

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИКИ ПОШКОДЖУВАНOSTI КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА НЕСТАЦІОНАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

П.О. Булах, А.В. Бялонович, А.І. Новіков

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка

A technique for determining the fatigue resistance for a non-stationary load is developed. An analytical model and a technique have been developed that make it possible to assess the damageability of steels with respect to the high cycle fatigue with an amplitude varying in accordance with a random law. The procedure for assessing material damage is based on the LM-hardness method.

Методика проведення випробувань у режимі випадкової зміни амплітуди.

Навантаження здійснювалось за допомогою електромагнітної випробувальної машини УРС-2/30000. Для випробувань використовували плоскі зразки зі сталі 45.

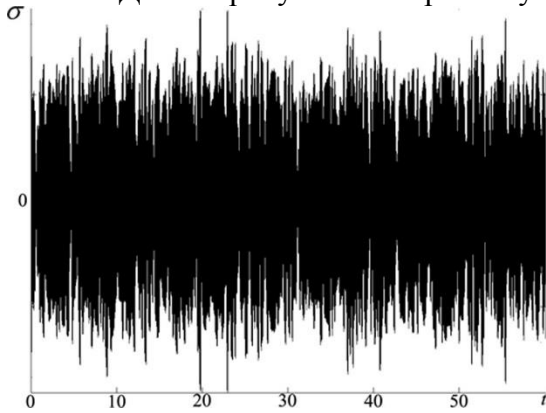


Рис. 1. Фрагмент випадкового навантаження

Випадковий сигнал формувався на персональному комп'ютері та поступав на підсилювач установки. Рівень навантаження записувався та контролювався також ПК, для чого було створено програмне забезпечення. Приклад випадкового сигналу зображено на рис. 1.

Результати випробувань у режимі випадкової зміни амплітуди за втоми.

Для порівняння залежності опору втомі за постійної амплітуди та за амплітуди, що змінюється за випадковим законом наведено залежність опору втомі зразків з тієї самої партії, що використовувалась для дослідження опору за випадковим навантаженням (рис. 2). На рис 3 наведено залежність опору втомі з амплітудою, що змінюється за випадковим законом.

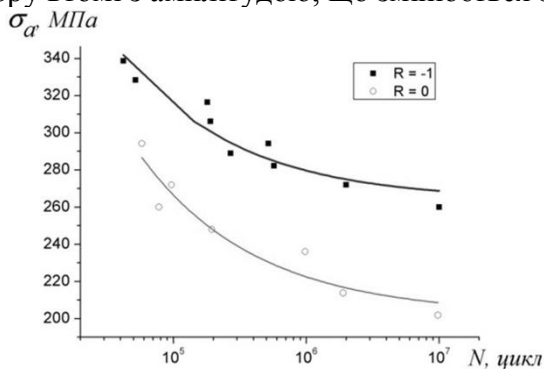


Рис. 2 Криві втоми за постійної амплітуди для симетричного та пульсуючого циклу.

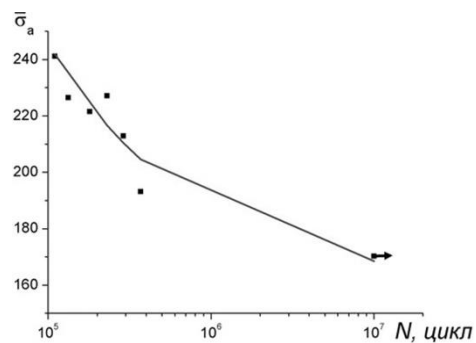


Рис. 3 Крива втоми за випадкової амплітуди навантаження.

Як видно з результатів середнє значення навантаження нижче ніж значення за постійної амплітуди. Таким чином для прогнозування довговічності за випадкового навантаження недостатньо лише експериментальних випробувань, потрібні аналітично-експериментальні методики, що дозволяють визначати ресурс за такого складного виду навантаження.

Кінетика накопичення пошкоджень сталі 45 при циклічному навантаженні у режимі випадкової зміни амплітуди за втоми

Рівень деградації матеріалу у вихідному стані, або після напрацювання, адекватний рівню його структурної неоднорідності, яка може бути оцінена статистичними характеристиками розсіювання чисел твердості при багаторазових вимірюваннях. Тому в якості характеристики розсіювання механічних властивостей обраний коефіцієнт m гомогенності матеріалу до розподілу Вейбула [1].

Відповідно до формули Гумбеля [2] коефіцієнт гомогенності визначається за формулою

$$m = \frac{d(n)}{2,30259} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де $d(n)$ – функція числа вимірювань n ($n \geq 15$); H_i – твердість матеріалу при i -му вимірюванні; при вимірюваннях твердості за методами Брінелля і Віккерса, МПа; за Роквеллом – у безрозмірних одиницях твердості; $\overline{\lg H}$ – середнє значення логарифмів числових значень твердості.

При обробці результатів досліджень використовувалися відносні величини коефіцієнта гомогенності розраховані за [3]:

$$m_{відн} = m_i / m_{поч}, \quad (2)$$

де m_i – поточне значення коефіцієнта гомогенності, розраховане за результатами замірів твердості металу зразка після поточного блоку циклічного навантаження при заданому рівні навантаження; $m_{поч}$ – значення коефіцієнта гомогенності, отримані за результатами обробки вимірів твердості металу зразка у вихідному стані.

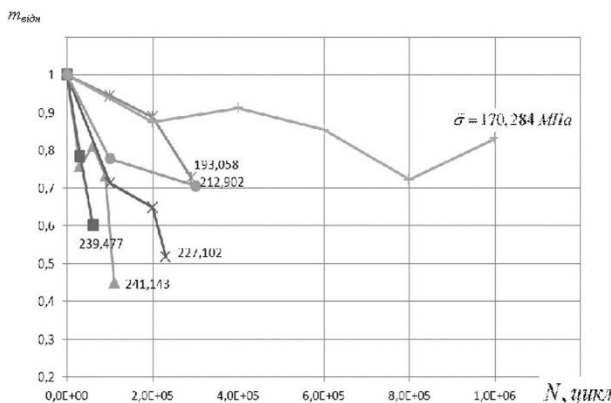


Рис.4. Залежність пошкоджуваності сталі 45 від напрацювання за умов втомного навантаження з амплітудою, що змінюється за випадковим законом.

істотно в діапазоні циклів навантаження близьких до руйнування (рис.4).

При реалізованому виді навантаження видно, що на процесі накопичення пошкоджуваності значною мірою відображується зміна величини середніх напружень циклу $\bar{\sigma}$. Так збільшення напруження амплітуди циклу супроводжується досить інтенсивними змінами коефіцієнта гомогенності, що відображає кінетику пошкоджуваності металу.

Слід відмітити, що для втомного руйнування залежність параметру пошкоджуваності від напружень має характер наближений до лінійного. Такі висновки можна спостерігати і в роботах А.А.Лебедева для іншого виду навантаження [4].

Розрахункове визначення кінетики пошкодження та довговічності матеріалу при випадковому асиметричному навантаженні за моделлю граничного вичерпання циклічної пластичності. Описана раніше модель ГВЦП використана для визначення довговічності матеріалу при випадковому асиметричному навантаженні [5,6]. Для моделювання випадкового асиметричного процесу будемо використовувати нормальний

закон розподілу. Тоді для опису зміни максимального напруження в циклі за деякий відрізок навантаження використовується нормальний закон розподілу:

$$f(\sigma_a, M_\sigma, D_\sigma) = \frac{C}{\sqrt{2\pi \cdot D_\sigma}} \cdot e^{-\frac{(\sigma_a - M_\sigma)^2}{2 \cdot D_\sigma}} \quad (26)$$

де $f(x)$ – густина ймовірності нормального закону розподілу; M_σ та D_σ – математичне очікування та дисперсія дискретної випадкової величини; C – коефіцієнт інтервалу ймовірностного розподілу, який залежить від обраного діапазону. Параметри і граничні характеристики випадкового асиметричного втомного навантаження наведено в табл. 1.

Таблиця 1 Параметри і граничні характеристики випадкового асиметричного втомного навантаження та розрахунковий прогноз довговічності при випадковому навантаженні

Зразок	Випадкове асиметричне втомне навантаження								
	Вхідні параметри						Вихідні дані		
	Напруження, МПа			Коефіцієнт асиметрії			Середнє чисельного експерименту	Експеримент	Різниця в %
σ_m	σ_a	$\sigma(\sigma_a)$	min(r)	av(r)	max(r)				
1	305.91	221.53	42.189	-0.187	0.095	0.679	1.64E+05	1.80E+05	-9.69
2	291.89	239.47	26.21	-0.061	0.115	0.374	1.28E+05	1.40E+05	-9.29
3	291.51	241.14	25.186	-0.063	0.11	0.37	1.28E+05	1.10E+05	14.33
4	277.26	227.10	25.08	-0.061	0.132	0.421	2.56E+05	2.30E+05	10.23
5	296.05	212.90	41.575	-0.191	0.106	0.716	2.65E+05	2.90E+05	-9.56
6	263.46	193.05	35.201	-0.067	0.237	0.913	4.13E+05	3.70E+05	10.41
7	224.63	170.28	27.174	-0.181	0.113	0.765	1.42E+07	Не зруйн.	-
8	274.3	220.1	27.1	-0.037	0.172	0.509	2.46E+05	2.15E+05	12.49

Використавши густини ймовірності, проведено моделювання випадкового процесу зміни значень амплітуди навантаження та порахованого по ним значень коефіцієнтів асиметрії. Як видно з таблиці коефіцієнт асиметрії змінювався в широких межах: від -0,187 до 0,913. Для визначення пошкодження, що викликаний випадковим навантаженням використовується модель граничного вичерпання пластичності, основні рівняння якої надаються в [5, 6]. Використовуючи наведені там рівняння, можуть бути побудовані втомні криві для випадків, що представлені в табл. 1.

На рис. 5 представлений приклад розрахунку кінетики пошкодження при випадковому асиметричному навантаженні для зразку 1 з табл. 1 для сталі 45. На рис. 5 різкі стрибки при накопиченні пошкоджень пов'язані навантаженням зразка амплітудою навантаження близької до малоциклових значень. Нерівномірність накопичення пошкодження пов'язані зі стохастичною змінною амплітуди при випадковому навантаженні. Розрахунковий прогноз довговічності при випадковому навантаженні наведено в табл. 1. Так як процес навантаження стохастичний то на кожному рівні навантаження чисельний експеримент проводився 10 разів для усереднення результату розрахунку. Як видно з таблиці кожен з чисельних експериментів на одному рівні навантаження відповідає різній довговічності, але вони приблизно однакові. Максимальне відхилення середнього значення довговічності по чисельному експерименту, та по натурному експерименту складає 14,33%. Відхилення пояснюється тим що експериментальні данні містять розсіювання, а чисельні розрахунки проводяться по 50% кривій втоми. Тобто розроблено модель, яка дозволяє за характеристиками випадкового процесу прогнозувати довговічність. Особливість, що дозволила перейти від постійної амплітуди до тієї, що змінюється за випадковим законом, полягає в тому, що модель дозволяє враховувати амплітуду кожного циклу.

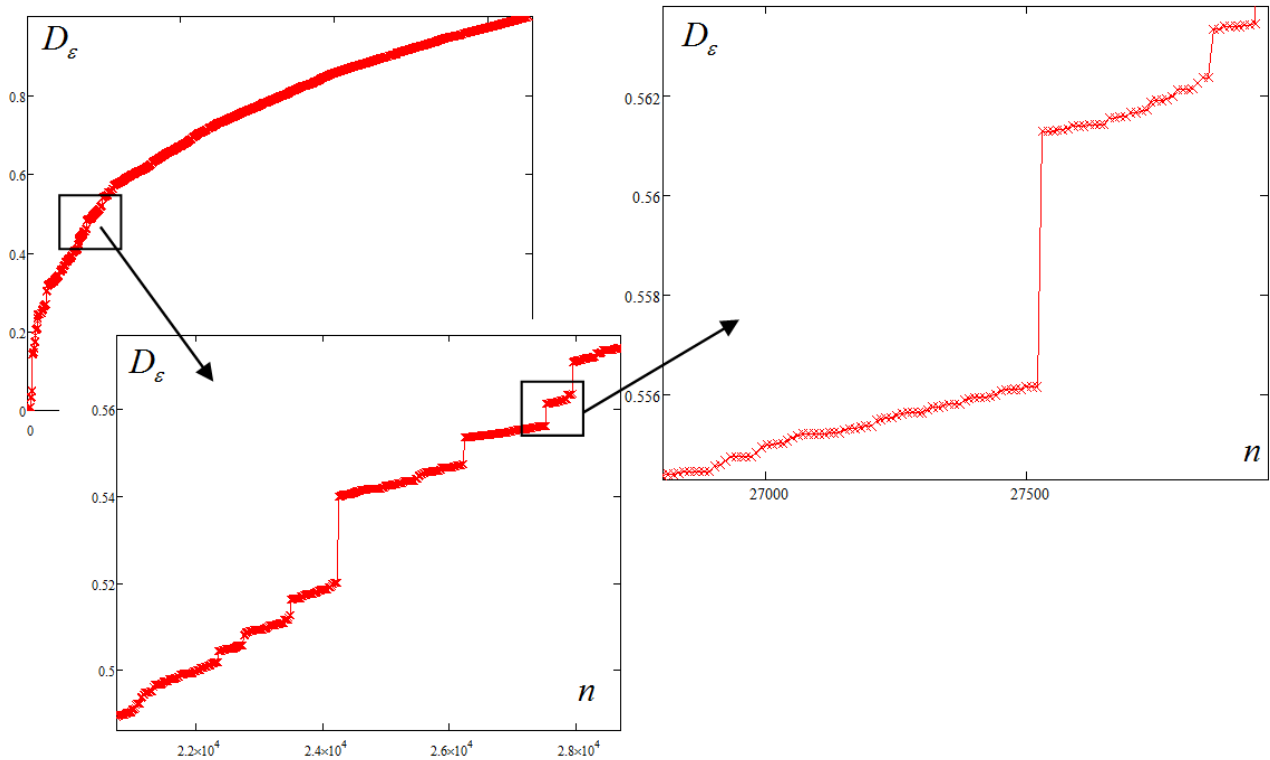


Рисунок 5 – Розрахунок пошкодження для зразку 1 з табл. 4.3 для сталі 45.

ЛІТЕРАТУРА

1. Патент 25197А, МКИ 7, G 01 N 3/00, G 01, N 3/40. Спосіб оцінки деградації матеріалу в наслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання “LM-метод твердості” // Лебедев А.О., Музыка М.Р., Волчек Н.Л. – Опубл. 15.01.03. – Бюл. №1.
2. Gumbel E.J. Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Application. Washington: National Bureau of Standards, 1954. – 472 p.
3. Гигиняк Ф.Ф., Булах П.А. Повреждаемость теплоустойчивых сталей с учетом условий, имитирующих работу энергетического оборудования. // Пробл. прочности. – 2014. – N5. – С.61-68.
4. Лебедев А.А., Голубовский Е.Р., Локощенко А.М., Музыка Н.Р., Ламашевский В.П., Швец В.П., Ефименко Е.В. Оценка предельных уровней рассеянных повреждений в материалах при стационарных режимах статического и циклического нагружения.// Пробл. прочности. – 2012. – №6. – С.5 – 13.
5. Tsyban'ov G.V., Novikov A.I. Ultimate hardening / softening model of material for fatigue crack initiation on set and determination of its parameters // International Journal of Fatigue. – 2012. – Volume 39. – P. 15 – 24.
6. Цибаньов Г.В., Новіков А.І. Оцінювання втомного пошкодження і залишкового ресурсу матеріалу за моделлю граничного вичерпання пластичності // Вісник ТДТУ. – 2009. – №3. – С. 53 – 65.