

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Д. В. РУДАВСЬКИЙ, П. Я. ГАЛАН, І. М. ЛЯСОТА,
П. П. ВЕЛИКИЙ, Я. Д. ТОЛОПКО (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
НАНУ, Львів)

ОЦІНКА РОЗВИТКУ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ В'ЯЗКИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

В роботі описано методику випробувань призматичних зразків сталі великогабаритних конструкцій для побудови кінетичних діаграм втомного руйнування цих матеріалів. Отримані кінетичні діаграми апроксимовано аналітичними залежностями із невідомими параметрами, які знайдено методом найменших квадратів.

В работе описано методику испытаний призматических образцов стали крупногабаритных конструкций для построения кинетических диаграмм усталостного разрушения этих материалов. Полученные кинетические диаграммы аппроксимировано аналитическими зависимостями с неизвестными параметрами, найденными методом наименьших квадратов.

The procedure for testing the prismatic steel specimens of heavy constructions to build the kinetic diagrams of fatigue fracture is described in the paper. The kinetic diagrams obtained have been approximated by analytical dependences with unknown parameters, which were found using least squares method.

Вступ

Протягом останніх десятиліть бурхливо розвиваються дослідження механіки руйнування конструкційних матеріалів. Це зумовлено особливою практичною цінністю отриманих в цій області теоретичних та експериментальних результатів, великим значенням їх для створення методик оцінки працездатності інженерних конструкцій.

При оцінці довговічності металевих елементів сучасних великогабаритних конструкцій ключову роль відіграє, побудована для їх матеріалу, кінетична діаграма втомного руйнування (КДВР). Така діаграма забезпечує дослідників основною інформацією про характер втомного руйнування даного металевих матеріалу подібно як діаграма розтягу – про процес деформації та крім того безпосередньо застосовується при визначенні живучості елементів металоконструкцій, що циклічно навантажують. У відповідності із концепцією механіки руйнування довговічність конструкції призначеної для експлуатації в режимі багаточиклового навантаження обумовлюється насамперед опірністю матеріалу поширенню тріщин у припороговій області, що відповідає І-й ділянці КДВР [1]. Тому для розрахунку довговічності при багаточиклової втомі дослідниками приділяється особлива увага саме припороговій ділянці при побудові КДВР.

Апроксимуючи експериментально побудовану КДВР відповідною аналітичною залежністю $V = V(\Delta K_I)$ можна легко визначити залиш-

кову довговічність елемента металоконструкції із тріщиною за формулою [2]:

$$N_d = \int_{l_0}^{l_c} V^{-1}(\Delta K_I[l]) dl, \quad (1)$$

де l_0, l_c – початковий та кінцевий розміри тріщини, відповідно.

В даній роботі описано теоретико-експериментальну методику побудови КДВР зразків із сталі st 3852 (рис. 1, а), вирізаних із напрацьованого елемента стріли підйомного крану портового обладнання (час експлуатації близько 250 тис. год.), а також зі сталі 09Г2С (вихідний стан).

В експериментальних дослідженнях застосовували випробувальну установку (рис. 1, б) для вивчення процесів зародження та розвитку втомних тріщин у балкових зразках прямокутного поперечного перерізу. Випробування проводились за постійної деформації, коли коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) монотонно змінюється з ростом тріщини [3] (так зване жорстке навантаження).

Опис установки

За конструкційним принципом дії установка нагадує силову схему машин типу Шенк-Ерлінгер [4]. Вона може працювати за схемою консольного чи чистого згинів. На рис. 1, в показано кінематичну схему установки та її загальний вигляд з блоком вимірювання. Зразок б із конструкційного матеріалу одним кінцем жор-

тко фіксують у нерухомому захопі 7, а іншим – у привідному важелі 4, 5 який тягою 3 з'єднаний з ексцентриком 2, останній жорстко закріплений на валу двигуна 1. Зразок розташовують так, щоб послаблений концентратором напружень переріз був посередині просвіту між захопами. Важіль може повертатися навколо осі своєї фіксації під час циклічного навантаження зразка на шарнірних опорах. Вузли та блок управління випробувальною установкою змонтовані на одній основі і дають можливість вимірювати частоту циклів навантаження та його величину, кількість циклів за період випробувань або за заданий оператором проміжок часу.

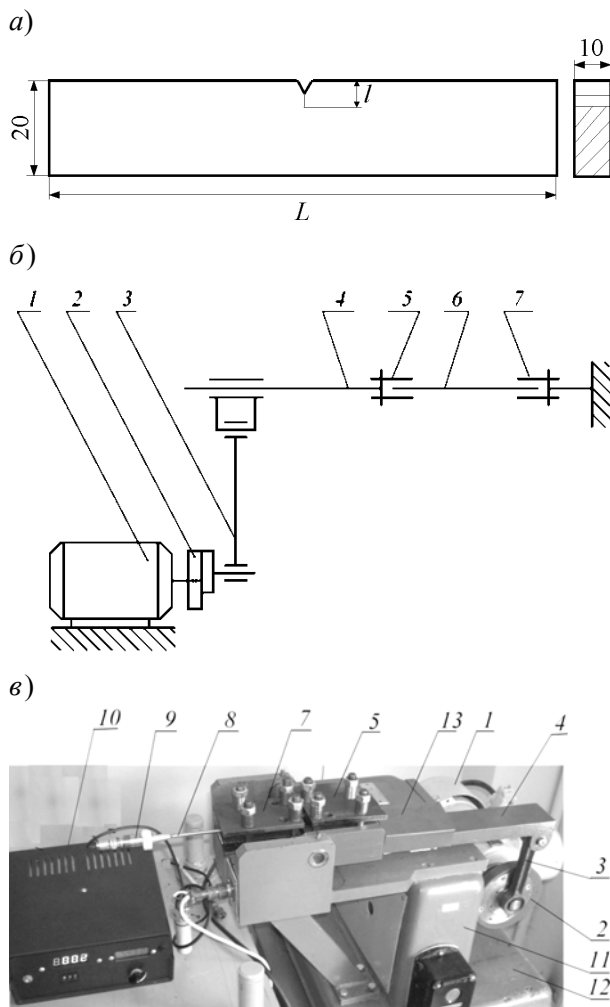


Рис. 1. Схематичне зображення зразка для випробувань (а); кінематична схема установки (б) та її загальний вигляд (в):
 1 – електродвигун; 2 – ексцентрик; 3 – шатун; 4 – важіль; 5 – рухомий захоп; 6 – зразок; 7 – нерухомий захоп; 8 – хвилевід сигналів АЕ; 9 – первинний перетворювач АЕ; 10 – вимірювальний модуль; 11 – стійка; 12 – станіна; 13 – кожух тензометричного вимірювального моста

Величина переміщень важеля задається оператором перед початком випробувань. Важіль

має можливість через вилку здійснювати коливання разом із затиснутим у ньому кінцем балкового зразка. Коливний рух важеля із необхідною амплітудою передається з ексцентрикового механізму, який приводиться в обертання електродвигуном. Зміна зусилля навантаження здійснюється зміною ексцентриситету ексцентрика. Передбачена можливість зміни частоти навантаження та його величини за зміною деформації. На рис. 2 показано структурну схему блока управління.

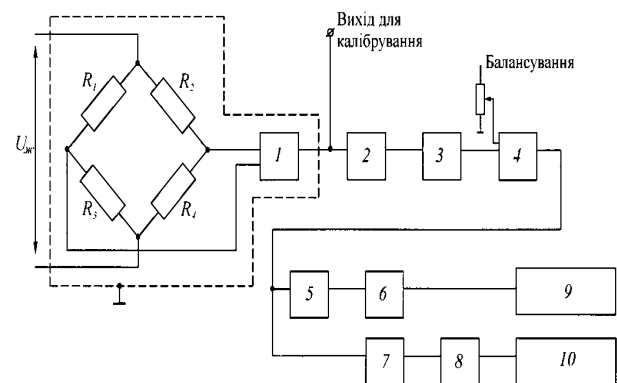


Рис. 2. Структурна схема блока управління випробувальної установки:

- 1 – інструментальний підсилювач; 2 – фільтр високих частот; 3 – смуговий фільтр; 4, 6, 7 – підсилювач; 5 – детектор; 8 – компаратор; 9 – вольтметр; 10 – лічильник; $R_1 \dots R_4$ – тензорезистори

Блок управління виконаний на сучасній елементній базі й дозволяє з необхідною точністю вимірювати режими циклічного навантаження зразків конструкційних матеріалів. Тензометричні резистори R_1, R_2, R_3, R_4 наклеєні безпосередньо на важіль випробувальної машини таким чином, що дають можливість одержати максимальну чутливість вимірювального тензомоста, який живиться напругою 12 В (опір тензорезисторів ~ 400 Ом). Інструментальний підсилювач AD620 1 з коефіцієнтом підсилення $\eta = 50$ забезпечує чутливість 0,3 В на 100 кг сили деформації важеля. Вихід інструментального підсилювача виведено на задню панель пристрою. Налаштування інструментального підсилювача дає можливість тарувати установку і встановлювати задані початкові навантаження.

Для зменшення впливу шумів сигнал з виходу інструментального підсилювача фільтрується в фільтрах 2 і 3 підсилюється підсилювачем 4. Детектор середнього значення 5 виділяє середнє значення сигналу навантаження зразка (по змінній складовій), яке масштабується підсилювачем 6 і вимірюється вольтметром 9. Масштабування встановлено так, що індикатор

вольтметра показує середнє значення зміни навантаження на важелі.

Для підрахунку циклів навантаження змінний сигнал підсилюється в підсилювачі 7 і за допомогою компаратора 8 перетворюється в прямокутні імпульси. Кількість імпульсів виводиться на табло лічильника, який дозволяє зареєструвати максимально 99 000 000 циклів навантаження.

Технічні характеристики установки

Максимальне зусилля на важелі.....3,0 кН
 Тип зразкабалковий
 Частота навантаження.....0,1...100 Гц
 Габарити680×445×490 мм
 Вага.....560 Н

Обробка результатів випробувань

На основі проведених випробувань для трьох однакових призматичних зразків сталі st 3852 були отримані дані швидкостей та відповідні їм значення довжин поширення втомної тріщини. Ці довжини були перераховані у відповідні значення розмаху КІН за наступними формулами [5]

$$\Delta K_I(l) = (1 - R) K_{I \max}(l), \quad (2)$$

де R – асиметрія циклу навантаження;

$$K_{I \max}(l) = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot M_{\max}}{t \cdot b^{1,5}} \cdot F\left(\frac{l}{b}\right),$$

де

$$F\left(\frac{l}{b}\right) = \left(\frac{l}{b}\right)^{1/2} \left(1,99 - 2,47 \cdot \frac{l}{b} + 12,97 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^2 - 23,17 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^3 + 24,80 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right)$$

– безрозмірна поправочна функція; M_{\max} – максимальне значення згинного моменту у поперечному перерізі, що відповідає тріщині; b та t – висота та товщина зразка відповідно (див. рис. 1, а).

Побудовані таким чином КДВР сталі st 3852 наведені на рис. 3.

Для апроксимації експериментально отриманих даних було запропоновано наступне співвідношення [6]:

$$V(\Delta K_I) = V_0 \cdot \left(\frac{\Delta K_I - K_{th}}{K_{fc} - \Delta K_I} \right)^q, \quad (3)$$

де V_0, q – параметри апроксимації, що були визначені методом найменших квадратів.

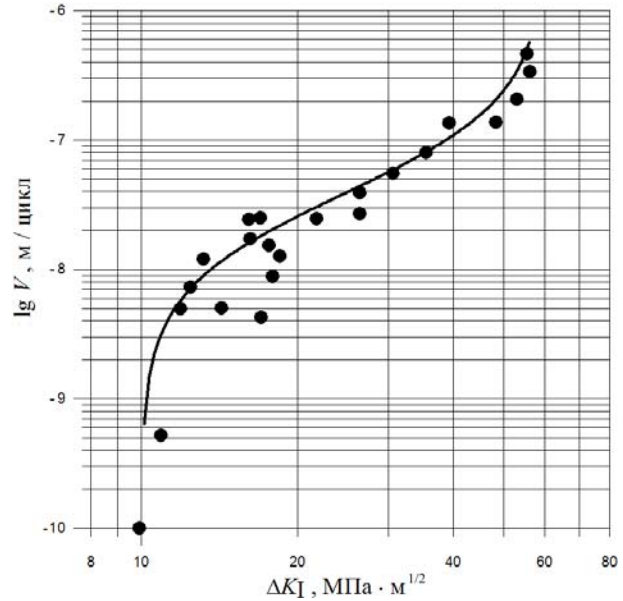


Рис. 3. КДВР сталі st 3852: точки – експериментальні дані; суцільна лінія – рівняння (3), де $V_0 = 7,88 \cdot 10^{-8}$ (м/цикл), $q = 0,81$

Аналогічні випробування були проведені для побудови КДВР сталі 09Г2С (рис. 4).

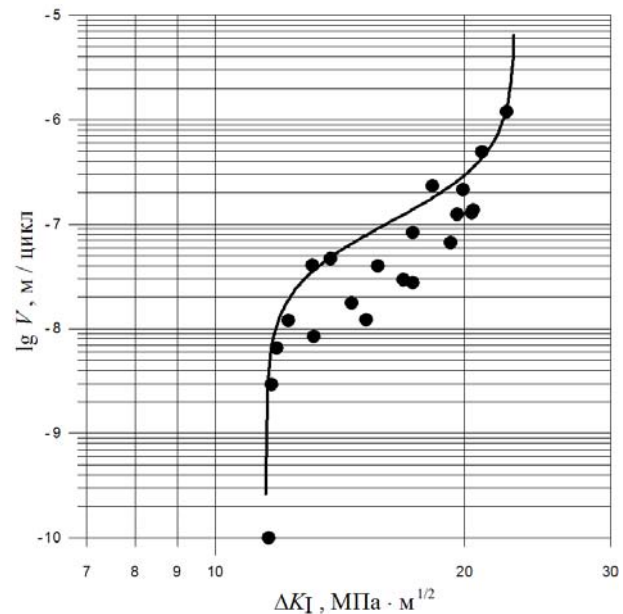


Рис. 4. КДВР сталі 09Г2С: точки – експериментальні дані, суцільна лінія – рівняння (3), де $V_0 = 1,36 \cdot 10^{-7}$ (м/цикл), $q = 0,74$

Висновки

1. Напрацьована сталь st 3852 має рівень порогового значення КІН, що не перевищує 10 МПа·м^{1/2} і є меншим приблизно на 11 % від аналогічного показника для ненапрацьованої сталі 09Г2С, а величина критичного значення

$K_{IH} - K_{fc}$ для сталі st 3852 є вищою, ніж у сталі 09Г2С. Це свідчить про високі характеристики опору поширення втомної тріщини сталі st 3852 навіть у напрацьованому стані.

2. Швидкість росту втомної тріщини за циклічного навантаження у сталі 09Г2С вища, ніж у сталі st 3852, що підтверджує її низьку стійкість до втомного руйнування.

3. Створена випробувальна установка забезпечує дослідження зразків на зародження та поширення втомних тріщин у конструкційних матеріалах з одночасним реєструванням необхідної інформації – кількості циклів та рівня навантаження. Завдяки конструкційним рішенням зведено до мінімуму власні шуми установки, що дозволяє ефективно застосовувати метод АЕ для моніторингу розвитку тріщини від моменту її зародження і аж до руйнування зразка.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ярема, С. Я. Исследование роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения [Текст] / С. Я. Ярема // Физ.-хим. механика материалов. – 1977. – № 4. – С. 3-21.
2. Андрейкив, А. Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций [Текст] / А. Е. Андрейкив, А. И. Дарчук. – К.: Наук. думка, 1992. – 183 с.
3. Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов [Текст]: сб. науч. тр. / под. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1981. – 314 с.
4. Серенсен, С. В., Машины для испытаний на усталость [Текст] / С. В. Серенсен, М. Е. Гарф, Л. А. Козлов. – М.: Машгиз, 1957. – 404 с.
5. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик сопротивления развитию трещины (трещиностойкости) при циклическом нагружении [Текст]: метод. указ. – Львов: ФМИ АН УССР, 1979. – 115 с.
6. Механика разрушения и прочность материалов [Текст] : справ. пособие в 4 т. – К.: Наук. думка, 1988.– Т. 1: Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, О. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – 488 с.

Надійшла до редколегії 02.04.2010.

Прийнята до друку 19.04.2010.