пошкоджень / В. В. Коваль. // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*, серія “Машинобудування”. – 2008. – №53. – С. 75–84.

4. Бобир М. І. Континуальна механіка пошкоджуваності у задачах малоциклової втоми / М. І. Бобир, О. П. Халімон, В. В. Коваль. // «Наукові нотатки» міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – 2009. – №25 (частина 2). – С. 16–21. *Здобувачем проаналізовано підходи щодо оцінки пошкоджуваності.*

5. Тимошенко О. В. Вплив виду напруженого стану на критичне значення пошкоджуваності для конструкційних матеріалів при пружно-пластичному деформуванні / О. В. Тимошенко, В. В. Коваль, Р. В. Кравчук. // *Вісник*

Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія “Машинобудування”. – 2011. – №63. – С. 103–107. (Входить в НМБ РІНЦ) *Здобувачем проведено експериментальні дослідження та виконана обробка результатів експерименту по визначенню механічних характеристик матеріалів та критичного значення пошкоджуваності.*

6. Гладський М. М. Notch effect on cyclic deformation of structural steel under axial and torsional loading / М. М. Гладський, О. В. Тимошенко, В. В. Коваль. // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія “Машинобудування”. – 2013. – №67. – С. 90–95. (Входить в НМБ РІНЦ) *Здобувачем проведено експериментальні дослідження, обробка результатів експериментів та розрахунок коефіцієнта концентрації при втомі.*

7. Коваль В. В. Малоцикловая усталость конструкционных материалов с учетом поврежденности / В. В. Коваль. // Научно-теоретический и практический журнал Современный научный вестник. Серия «Технические науки». – 2015. – №5 (252). – С. 63–72. (іноземне видання)

8. Bobyr N. I. Damage contribution to the assessment of the stress-strain state of structure elements / N. I. Bobyr, V. V. Koval. // Strength of materials. – 2017. – Vol 49 (№3). – С. 361–368. (Входить до НМБ Scopus) *Здобувачем проведені експериментальні дослідження, отримані основні залежності для характерних значень пошкоджуваності та здійснено чисельний розрахунок пластинки з отворами різного діаметру.*

9. Коваль В. В. Поврежденность конструкционных материалов в условиях малоциклового нагружения / В. В. Коваль. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №2 (80). – С. 52–58. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus)

10. M. Bobyr Damage and failure of the structural components at low cycle loading / M. Bobyr, O. Khalimon, V. Koval // Six International Conference on low cycle loading LCF 6. – Berlin, 2008, – pp 499-504. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження, виконана обробка результатів експерименту, проведено чисельний розрахунок пластинки з отвором та побудовані залежності коефіцієнтів концентрацій напружень та деформацій від кількості напівциклів навантаження.*

11. Bobyr M. Damage and failure of the structural components at low cycle loading / M. Bobyr, O. Khalimon, V. Koval. // The first international conference on damage mechanics ICDM1. – Belgrade, 2012. – С. 65–68. *Здобувачем проведено чисельний розрахунок кільцевої проточки, на основі експериментальних досліджень побудована діаграма Морроу, виконано розрахунок коефіцієнтів концентрацій напружень та деформацій і циклічного параметру зміцнення.*

12. Коваль В.В. Оценка повреждаемости металлических материалов при их упруго-пластическом деформировании / Коваль В.В. //, XI международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиноведения». – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – С. 27-28.

13. Бобир М.І. Довговічність елементів конструкцій за умов малоциклового навантаження з урахуванням пошкоджуваності / Бобир М.І., Коваль В.В. //, 5-а міжнародна науково-технічна конференція «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій». – Львів, 2016 р. – С. 20-22. *Здобувачем запропоновано метод оцінки коефіцієнтів*

концентрації за умов циклічного навантаження з урахуванням пошкоджуваності, отримані циклічні характеристики матеріалів.

14. Бобир М.І. Оцінка ресурсу конструктивних елементів з урахуванням пошкоджуваності / Бобир М.І., Коваль В.В.//, 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Матеріали конференції. – Львів, 2017 . – С. 5-6. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження, встановлені основні закономірності процесу накопичення пошкоджень при статичному та циклічному навантаженні, запропоновано та перевірено на експерименті метод оцінки довговічності елементів конструкцій.*

15. Коваль В.В. Довговічність конструктивних елементів з урахуванням пошкоджуваності / Коваль В.В. // XVIII міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Матеріали конференції. – Київ, 2017.– С. 32.

АНОТАЦІЯ

Коваль В.В. Малоциклова втома елементів конструкцій з урахуванням пошкоджуваності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробці методу оцінки довговічності елементів конструкцій у випадку малоциклового навантаження з урахуванням пошкоджуваності.

Параметр пошкоджуваності в роботі визначався за допомогою оцінки зміни питомого електроопору зразка (у випадку статичного навантаження) та за допомогою аналізу зміни модуля пружності (для випадку циклічного навантаження).

Отримані аналітичні залежності для визначення параметра пошкоджуваності на рівні границі текучості та дійсного опору розриву. Запропоновано метод наближеного розрахунку коефіцієнта зміцнення ефективної діаграми деформування. Визначені ефективні характеристики металевих матеріалів Д16Т, ВТ22, 15ХСНД, 18Х2Н4ВА, 12Х18Н10Т, 07Х16Н6. Модифіковані залежності Нейбера-Махутова для визначення ефективних коефіцієнтів концентрації напружень та деформацій, проведено порівняння розрахунків за модифікованим та базовим підходом.

Для випадку малоциклового навантаження (симетричний цикл, м'яке навантаження) були отримані циклічні параметри матеріалів Д16Т, ВТ22, 15ХСНД, 18Х2Н4ВА. Визначені кінетичні криві накопичення пошкоджень.

На базі енергетичного підходу розроблено метод оцінки довговічності елементів конструкцій. Отримані за цим методом розрахункові значення циклів до руйнування були порівняні з експериментальними та величинами згідно стандартного методу М.А. Махутова.

Ключові слова: пошкоджуваність, малоциклова втома, ефективні напруження, коефіцієнт концентрації напружень, коефіцієнт концентрації деформацій, енергетичний підхід, коефіцієнт заліковування.

АННОТАЦИЯ

Коваль В.В. Малоцикловая усталость элементов конструкций с учетом поврежденности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2018

Диссертационная работа посвящена разработке метода оценки долговечности элементов конструкций с учетом кинетики накопления повреждений для условий малоциклового нагружения.

В работе для анализа процесса накопления повреждений введен в рассмотрение скалярный параметр поврежденности, который может быть определен путем измерения изменения удельного электрического сопротивления (для случая простого растяжения) или модуля упругости при разгрузке (для случая симметричного цикла нагружения, мягкий режим). На основании проведенного комплекса экспериментальных исследований при статическом нагружении для различных металлических материалов получены экспериментальные кривые, кинетики накопления повреждений. Установлено, что в общем случае полную кривую поврежденности можно представить в виде трех участков, каждый из которых характеризуется различной скоростью накопления повреждений.

Экспериментально определено, что начало процесса накопления повреждений совпадает с началом нагружения. Получены соответствующие величины параметра поврежденности на уровне предела текучести (пропорциональности) и в момент разрушения образца. Установлены закономерности изменения данных величин в зависимости от характеристик пластичности материалов, предложены соответствующие аналитические зависимости для их описания.

Для оценки кинетики накопления повреждений в материале была использована модифицированная аналитическая модель Ж. Леметра, разработанная на кафедре ДПМ и СМ ММИ КПИ им. Игоря Сикорского, которая основана на энергетическом подходе к рассмотрению процесса накопления повреждений и учитывает вид напряженного состояния. На примере стали 07X16H6 для случая различных значений теоретического коэффициента концентрации напряжений установлена зависимость между расчетными (в соответствии с указанной аналитической моделью) и экспериментальными величинами параметра поврежденности.

В работе в рамках подхода эффективных напряжений Качанова-Работнова было рассмотрено применение эффективной диаграммы деформирования, которая учитывает влияние повреждений на поведение материала при его нагружении. Предложены аналитические зависимости для приближенного определения коэффициента упрочнения эффективной диаграммы деформирования по известным коэффициентам упрочнения действительной или условной диаграмм. Проведено сравнение результатов расчетов коэффициентов упрочнения по предложенным аналитическим зависимостям с экспериментальными данными, которое показало максимальную погрешность на уровне 2% для случая использования действительной диаграммы деформирования и 15% для условной диаграммы.

Экспериментально определены значения эффективных механических характеристик для материалов Д16Т, ВТ22, 18Х2Н4ВА, 15ХСНД, 07Х16Н6, 12Х18Н10Т.

Проведен численный расчет типовых конструктивных элементов в виде пластинки с отверстиями разного диаметра и цилиндра с кольцевой проточкой разной геометрии. В результате данного расчета были получены и проанализированы поля распределения повреждений в наиболее опасных зонах.

Для случая наличия зон концентрации напряжений (деформаций) модифицирован подход Нейбера-Махутова. Проведено сравнение базового и модифицированного (с учетом влияния параметра поврежденности) подхода для металлических конструктивных материалов Д16Т, ВТ22, 18Х2Н4ВА, 15ХСНД, которое показало уточнение величин эффективных коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в упругопластической области.

Для условий циклического нагружения (симметричный знакопеременный цикл, мягкое нагружение) в области малоциклового усталости были получены экспериментальные кривые, которые характеризуют процесс накопления повреждений. Как и в случае статического нагружения они могут быть представлены тремя участками, которые характеризуются различной скоростью накопления повреждений в материале.

Для материалов Д16Т, ВТ22, 18Х2Н4ВА, 15ХСНД был определен коэффициент залечивания, который дает возможность получить величину поврежденности для отрицательного полуцикла нагружения, тем самым позволяя выразить величину поврежденности, соответствующей полному циклу нагружения, через поврежденность положительного полуцикла.

На основании проведенных исследований был предложен метод оценки долговечности, основанный на энергетическом подходе. Указанный метод принимает в рассмотрение энергию стабилизированного (условно-стабилизированного) цикла. В качестве полной энергии, которая соответствует разрушению, была выбрана энергия, определенная из эксперимента на простое растяжение. Она может быть получена исходя из эффективной и действительной диаграммы деформирования.

Экспериментально получены кривые малоциклового усталости для образцов без концентратора и с концентратором в виде кольцевой проточки радиусом 1 мм.

Показана эффективность применения предложенного подхода по определению долговечности в пределах диапазона малоциклового усталости для случая циклически разупрочняющегося, циклически упрочняющегося и циклически стабилизирующегося состояния материала по сравнению с существующим расчетным методом Н.А. Махутова.

Ключевые слова: поврежденность, малоцикловая усталость, эффективные напряжения, коэффициент концентрации напряжения, коэффициент концентрации деформаций, энергетический подход, коэффициент залечивания.

SUMMARY

Koval V.V. Low-cyclic fatigue of structural elements taking into account damage.

– Manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in the specialty 05.02.09 – dynamics and strength of machines.– National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the development of a method for estimating the durability of structural elements, taking into account the kinetics of damage accumulation for low-cycle loading conditions.

Damage parameter in work was defined by change of electrical resistivity of a sample (for case of static loading) and by means of change of the module of elasticity analysis (for a case of cyclic loading). Analytical dependences for damage parameter determination at the level of a yield stress and rupture stress are received. The method of approximate calculation of hardening coefficient for the effective deformation diagram is offered. Effective characteristics of metal materials D16T, VT22, 15HSND, 18H2N4VA, 12H18N10T, 07H16N6 are defined. Neuber-Makhutov's dependences for determination of effective concentration coefficients of stress and strain are modified, comparison for the modified and basic approach is carried out.

For a case of low-cyclic loading (symmetric stress-controlled cycle) cyclic parameters for materials D16T, VT22, 15HSND, 18H2N4VA have been received. Kinetic curves of damage accumulation are received.

On the basis of energy approach the assessment method of structural elements durability is offered. The calculated rupture cycles values received by this method have been compared with experimental and values according to a standard Makhutov's method.

Keywords: damage, low-cycle fatigue, effective stress, stress concentration coefficient, strain concentration coefficient, energy approach, healing coefficient.