

У статті наведені рівняння стану повзучості та пов'язаного з нею накопичення пошкоджуваності, показана їх придатність у дослідженнях напружено-деформованого стану конструкцій при радіаційній повзучості. Представлені результати чисельних досліджень вигородки атомного реактору ВВЕР-1000, продемонстрований вплив періодичної зміни робочих температур на процеси релаксації напружень. Іл.: 5. Бібліограф.: 7 назв.

**Ключові слова:** вигородка атомного реактору, радіаційна повзучість, температурний розподіл, інтенсивність напружень.

UDC 539.3

**Analysis of strain-stress state of structural elements under radiation creep and periodically varying temperatures and loading / Korytko Yu. M. // Bulletin of NTU "KhPI". Subject issue: New decisions of modern technologies. - Kharkov: NTU "KhPI". - 2012. - №50(956). – P. 28-33.**

Creep-damage constitutive equations are presented in the paper, their adaptability for strain-stress state analysis of structural elements under irradiation creep is shown. The results of numerical investigations of reflection shield of water-cooled power reactor are described. The influence of periodically varying temperatures on processes of stress relaxation was obtained. Im.: 5. Bibliogr.: 7.

**Key words:** reflection shield of nuclear reactor, radiation creep, temperature distribution, stress intensity.

*Поступила в редакцію 20.09.2012*

### **УДК 539.3**

**Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ**, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків;

**І. В. НАУМОВ**, асистент, НТУ «ХПІ», Харків;

**О. А. ТАТАРІНОВА**, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків;

**А. В. КИПЕНСЬКИЙ**, д-р. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Харків

### **РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДХІД ДЛЯ АНАЛІЗУ ПОШКОДЖУВАНОСТІ ПРИ УДАРНОМУ МАЛОЦИКЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Статтю присвячено опису розрахунково-експериментального методу визначення рівня пошкоджуваності у пластинчатих конструктивних елементах, що обумовлена їх циклічним ударним навантаженням. Наведено стислий опис методу та результати чисельних й експериментальних досліджень. Іл.: 4. Бібліогр.: 7.

**Ключові слова:** пошкоджуваність, циклічне ударне навантаження, пластина, чисельне моделювання, метод скінченних елементів, експериментальні дослідження.

**Актуальність теми.** Ударне навантаження конструктивних елементів машин є одним з самих небезпечних факторів, що визначають їхню міцність. У багатьох випадках елементи конструкції зазнають не один, а декілька ударів, які зрештою призводять до руйнування шляхом пробиття. При дуже великому обсягу публікацій, що присвячені теоретичним, розрахунковим та експериментальним навантаженням процесів ударної взаємодії [1, 2], на теперішній час є практично відсутніми роботи у напрямку опису циклічного ударного деформування та руйнування. Одним з найбільш потужних підходів, що застосовується до опису таких процесів, є підхід континуальної механіки пошкоджуваності [3, 4]. В роботі на її базі створено метод аналізу пошкоджуваності у пластинчатих конструктивних елементах, які піддано малоцикловому ударному навантаженню за допомогою індукційно-динамічного

© Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, І. В. НАУМОВ, О. А. ТАТАРІНОВА, А. В. КИПЕНСЬКИЙ, 2012

двигуна (ІДД) [5, 6]. В роботі [7] надано опис створеної на базі ІДД експериментальної установки та описано методику досліджень.

**Метод визначення пошкоджуваності.** Як відомо з експериментів [6, 7], при обмеженому завдяки конструктивним параметрам ІДД значенні сили ударної взаємодії, не завжди вдається зруйнувати тонку пластину з першого ударного навантаження. Отже, має місце повторне, до декількох ударів, чи циклічне ударне навантаження. При кожному ударі в області під ударником виникають напруження, величина яких перевершує границю текучості, та мають місце пластичні деформації.

Опис малоциклових процесів деформування у теперішній час проводять за допомогою підходів континуальної механіки пошкоджуваності [3, 4]. Введемо до розгляду скалярну функцію числа циклів ударного навантаження  $N$  – параметр пошкоджуваності  $\omega(N, \sigma)$ , так, що до початку деформування  $\omega(0, \sigma) = 0$ . Після завершення прихованого руйнування при  $N = N_*$  (у випадку, що розглядається, при наскрізному пробитті)  $\omega(N_*, \sigma) = 1$ .

Параметр пошкоджуваності не має прямого фізичного аналога та є мірою оцінювання процесів накопичення в матеріалі дефектів різної фізичної природи, він відіграє роль параметру, який характеризує умови навантаження, дозволяючи прогнозувати показники довговічності при складних умовах на основі експериментальних даних.

Кінетику змінювання параметра пошкоджуваності  $\omega$  за числом циклів ударного навантаження  $N$  будемо описувати за допомогою кінетичного рівняння, яким встановлюється зв'язок між швидкістю змінювання пошкоджуваності в точці та значенням напруження, що діє у неї [3]:

$$\frac{d\omega}{dN} = f(\omega, \sigma). \quad (1)$$

Для того, щоб рівняння (1) було придатним для опису кумулятивного процесу, тобто незворотного зростання пошкоджуваності, є необхідною позитивність його правої частини:

$$f(\omega, \sigma) \geq 0.$$

Відмітимо також необхідність інтегрованості за числом циклів  $N$ , який явно входить до виразу, що розглядається, та неперервної залежності від  $N$ .

Для конкретизації форми кінетичного рівняння для параметру пошкоджуваності застосуємо гіпотезу щодо його нелінійної залежності від числа циклів. Припускаємо [3], що права частина (1) є добутком двох множників, один з яких залежить тільки від  $\omega$ , а другий – тільки від  $\sigma$ . Прийmemo степеневу форму для функції напружень. В цьому разі кінетичне рівняння при одновісному напруженому стані матиме вигляд

$$\frac{d\omega}{dN} = \frac{D\sigma^k}{(1-\omega)^m}, \quad (2)$$

де  $D$ ,  $k$ ,  $m$  є константами матеріалу, які мають бути визначеними за кривими його довготривалої ударної міцності.

Для визначення значень констант, що входять до рівняння (2), проінтегруємо його, розділяючи змінні:

$$\int_0^{\omega} (1-\omega)^m d\omega = \int_0^N D\sigma^k dN.$$

Після інтегрування отримуємо значення параметра пошкоджуваності:

$$\omega(N) = 1 - \left(1 - D\sigma^k(m+1)N\right)^{\frac{1}{1+m}}. \quad (3)$$

В момент закінчення руйнування  $N = N_*$  та  $\omega(N_*) = 1$ . З формули (3) визначається число циклів до руйнування

$$N_* = \frac{1}{D\sigma^k(m+1)}. \quad (4)$$

За наявності результатів експериментів на довготривалу міцність матеріалу, що розглядається, при трьох рівнях напружень  $\sigma$ , розв'язанням системи трьох алгебраїчних рівнянь виду (4) отримують значення констант  $D, k, m$ .

У випадку складного напруженого стану співвідношення типу (2), (4) записують для еквівалентних напружень  $\sigma_e$ :

$$\frac{d\omega}{dN} = \frac{D\sigma_e^k}{(1-\omega)^m}, \quad (5)$$

$$N_* = \frac{1}{D\sigma_e^k(m+1)}. \quad (6)$$

При малих швидкостях деформування руйнування носить в'язкий характер, тому як еквівалентне напруження за критерієм Мизесу приймається за такий інваріант тензору напружень, як інтенсивність  $\sigma_i$  [3].

На жаль, на сьогодні в відповідній літературі не знайдено методики проведення одновісних експериментів на малоциклову ударну довготривалу міцність для визначення констант, що входять до рівняння (5). У зв'язку з цим для їхньої ідентифікації пропонується наступний розрахунково-експериментальний підхід.

В роботі розглянуто удар по тонкостінному елементу типу круглої пластини, виконаної з алюмінієвого сплаву та вкритою сплавом заліза. При ударі виникають незворотні пластичні деформації. Реалізуємо три чи дві різні швидкості удару. В останньому випадку обмежуємося двома константами у рівнянні (5), приймаючи  $k=m$ . Задачу розв'язуємо чисельно, за допомогою алгоритмів методу скінченних елементів (МСЕ), проводячи необхідну оцінку збіжності розв'язків. Для різних швидкостей ударного навантаження знаходимо поля напружень в області удару, максимальне значення напруження та відповідну йому інтенсивність  $\sigma_i$ .

Після цього проводимо експериментальне вивчення ударної малоциклової довговічності при різних швидкостях удару, отримуємо значення числа циклів до руйнування  $N_*$ , а далі розв'язанням системи трьох чи двох лінійних алгебраїчних рівнянь знаходимо значення констант  $D, k, m$ .

Далі отримане кінетичне рівняння можливо використовувати для розрахунків пластин з матеріалу, що розглядається, в широкому діапазоні змінювання їхніх геометричних характеристик, типів закріплення та навантаження. Для цього розв'язується пружно-пластична задача удару по пластині, яка відповідає умовам навантаження першого ударного циклу. З застосуванням визначеного в зоні удару максимального значення інтенсивності напружень  $\sigma_i$  за формулою типу (3) знаходиться значення параметру пошкоджуваності на кожному циклі чи число циклів до руйнування за формулою (6). Така методика дозволяє найбільш точно врахувати особливості ударного деформування та руйнування, таких як тип ударника, діапазон змін швидкостей та напружень тощо.

Експериментальні випробування та чисельне моделювання пробиття круглих

пластин з конкретними обмеженнями за величиною електричної напруги на конденсаторі перетворювача ІДД, яка не може перевищувати 440-450В, показало, що за один цикл ударного навантаження неможливо їх повністю пробити.

**Визначення констант для матеріалу пластин.** Спочатку розглянемо задачу чисельного моделювання першого циклу ударного експерименту на зразках, вирізаних з самих магнітних дисків.

Розглянемо квадратну пластину зі стороною 30 мм та товщиною 1,6 мм, жорстко закріплену по всьому контуру. Пластина знаходиться на основі, що не деформується, виготовлена з ортотропного матеріалу – два зовнішні шари - сплав заліза, середній – алюмінієвий сплав.

Для отримання чисельного розв'язку побудовано скінченноелементну (СЕ) модель. Обрано тривимірну постановку задачі: 40 елементів на зовнішньому контурі поверхні та 4 елемента по товщині, всього СЕ сітка складається з 6400 елементів та 8405 вузлів.

По центру пластини вдаряє циліндр, що не деформується, масою 0,42911 кг та діаметром 4 мм. Після удару циліндр відскакує. Розв'язується контактна задача ударної взаємодії. Контакт діє на протязі усього часу розрахунку. Під пластиною розміщено жорстко закріплену підложку з матеріалу, що не деформується. Окрім контакту ударника з пластиною враховується контакт пластини з підложкою.

Розглянуто три подібні задачі, що відрізняються значеннями швидкості ударника, яка була задана в експериментах: 1.8, 2.5 та 5.2 м/с. При ударному навантаженні в кожному з трьох випадків частка елементів під ударником руйнується, а у решті в зоні удару виникають пластичні деформації.

На рис. 1 показано розподілення інтенсивності напружень у зразку при ударі в перший момент контакту у випадку швидкості удару 1.8 м/с. Як видно з рисунку, в елементах, що знаходяться під ударником, напруження перевищують границю міцності 160 МПа.

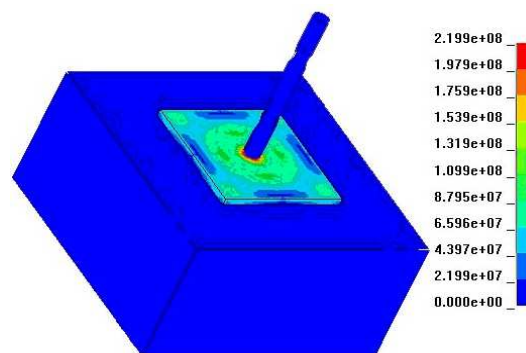


Рис. 1. Розподілення інтенсивності напружень у зразку при ударі зі швидкістю 1,8 м/с

На рис. 2 наведено графік змінювання у часі інтенсивності напружень в одному з СЕ, розташованих під ударником. Видно, що після максимального значення напруження зменшуються, набуваючи значень 110-112 МПа.

Аналогічні чисельні розрахунки було виконано й для двох інших швидкостей удару та знайдені остаточні значення інтенсивності напружень, які характеризують цикл ударного навантаження: для швидкості 2.5 м/с – 132 МПа, для 5.2 м/с – 159 МПа.

Отже, проведені розрахунки надають змогу побудови кривої довготривалої малоциклової ударної міцності (рис. 3).

Також дані з кривої довготривалої малоциклової ударної міцності були застосовані для визначення констант, що

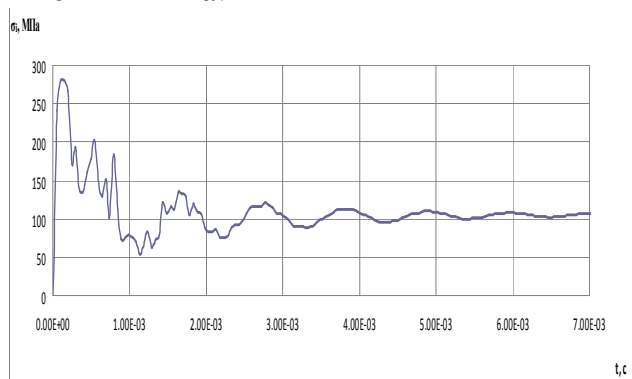


Рис. 2. Змінювання за часом значення інтенсивності напружень в СЕ під ударником

входять до кінетичного рівняння для параметра пошкоджуваності типу (5). Вони виявились рівними  $m=3.76$ ,  $D=6.88 \cdot 10^{-10}(\text{МПа})^{-m}$ .

Для перевірки даних, що можливо одержати за допомогою даного рівняння, з застосуванням формули (6) було отримано значення числа циклів до руйнування для випадку швидкості 2,5 м/с. Для значення інтенсивності напружень 132 МПа воно склало 3.23 цикла, на рис. 3 його позначено символом «+». Відмінність між чисельним та експериментальним значеннями для цього рівня напружень складає 19%, що може вважатись припустимим для інженерних розрахунків.

**Розрахунки пошкоджуваності в пластині.** Тепер перейдемо до розрахунків з застосуванням отриманого кінетичного рівняння довготривалої малоциклової ударної міцності пластин.

Розглянемо деформування та руйнування круглої пластини при швидкості руху ударника 2.5 м/с, яка була реалізована в експерименті, описаному в роботі [7]. Для використання методики визначення числа циклів до руйнування за формулою (6) проведено розрахунок напружено-деформованого стану пластини при першому ударі. Результати розрахунку свідчать, що певна кількість СЕ під ударником руйнується, що відповідає експерименту – на першому циклі в місті удару було зафіксовано вм'ятину. Остаточне значення інтенсивності напружень у районі удару, визначене для моменту припинення коливань внаслідок удару, склало 107 МПа.

Цю величину було застосовано для аналізу числа циклів до руйнування. Розрахунки дають значення 7.12 циклів, що практично співпадає з експериментально визначеним числом 7.

На рис. 4 наведено графік змінювання параметру пошкоджуваності в місті дії ударника. Отже, проведене порівняння свідчить про цілком задовільний збіг експериментальних даних та результатів, отриманих за формулами (3)-(6). Це дозволяє зробити висновок щодо припустимості застосування підходів континуальної механіки пошкоджуваності до розрахунків малоциклової ударної довготривалої міцності пластинчатих конструктивних елементів.

**Висновки.** В статті наведено опис розрахунково-експериментального підходу до аналізу пошкоджуваності, яка виникає у конструктивних елементах типу круглих пластин при їхньому циклічному ударному навантаженні. Показано, що при мінімальній кількості обчислювальних експериментів та експериментів з ударного

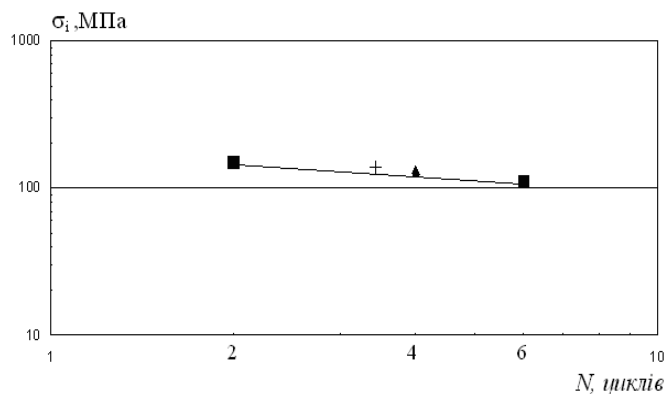


Рис. 3. Крива довготривалої малоциклової ударної міцності матеріалу пластин

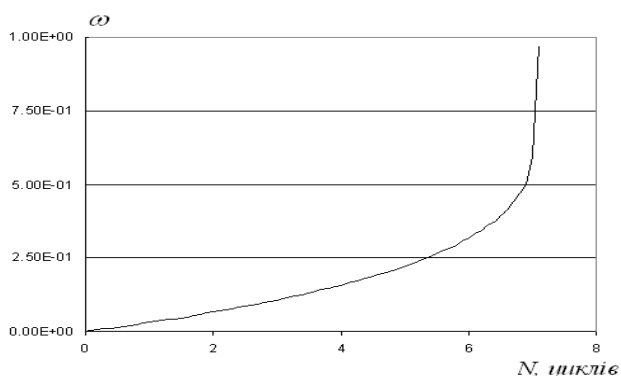


Рис. 4. Змінювання за числом циклів параметру пошкоджуваності у місті руйнування

навантаження, створений підхід надає можливість визначати параметри в кінетичному рівнянні для параметру малоциклової ударної пошкоджуваності та застосовувати його в практичних розрахунках.

**Список літератури:** 1. *Field J. E.* Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies / *J. E. Field, S. M. Walley, W. G. Proud, H. T. Goldrein, C. R. Siviour.* // *Int. J. Imp. Eng.* - 2004. - Vol. 30. – P. 725–775. 2. *Goldsmith W.* Non-ideal projectile impact on targets / *W. Goldsmith* // *Int. J. Impact Eng.*, - 1999. – Vol. 22. -№ 23. - P. 95-395. 3. *Lemaitre J.* Mechanics of solid materials / *J. Lemaitre, J.-L. Chaboche.* - Cambridge: University press, 1994. -556 p. 4. *Chaboche J.-L.* Damage Mechanics./*J.-L. Chaboche* // *In Comprehensive Structural Integrity*, Pergamon Press. - 2002. - Vol. 2. - P.213-284. 5. *Болюх В. Ф.* Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. / *В. Ф. Болюх, В. Г. Данько* –Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – 260 с. 6. *Наумов И. В.* Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником / *И. В. Наумов, В. Ф. Болюх, Д. В. Бреславский* // *Механіка та машинобудування.* – Харків. - 2010. - №1. – С. 207-216. 7. *Breslavsky D.* Numerical and experimental investigations of fracture in thin-walled structures at impact loading./ *D. Breslavsky, I. Naumov, A. Onyshchenko* // *Nonlinear dynamics - 2010: proceedings of the Third International Conference, September 21-24, 2010.* – Kharkov. - 2010. – P. 278-283.

---

УДК 539.3

**Расчетно-экспериментальный подход для анализа поврежденности при ударном малоцикловом нагружении / Бреславский Д. В., Наумов И. В., Татаринова О. А., Кипенский А. В.** // *Вестник НТУ «ХПИ».* Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. № 50(956). – С. 33-38

Статья посвящена описанию расчетно-экспериментального метода определения уровня поврежденности в пластинчатых конструктивных элементах, обусловленной их циклическим ударным нагружением. Приведено краткое описание метода и результаты численных и экспериментальных исследований. Из.: 4. Библиогр.: 7.

**Ключевые слова:** повреждаемость, циклическое ударное нагружение, пластина, численное моделирование, метод конечных элементов, экспериментальные исследования.

UDC 539.3

**Numerical and experimental approach for damage analysis at impact low cycle loading/ Breslavsky D. V., Naumov I. V., Tatarinova O. A., Kipensky A. V.** // *Bulletin of NTU «KhPI».* Subject issue: New decisions of modern technologies. - Kharkov: NTU «KhPI». – 2012. - № 50(956).. – P. 33-38.

The paper is devoted to the description of the numerically-experimental method for determination of the damage levels in plate structural members, which is caused due to impact cyclic loading. The brief description of the method and results of numerical and experimental investigations are given. Im.: 4. Bibliogr.: 7.

**Keywords:** damage, cyclic impact loading, plate, numerical simulation, Finite Element Method, experimental investigations.

*Надійшла до редакції 28.09.2012*