

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ

На правах рукопису

БОГІНІЧ ІГОР ОЛЕГОВИЧ

КІНЕТИКА НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ
В МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ
ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

05.02.07 - Механіка деформівного твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Богинич

Київ - 1996

46.36 211
39.3
Робота виконана в Інституті проблем міцності НАН України

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00757286 (Z)

доктор технічних наук,
провідний науковий співробітник
Чаусов Микола Георгійович

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук
Каплуненко Володимир Георгійович

доктор технічних наук, професор
Карацун Володимир Володимирович

Провідне підприємство: Інститут електроварювання
ім. Е.О.Патона НАН України

Захист відбудеться " 26 " 12 1996 року о
9.30 годині на засіданні спеціалізованої ученої Ради
Д 01.99.01 при Інституті проблем міцності НАН України
в приміщенні конференц-залу інституту
(252014, м. Київ, вул. Тімірязєвська, 2).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту
проблем міцності НАН України

Автореферат розіслано " 25 " 11 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
доктор технічних наук

О.О.Півіняк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Більшість реальних конструкцій експлуатуються з пошкодженнями, що призводить до необхідності оперативного розв'язання ряду важливих задач по вивченню механізмів виникнення і розвитку пошкоженості у матеріалах, а головне – по оцінці живучості та реального залишкового ресурсу таких конструкцій.

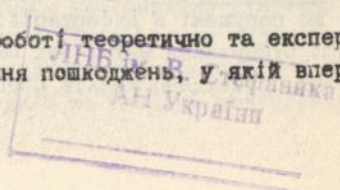
Для виконання в галузі механіки розсіюваного руйнування досліджень характерна різноманітність, високий рівень схематизації, а часто, і суперечність моделей пошкоженості, пропонувані різними авторами. Відсутній і єдиний концептуальний підхід до аналізу закономірностей формування та характеру еволюції різnorodних пошкоджених систем у зв'язку з їх різноманітністю, що суттєво утруднює вибір уніфікованих критеріїв, описувачих процеси зародження, накопичення та розвитку пошкоджень, а також, одержаних при цьому термодинамічних і кінетичних характеристик досліджуваних матеріалів.

Одержані теоретичні та експериментальні результати обмежені класом самих простих навантажень і не мають вірогідних аналітичних інтерпретацій у формах, зручних для практичного використання. Крім того, залишається не вивченою область переходу розсіюваних пошкоджень в локальні, не досліджені особливості процесу руйнування у залежності від температурно-силових умов навантаження. Необхідно також відмітити, що визначення пошкоженості матеріалу неруйнівними методами знаходиться у початковій стадії вивчення.

У зв'язку з цим особливою актуальність набувають експериментальні дослідження кінетики руйнування металевих матеріалів різноманітними методами, у тому числі на заключних стадіях деформування, а також побудова фізично обґрунтованих моделей накопичення пошкоджень з урахуванням виду напруженого стану.

Мета дисертації. Метою цієї роботи є комплексне вивчення механічних та структурних аспектів кінетики накопичення пошкоджень в металевих матеріалах на різних стадіях деформування в залежності від силових умов навантаження і розробка на базі нових експериментальних даних фізично обґрунтованої моделі накопичення пошкоджень при статичному навантаженні, яка відображає вплив зиду напруженого стану.

Наукова новизна дисертації. В роботі теоретично та експериментально обґрунтована модель накопичення пошкоджень, у якій вперше



в якості основного параметру поточного стану матеріалу прийнято коефіцієнт поперечної деформації. Показано також, що зростання пошкодженості металевих матеріалів при статичному навантаженні може оцінюватися по зміні логарифмічного декременту коливань і деяких параметрів акустичної емісії (АЕ), що підтверджується відповідними залежностями цих параметрів від ступеня розпушування металу в оцінці залишкової зміни об'єму.

Практична цінність дисертації. В роботі запропоновано та обгрунтовано відносно простий засіб оцінки пошкодженості матеріалів у процесі деформування, показано шлях використання одержаної інформації для прогнозування граничної пошкодженості матеріалу конструкцій. Самостійну практичну цінність становлять розроблені методи та засоби випробувань, і одержані на їх основі нові експериментальні дані з кінетики руйнування матеріалів різних класів.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися на Першій міжнародній конференції "Актуальные проблемы прочности" /м.Новгород, 25-30 вересня 1994 р./; на Всеросійській науково-технічній конференції "Прочность и живучесть конструкций" /м.Вологда, 1993 р./; на Другій регіональній науково-технічній конференції ТПІ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні" /м.Тернопіль, 7-9 грудня 1993 р./; на семінарах відділу статичної міцності і пластичності конструкційних матеріалів Інституту проблем міцності НАН України /1995, 1996 р.р./; на об'єднаному семінарі відділів Інституту проблем міцності НАН України /м.Київ, 1996 р./.

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в семи друкованих роботах.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав, закінчення, списку використаної літератури з 195 найменувань та вміщує 173 сторінок друкованого тексту, 46 малюнків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, дана її коротка характеристика.

У першій главі подано огляд літератури по головним питанням, що порушені в дисертації: розглянуті сучасні фізичні уявлення про руйнування металевих матеріалів на різних стадіях деформування, проведено аналіз процесу руйнування пластичних матеріалів.

лів з позицій теорії пошкодженості, показана можливість феноменологічного опису процесу накопичення пошкоджень по діагоналі деформацій з використанням класичних підходів, приведено критичний аналіз експериментальних методів оцінки пошкодженості матеріалів у процесі їх деформування. На основі висновків з літературного огляду сформульовані задачі дослідження.

У другій главі розглянута методика проведення експериментів, обговорюється метод механічних випробувань, заснований на побудові повних діаграм деформування матеріалів. Показана перспективність застосування вказаного методу для дослідження кінетики накопичення пошкодженості на заключних стадіях деформування. Суттєві методичні труднощі, які виникають при випробуваннях на повільне тріщиноутворення, в значній мірі розв'язані шляхом розробки на базі пресу ПРГ-200 випробувальної установки з регульованою жорсткістю навантажувчої системи.

У якості акустико-емісійної апаратури використовували прилади типу "СМА" спільного угорсько-українського виробництва. У процесі випробувань реєстрували та аналізували такі параметри АЕ, як сумарний рахунок, амплітуда сигналу, час зростання сигналу до максимуму, тривалість імпульсу, рівень безперервної емісії /шуму/ та інше. Обробка даних побудована на основі кластерного аналізу. У всіх проведених випробуваннях використовували однакову схему розміщення датчиків АЕ-лінійну з рівною відстанню між датчиками.

Була розроблена відповідна методика, а також спроектований та виготовлений пристрій для реалізації методу зважування. Методика проведення дослідів полягає в наступному. Із матеріалу в вихідному та деформованому станах вирізаються шматочки, маса яких на повітрі підганяється на аналітичних вагах до однієї і тієї ж величини /приблизно 1 г/ з точністю до 0,1 мг. Потім ці шматочки /проби/ на підпружиненій тонкій нитці опускаються у посудину з дистильованою водою. Про зміну об'єму металу в зв'язку з його деформуванням судять по різниці глибини занурення проби, використовуючи при цьому тарировочний графік.

В якості досліджуваних матеріалів були вибрані вуглецеві сталі 20 і 35, малолегована сталь І5ХГ20МР, мартенситно-старіюча сталь, сірий чавун та алюмінієвий сплав ДІ6 з різною величиною зерна, яке було вирощене шляхом спеціальної термомеханічної обробки. Випробування матеріалів проводили на гладких циліндричних

зразках діаметром 8 мм, на зразках з концентраторами та на плоских призматичних зразках.

У третій главі обговорюється нова феноменологічна модель накопичення пошкоджень в металевих матеріалах при статичному навантаженні.

Розглянемо випадок одновісного розтягу тіла у припущенні його макроскопічної однорідності. Нехтуючи пружною деформацією у зв'язку з її малою величиною в порівнянні з залишковою, тобто приймаючи жорстко-пластичну модель тіла з зміцненням, запровадимо структурні параметри $\alpha(\epsilon)$ і $\beta(\epsilon)$, які при загальній деформації

$$\epsilon = \epsilon_n + \epsilon_p \quad (1)$$

ϵ , ϵ_n , ϵ_p - загальна поточна деформація, пластична деформація і деформація розпушування/ визначається співвідношеннями

$$\alpha(\epsilon) = \epsilon_p / \epsilon \quad , \quad \beta(\epsilon) = \epsilon_p / |\epsilon_n|. \quad (2)$$

На основі залежностей /1/ і /2/ одержимо

$$\alpha(\epsilon) = \beta(\epsilon) / (1 + \beta(\epsilon)). \quad (3)$$

Параметру $\alpha(\epsilon)$ можна формально поставити у відповідність коефіцієнт поперечної деформації, який є одним з важливих характеристик деформаційних процесів в матеріалі, які пов'язані зі змінами його щільності. Дійсно, якщо ϵ' - поперечна деформація, то

$$\mu = - \frac{\epsilon'}{\epsilon} = - \frac{\epsilon_n' + \epsilon_p'}{\epsilon_n + \epsilon_p}.$$

Ураховуючи, що зростання пор відбувається, в основному, в напрямку діючих напружень, тобто в вісьовому напрямку, поперечною деформацією ϵ_p' від розпушування можна знехтувати. Тоді:

$$\mu = - \frac{\epsilon_n'}{\epsilon_n + \epsilon_p} = - \frac{0,5 \cdot \epsilon_n}{\epsilon_n + \epsilon_p} = - \frac{0,5}{1 + \beta}.$$

Звідси знаходимо

$$\beta(\mu) = \frac{0,5 - \mu}{\mu} \quad (4)$$

і на основі виразу /3/ маємо

$$\alpha(\mu) = 1 - 2 \cdot \mu \quad (5)$$

На рис. I показані загальний вигляд діаграми деформацій жорстко-пластичного тіла /крива 1/, типовий вид залежності коефіцієнта поперечної деформації від ступені деформації /крива 2/ та відповідна крива 3, яка розрахована по формулі /5/ з урахуванням характеру кривої /2/. Там же крива 4 ілюструє залежність

$$\varepsilon_p = \alpha(\varepsilon) \cdot \varepsilon \quad (6)$$

при $\alpha(\varepsilon)$, який змінюється у відповідності з кривою 3.

Зазначимо, що розпушування матеріалу приводить до змін його об'єму, причому, якщо оперувати логарифмічними деформаціями при розтязі циліндричного зразка, коли $\varepsilon = \ln(l/l_0)$, $\varepsilon' = -\ln(d/d_0)$, одержуємо

$$\frac{V}{V_0} = \frac{l \cdot d^2}{l_0 \cdot d_0^2} = e^{\varepsilon + 2\varepsilon'} = e^{(1-2\mu) \cdot \varepsilon} = e^{\varepsilon_p}$$

тобто

$$\varepsilon_p = \ln(V/V_0) \quad (7)$$

де V_0 , V - відповідно вихідний і поперечний об'єми деформованого матеріалу.

Непрямим підтвердженням S-подібного вигляду кривої накопичення пошкоджень /крива 4 на рис. I/ є її кореляція з деякими структурно-чутливими параметрами, які характеризують процес проходження акустичних сигналів вздовж деформованого матеріалу.

Випробовування проведені на циліндричних малогабаритних зразках з сталі 20 в стані поставки на предмет оцінки пошкодженості у процесі деформування. Зразки піддавали одновісному розтягу до різних рівней деформації, після цього їх обточували з

метов вилучення виникаючого при деформуванні викривлення геометричної форми робочої частини, в тому числі за рахунок шийки. Потім на один торець зразка прикріпляли датчик імітатора /генератора хвиль АЕ/ сигналів акустичної емісії, а на другий - акустичний датчик для приймання хвиль АЕ. Параметри акустичних сигналів, які сприймаються датчиком-приймачем, реєстрували акустико-емісійною апаратурою "ЕМА". Ступінь пошкодженості матеріалу визначали по змінам параметрів сигналів, які випромінювалися генератором. При цьому акустико-емісійна апаратура функціонувала в режимі одноканальної зонної локації. В результаті обробки дослідних даних було встановлено, що з зростанням деформації зразка амплітуда A сприймаємих акустичних сигналів затухає, а час R зростання сигналів до максимального значення амплітуди, тобто тривалість події АЕ, навпаки, збільшується /рис.2/. При цьому, суттєво важливо, що форма /геометрія/ обох кривих залежностей $A(\epsilon)$ і $R(\epsilon)$ - знаходиться у відповідності з формою кривої $\epsilon_p(\epsilon)$, побудованої по рівнянню /6/ з урахуванням /5/. Одержана картина зростання та затухання відповідних параметрів АЕ є фізично обгрунтованою, тому що з зростанням пошкодженості погіршуються умови проходження сигналів АЕ через матеріал зразка внаслідок збільшення і злиття пор, які передують макроруїнуванню. Таким чином, за допомогою акустико-емісійної апаратури "ЕМА" вдалося оцінити зміни ступені пошкодженості сталі 20 у процесі її деформування.

Спеціальні дослідження у рамках даної роботи показали, що на ділянці, яка існує перед виникненням макротріщини, коефіцієнт поперечної деформації може знижуватися до значень 0,15...0,10, а рівень деформації розпушування досягати 20% і більше. Проте свідчать дані, які одержані при випробовуваннях обточених /з метою усунення шийки/ заздалегідь деформованих зразків з сталі 20. Результати цих випробовувань наведені на рис. 3.

Практичне використання описаної вище моделі проілюстровано також на сталі 35 в стані поставки і малолегованої сталі І5ХГ2СФР, яка була піддана загартуванню та відпусненню. Показано, що кінетика процесу розпушування в обох сталях якісно однакова, проте, темп зростання пошкоджень у легованій сталі помітно вище. При загальній деформації 10% розпушування легованої сталі приблизно у 1,5 рази вище, ніж у сталі 35.

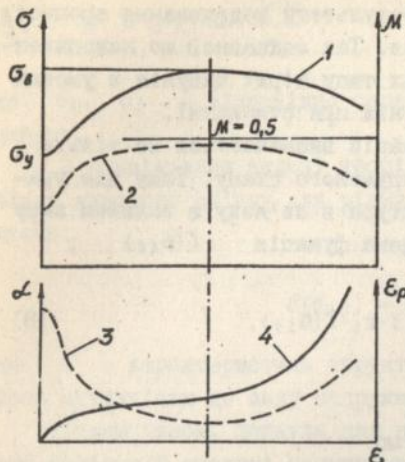


Рис. 1. Загальний вигляд кривих, які характеризують процеси деформування та розпушування матеріалу при розтязі: 1 - діаграма розтягу; 2, 3, 4 - залежності коефіцієнту поперечної деформації, структурного параметру α і деформації розпушування від загальної деформації.

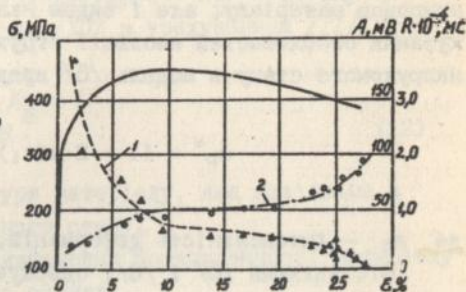


Рис. 2. Залежності амплітуди акустичних сигналів /1/ та тривалості події АЕ /2/ від ступеню деформації /сталь 20/.

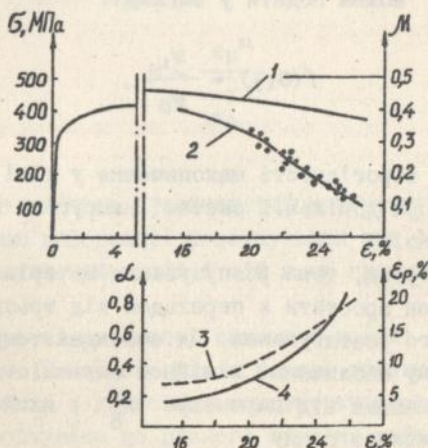


Рис. 3. Залежності коефіцієнту поперечної деформації та параметрів структури сталі 20 від ступеню деформації на кінцевій ділянці стадії зменшення: 1 - 4 - див. рис. 1.

Особливий інтерес становлять результати моделювання процесів розпушування квазіхрупких матеріалів. Так показано, що накопичення розсіяних пошкоджень у матеріалах типу сірих чавунів в умовах розтягу протікає більш інтенсивно, ніж при стисканні.

Кінетика структурних трансформацій визначається не тільки природою матеріалу, але і видом напруженого стану. Тому для урахування особливостей еволюції структури в зв'язку з впливом виду напруженого стану в модель /6/ введена функція $f(\sigma_{1j})$:

$$\epsilon_p^* = [1 - 2 \cdot \mu(\epsilon_1)] \cdot \epsilon_1 \cdot f(\sigma_{1j}), \quad (8)$$

де ϵ_1 - інтенсивність деформацій.

Зіставляючи /6/ і /8/, одержуємо

$$f(\sigma_{1j}) = \frac{\epsilon_p^*}{\epsilon_p^p}. \quad (9)$$

З метою конкретизації функції $f(\sigma_{1j})$ проведено аналіз запропонованої моделі у статистичному аспекті. Показано, що з точністю до коефіцієнта, який не залежить від виду напруженого стану, функцію $f(\sigma_{1j})$ можна подати у вигляді:

$$f(\sigma_{1j}) = \frac{W_1}{W_p}, \quad (10)$$

де W_1, W_p - вірогідності накопичення у тілі n' елементів з пошкодженнями при довільній системі напруг та при одновісному розтязі відповідно.

З другої сторони, темп розпушування матеріалу в умовах деформування повинен зростати з переходом від трьохвісного стиснення до трьохвісного розтягування. Ця очевидна тенденція може бути виражена у першому наближенні лінійною залежністю числа n' елементів з пошкодженнями від параметра K'_6 , який характеризує жорсткість напруженого стану

$$n' = a - b \cdot K'_6, \quad (11)$$

$$\text{тут } \frac{K'}{b} = 3 \cdot \frac{K}{b} = \frac{3 \cdot b_m}{b_1},$$

де b_m , b_1 - відповідно середня напруга та інтенсивність напруг.

З розв'язання задачі теорії вірогідності про повторну вибірку заданого об'єму для рівняння /I0/ з урахуванням /II/ одержуємо:

$$f(b_{1j}) = B \frac{K'}{b} - 1 \quad (12)$$

де B - характеристика структури матеріалу, яка пов'язана з його чутливістю до виду напруженого стану.

Таким чином, формула для визначення пошкодженості матеріалу при довільній системі напруг має вигляд:

$$\epsilon_p^* = \epsilon_p^p \cdot B \frac{3K}{b} - 1 \quad (13)$$

Для чистого зсуву ($\frac{K}{b} = 0$) при будь-якій фіксованій деформації:

$$\tau_{\epsilon_p} = \epsilon_p^p \cdot B^{-1}.$$

Звідси

$$B = \frac{\epsilon_p^p}{\tau_{\epsilon_p}},$$

тобто B - характеристика властивостей матеріалу, яка чисельно дорівнює відношенню деформації розпушування при одновісному розтязі та чистому зсуві при одній і тій ж чи граничній інтенсивності деформацій.

Для перевірки вірогідності описаної моделі були проведені спеціальні дослідження. Використовували гладкі зразки з сталі 20 діаметром 8 мм та зразки з круговими концентраторами. Зразки, включаючи гладкі, деформували до різного ступеня деформації з тим, щоб як можливо ближче підійти до стадії, попередній утворенню матротріщини, тобто до стадії, на якій щільність розсіяних пошкоджень є критичною. Після цього зразки розвантажували і на довжині 25 мм точінням з малими подачами знімали поверхневий шар на глибину концентратора до одержання гладких циліндричних поверхонь,

діаметр яких дорівнював внутрішньому діаметру концентратора чи шийки - при випробовуванні зразків без концентратора. Оброблені по такій технології зразки повторно випробовували на розтяг з реєстрацією поздовжньої /на базі 10 мм/ і поперечної / у зоні концентратора/ деформацій.

На рис.4 наведені значення /крапки/ коефіцієнтів поперечної деформації на заключних стадіях деформування, а також їх лінійні апроксимації та побудовані по ним криві накопичення пошкоджень. Заштриховані кола на цих кривих відповідають деформаціям, попереднім утворенню макротріщини.

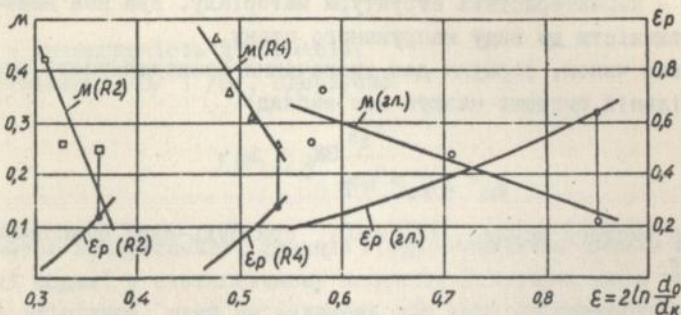


Рис.4. Значення коефіцієнтів поперечної деформації сталі 20 на стадіях, які передують руйнуванню гладких зразків та зразків з концентраторами R2 і R4.

Одержані дані свідчать про те, що із збільшенням жорсткості напруженого стану рівень граничних пошкоджень знижується. Використовуючи в якості першого наближення лінійну залежність ступені пошкоджень від параметру K_6 , знаходимо, що при одновісному розтязі $(K_6 = 1/3) \varepsilon_p^p = 0,693$, функція /13/ добре узгоджується з результатами випробовувань зразків з концентраторами /рис.5, крива 2/. При розрахунках прийнято $B = 0,6$.

Для експериментальної перевірки одержаних даних про граничні пошкодження сталі при різних напружених станах додатково використовували метод зважування. Зразки випробовували на розтяг з реєстрацією кривих $b(\varepsilon)$ і $\mu(\varepsilon)$. Потім з центральної частини всіх випробованих зразків /первісно гладких і з вихідними концентраторами R2, R4 /, а також із зразків, розвантажено-

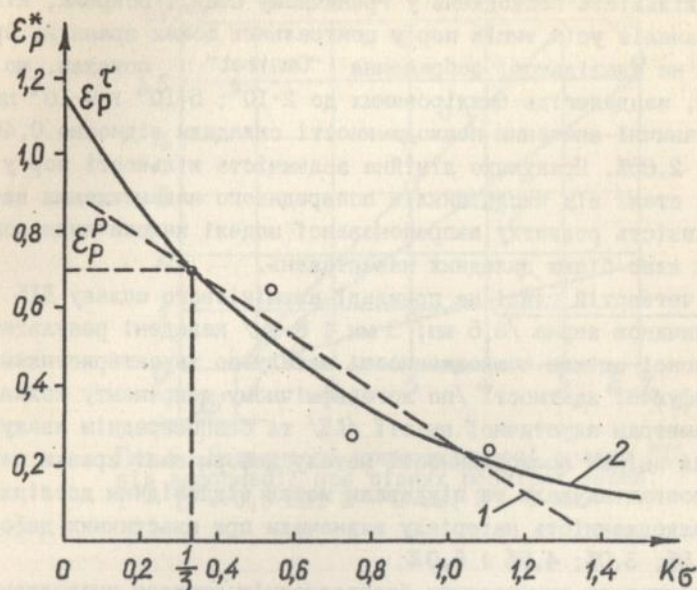


Рис.5. Значення граничних пошкоджень сталі 20 при різних напружених станах: 1 - апроксимація експериментальних даних лінійною залежністю; 2 - припущена залежність, яка отримана за формулою /13/.

них на більш ранніх стадіях деформування, вирізали проби металу однакової ваги та визначали по описаній вище методиці залишкове збільшення об'єму ΔV матеріалу за рахунок пошкодженості в процесі деформування. Виявилось, що результати дослідних та розрахункових даних, приведені до єдиного масштабу, знаходяться в одному полі неминучого розкидання. Таким чином, одержано непряме підтвердження достовірності думок, покладених в запропонованій моделі.

У цій же главі показані дані по впливу попереднього циклічного навантаження на процес руйнування мартенситно-старіючої сталі при наступному статичному розтягуванні. Зразки заздалегідь підлягали циклічному навантаженню при симетричному циклі $\sigma_a = 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$, частота навантаження складала 140 Гц/. Після цього їх рівнобісно розтягували до створення макротріщини і розвантажували. Потім, різними методами, у тому числі й металофізичними, виз-

начали кількість пошкоджень у граничному стані. Зокрема, кількісний аналіз усіх типів пор у центральних зонах зразків, проведений на аналізаторі зображення "Omnimet" показав, що в зразках, заздалегідь циклірованих до $2 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^4$ і $9 \cdot 10^4$ циклів, граничні значення пошкодженості склали відносно 0,46%; 1,78% і 2,85%. Практично лінійна залежність кількості пор у граничному стані від числа циклів попереднього навантаження вказує на можливість розвитку запропонованої моделі накопичення пошкоджень на клас більш складних навантажень.

В четвертій главі на прикладі алюмінієвого сплаву ДІ6 з різною величиною зерна /0,5 мм; 3 мм і 8 мм/ наведені результати комплексної оцінки пошкодженості металу по характеристикам його демпфуючої здатності /по логарифмічному декременту коливань/, по параметрам акустичної емісії /АЕ/ та безпосереднім зважуванням. Для оцінки пошкодженості металу деформовані зразки періодично розвантажували та піддавали метал відповідним дослідженням. Пошкодженість матеріалу визначали при пластичних деформаціях 1,5%; 3,0%; 4,5% і 6,0%.

Результати вимірювання безпосереднім методом пошкодженості сплаву при різних розмірах зерен в залежності від деформації наведені на рис. 6. Експериментальні крапки побудовані по середнім значенням результатів п'яти і більше дослідів. Як видно із рисунка, дослідні дані по крайній мірі у діапазоні деформацій від 1,5% до 6,0% добре апроксимуються прямими лініями, які сходяться у точці при $\epsilon \approx 0,7\%$. Розміщення цієї точки на рівні $\Delta V = 0$ видається не випадковим. Воно свідчить про те, що в умовах статичного деформування процес накопичення пошкоджень, що приводять до залишкової зміни об'єму /за рахунок процесу розпушування/, починається при помітних пластичних деформаціях, які для випробуваного сплаву досягають приблизно 0,7%. Звертає також на себе увагу той факт, що з ростом зерна темп збільшення пошкодженості сплаву /кут нахилу апроксимуючих прямих/ збільшується.

Вплив розміру зерна d на ступінь розпушування сплаву при різних рівнях деформацій ілюструється даними, які наведені на рис.7. Аналіз цих даних дозволив одержати наступне співвідношення, яке описує процес накопичення пошкоджень сплаву в різних структурних станах при статичному деформуванні:

$$\Delta V = 0,5 \cdot (\epsilon - 0,7) \sqrt{d} . \quad (14)$$

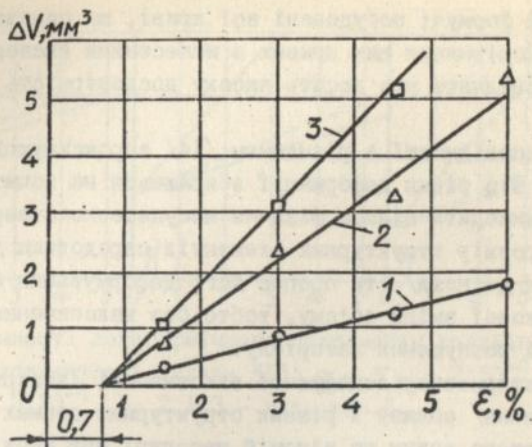


Рис.6. Залежності пошкодженості сплаву ДІ6 від деформації при різних розмірах зерен: 1 - $d = 0,5$ мм; 2 - 3 мм; 3 - 8 мм.

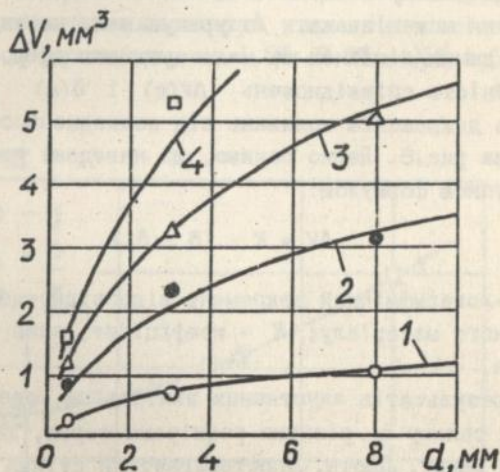


Рис.7. Залежності пошкодженості сплаву ДІ6 на різних стадіях деформування від розміру зерна: 1 - $\epsilon = 1,5\%$; 2 - 3,0%; 3 - 4,5%; 4 - 6,0%.

По цій формулі побудовані всі криві, що показані на рис.6 і рис.7. Порівняння цих кривих з нанесеними експериментальними крапками свідчить про досить високу достовірність співвідношення $/I4/$.

У відповідності з рівнянням $/I4/$ апроксимуючі криві $\Delta V(d)$ незалежно від рівня деформації збираються на початку координат. Із цього виходить цілком фізично несуперечне ствердження про те, що, якщо розмір структурних елементів середовища дуже малий /наближається до нуля/, то процес його деформування буде проходити без залишкової зміни об'єму, тобто без накопичення пошкоджень за рахунок розпушення матеріалу.

Характеристику демпфуючої властивості /логіфімічний декремент коливань/ сплаву в різних структурних станах визначали в умовах чистого згину по відомій методиці при амплітудах циклічних деформацій $\epsilon_a = /2...8/ \cdot 10^{-4}$. Амплітудні залежності логарифмічного декременту коливань у вказаному діапазоні амплітуд мають дуже слабку нелінійність. Тому при подальшому аналізі використовували одержані в результаті статистичної обробки експериментальних даних лінійні апроксимації. Виявилось, що залежність демпфуючої властивості сплаву в оцінці декрементом коливань δ від ступеня деформування можна вважати /з урахуванням неминучого розкидання дослідних даних/ лінійною та мало чутливою до розміру зерна.

Лінійність співвідношень $\Delta V(\epsilon)$ і $\delta(\epsilon)$ визначає лінійну залежність декременту коливань від пошкодженості. Ці залежності показані на рис.8. Легко бачимо, що наведені графіки можна описати наступною формулою:

$$\Delta V = K \cdot (\delta - \delta_0), \quad (15)$$

де δ , δ_0 - логарифмічний декремент відповідно деформованого і недеформованого матеріалу; K - коефіцієнт, який залежить від розміру зерна.

Для результатів акустичних вимірювань, одержаних при випробуваннях сплаву з різними розмірами зерен, характерне велике розкидання даних. Проте, спостерігається стійка тенденція зростання значень параметру R з ростом деформації. Причому темп зростання цього параметру в процесі пластичного деформування сплаву збільшується з розміром зерна. Якісна відповідність цій закономірності з характером зміни об'єму матеріалу при деформуванні, яка встановлена безпосереднім методом, вказує на обґрунтованість використання

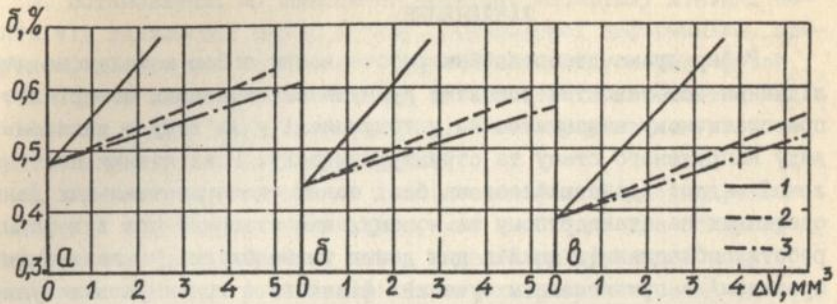


Рис.8. Залежності логарифмічного декременту коливань від ступеню пошкодженості сплаву ДІ6: а - $\epsilon_a = 7 \cdot 10^{-4}$; б - $5 \cdot 10^{-4}$; в - $3 \cdot 10^{-4}$, 1, 2 і 3 - див. рис.6.

параметра R для оцінки ступені пошкодженості сплаву. Бувалося, що такий зв'язок не тільки існує, але й є інваріантним по відношенню до розміру зерна. Цей висновок виходить, частково, з даних, які наведені на рис.9. Показана на ньому крива є апроксимацією крапок, які побудовані на основі зіставлення графіків $\Delta V(\epsilon)$ і $R(\epsilon)$, шляхом виключення параметра ϵ . Нанесені на графік точки відповідають деформаціям $\epsilon = 1,5\%$; $3,0\%$; $4,5\%$ і $6,0\%$.

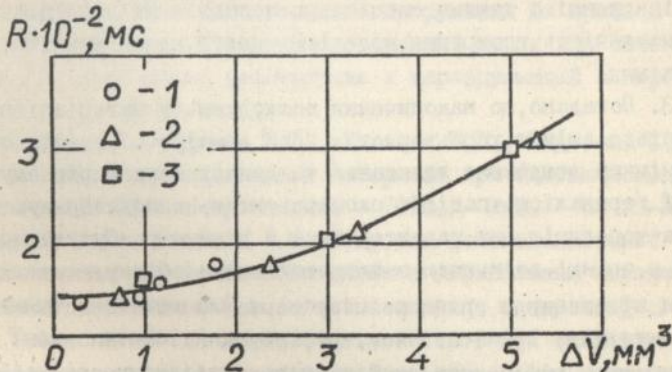


Рис.9. Вплив ступеню розпушування сплаву ДІ6 на тривалість події АЕ: 1, 2 і 3 - див. рис.6.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Реферувана дисертаційна робота являє собою комплексне дослідження особливостей розвитку руйнування металевих матеріалів при статичному навантаженні, у тому числі у зв'язку з впливом виду напруженого стану та структури металу. Розв'язання поставленої задачі здійснювалося на базі нових експериментальних даних, одержаних на стандартному та новому, яке створене при виконанні роботи, обладнанні. Аналіз цих даних та необхідні узагальнення проведені з притягненням сучасних фізичних і континуальних уявлень про кінетику накопичення розсіяних пошкоджень.

До основних результатів дослідження відносять:

1. Розвинуті існуючі та запропоновані нові методи експериментального дослідження кінетики накопичення пошкоджень у металевих матеріалах, що засновані на використанні рівновісних діаграм, які визначенні безпосередніми методами залишкової зміни об'єму, демпфуючої властивості і параметрів акустичної емісії деформованого металу.

2. Розроблена та експериментально обґрунтована модель накопичення пошкоджень у металевих матеріалах, у тому числі при складному напруженому стані, в якій у якості параметра, характеризуючого швидкість процесу на заданій стадії деформування, прийнято коефіцієнт поперечної деформації на цій стадії. Результати розрахунків по запропонованій моделі знаходяться у доброму співвідношенні з даними спеціально поставлених дослідів. Показана можливість поширення моделі на деякі класи циклічного навантаження.

3. Показано, що накопичення пошкоджень у матеріалі супроводжується зміною характеристик його демпфуючої властивості /логарифмічний декремент коливань/ та деяких параметрів акустичної емісії /тривалість події/; експериментально підтверджуються стійка кореляція цих характеристик з рівнем розпушування матеріалу в оцінці величиною залишкової зміни об'єму.

4. Досліджено вплив розміру зерна на темп зростання пошкоджень матеріалу при статичному деформуванні. Встановлені аналітичні інтерпретації залежностей ступеня пошкодженості матеріалу від деформації, які включають в якості незалежного параметра розмір зерна.

5. Встановлено, що декремент коливань матеріалу лінійно залежить від залишкової зміни об'єму, обумовленої деформацією, причому коефіцієнт пропорційності є функцією розміру зерна. В той же час розмір зерна впливає на вид залежності характеристик АЕ /тривалість події/ від залишкової зміни об'єму у зв'язку з розпушуванням матеріалу при деформуванні.

6. Одержані при виконанні дослідження фактичні експериментальні дані є важливою інформацією, яка необхідна для обґрунтування фізичної достовірності нових моделей руйнування і можуть бути використані при розв'язанні багатьох практичних задач, частково, при удосконаленні існуючих та розробці нових методів і засобів неруйнівного контролю стану металу, що піддається деформуванню.

Основні результати виконаної роботи знайшли відображення у наступних публікаціях:

1. Недосека С.А., Богинич І.О. Применение аппаратуры "ЕМА" для оценки поврежденности стали 20 акустическим методом // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1995. - № 1. - С. 31-34.

2. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Богинич І.О. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении // Пробл. прочности. - 1995. - № 7. - С. 31-40.

3. Чаусов Н.Г., Лебедев А.А., Богинич І.О., Недосека С.А. Влияние предварительного циклического нагружения на процесс разрушения образцов из мартенситно-старенной стали при статическом растяжении // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1996. - № 3. - С. 32-39.

4. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Богинич І.О., Недосека С.А. Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании // Пробл. прочности. - 1996. - № 5. - С. 23-30.

5. Чаусов М.Г., Богинич І.О. Розробка феноменологічної моделі накопичення розсіяних пошкоджень в алюмінієвих сплавах при статичному навантаженні в умовах складного напруженого стану // В кн.: Тези доповіді другої науково-технічної конференції ТПІ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машинобудуванні". - Тернопіль, 1993. - С.121-122.

6. Чаусов Н.Г., Богинич І.О. Кинетика накопления рассеянных и формирования локальных повреждений при статическом деформировании металлов в условиях сложного напряженного состояния //

437801

В кн.: Тезисы докладов всероссийской конференции "Прочность и живучесть конструкций". - Волгода, 1993. -С.54.
 7. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Богинич И.О. Механизм возникновения повреждений в металлических материалах при статическом нагружении // В кн.: Тезисы докладов первой международной конференции "Актуальные проблемы прочности". - Новгород, 1994. -С.77.

АННОТАЦИЯ

Предложена новая феноменологическая модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом нагружении. В качестве основного параметра текущего состояния материала, которому ставится в соответствие степень разрыхления, принят коэффициент поперечной деформации. Приведенная модель удовлетворительно описывает результаты специально поставленных опытов. Показано также, что поврежденность конструкционных материалов при статическом нагружении коррелируется с характеристиками демпфирующей способности и некоторыми параметрами акустической эмиссии металла.

ABSTRACT

A new phenomenological model for damage accumulation in metallic materials under static loading is proposed. A transverse strain factor is taken as a key parameter of the material current state which is associated with the degree of loosening. The model leaded describes adequately the results of the experiments conducted for the purpose. It's shown also that the damage of structural materials under static loading is correlated with damping capacity characteristics and some parameters of acoustic emission of the metal.

Ключові слова: модель накопичення пошкодженнь, розпушування, міцність, коефіцієнт поперечної деформації, логарифмічний декремент коливань, акустична емісія.

Підл. до друку 18.11.1996р. Формат 60x84/16. Папір офс.
 Офс. друк. Ум.друк.арк.0,93. Ум.фарбо-відб. 2,91.
 Обл.-вид.арк.1,0. Тираж 100 прим. Зам.256.

Дільниця роталітнотного друку ВНТІ ІПМіц. НАН України.
 252014, Київ-14, вул.Тімірязєвська,2.