УДК 621.643.002

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ ТА ЇЇ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

Р.Т. Мартинюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: snp@nung.edu.ua

Представлено експериментальні дослідження, спрямовані на побудову кінетичних діаграм втомного руйнування трубної сталі та її зварного з'єднання і визначення характеристик тріщиностійкості, необхідних для розрахунку довговічності трубопроводів на стадії росту втомних тріщин.

Також, описана методика для визначення характеристик тріщиностійкості машиною для циклічних випробовувань. За результатами випробовувань побудований графік росту тріщин.

Визначено циклічну тріщиностійкість матеріалів і побудовано діаграму втомного руйнування. Показані результати обробки кінетичних діаграм втомного руйнування для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості трубної сталі марки Х70 для зразка зі зварним швом і без зварного шва.

Ключові слова: циклічна тріщиностійкість, втомне руйнування, довговічність трубопроводів.

Представлены экспериментальные исследования, направленные на построение кинетических диаграмм усталостного разрушения трубной стали и ее сварного соединения и определения характеристик трещиностойкости, необходимых для расчета долговечности трубопроводов на стадии роста усталостных трещин.

Также, описана методика для определения характеристик трещиностойкости машиной для циклических испытаний. По результатам испытаний построен график роста трещин.

Определена циклическая трещиностойкость материалов и построена диаграмма усталостного разрушения. Показаны результаты обработки кинетических диаграмм усталостного разрушения для определения характеристик циклической трещиностойкости трубной стали марки Х70 для образца со сварным швом и без сварного шва.

Ключевые слова: циклическая трещиностойкости, усталостное разрушение, долговечность трубопроводов.

Experimental researches directed on drawing of pipe steel and its welding joint kinetic fatigue destruction diagrams as well as determination of crack resistivity characteristics, necessary for computation of pipelines durability on the stage of fatigue cracks growth are presented in the article.

Procedure for determination of crack resistivity characteristics by means of machine intended for cyclic tests is also described in the article. According to the tests results a graph of cracks growth is drawn.

Cyclic crack resistivity of materials is determined and the diagram of fatigue destruction is drawn. Results of kinetic fatigue destruction diagrams intended for determination of cyclic crack resistivity characteristics of pipe steel X70 (as a model) with and without welding joint are showed.

Keywords: cyclic crack resistivity, fatigue destruction, pipelines durability.

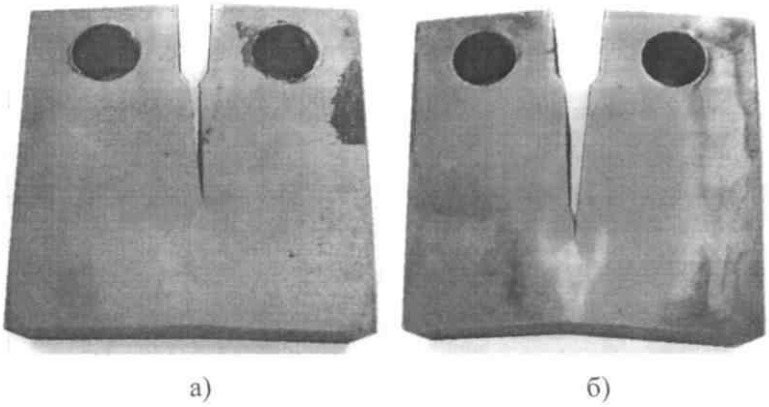
Для досліджень циклічної тріщиностійкості використано компактний зразок, навантажений за силовою схемою позацентрового розтягу (рис. 1).

Відносно незначні розміри зразка дають змогу використовувати його при обмежених габаритах заготовки. Матеріал зразка, що випробовується, відрізняється швидким зростанням коефіцієнта інтенсивності напружень зі збільшенням довжини тріщини, високим градієнтом напружень (КІН) на лінії тріщини та дещо низькими значеннями зусиль для досягнення заданого значення *К* (КІН).

Зразок виготовлений згідно з ГОСТ 25.506-85. Методика для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості реалізована на машині для циклічних випробувань ЦЦМПу-10 (рис. 2).

Гідропульсатор ЦДМПу-10 (рис. 3) – випробувальна машина, що створює на зразку навантаження з амплітудою до 100 кН, яке змінюється циклічно. Машина має два робочих циліндри – верхній *2* і нижній *3*, об'єднані в одну конструкцію двома колонами *4* і *5* з нерухомою поперечиною *6*. Зразок *1* встановлюють між поперечиною *6* і тягою *7* поршня нижнього робочого циліндра *3*. Тяга *7* з'єднана з тягою *8* поршня верхнього циліндра *2* двома стрижнями *9* і *10*, утворюючи силову раму машини. Вона може переміщуватися у вертикальному напрямі відносно нерухомої поперечини *6*. Від насосної установки *11* мастило трубопроводами подається у верхній і нижній циліндри, а також в циліндр маятникового силовимірювача *12*. Навантаження на зразку створюється за рахунок тисків у верхньому і нижньому циліндрах. Для створення на зразку розтягувальних зусиль верхній циліндр оснащений буферною камерою *13*, заповненою інертним газом (азотом чи аргоном) до тиску 2,5 МПа (25 атм) від балона *14* через розподілювач *15*.

Пульсуюче навантаження на зразку створюється за рахунок циклічної зміни тиску в нижньому циліндрі за допомогою пульсатора, циліндр 16 якого увімкнутий у мастильну магістраль, що з'єднує нижній циліндр *3* з насосом *11*. Поршень циліндра пульсатора здійснює коливний рух за допомогою шатунного механізму *17*, приводом якого є електричний двигун.



а – без зварного шва; *б* – зі зварним швом

Рисунок 1 – Зразок з крайовою тріщиною

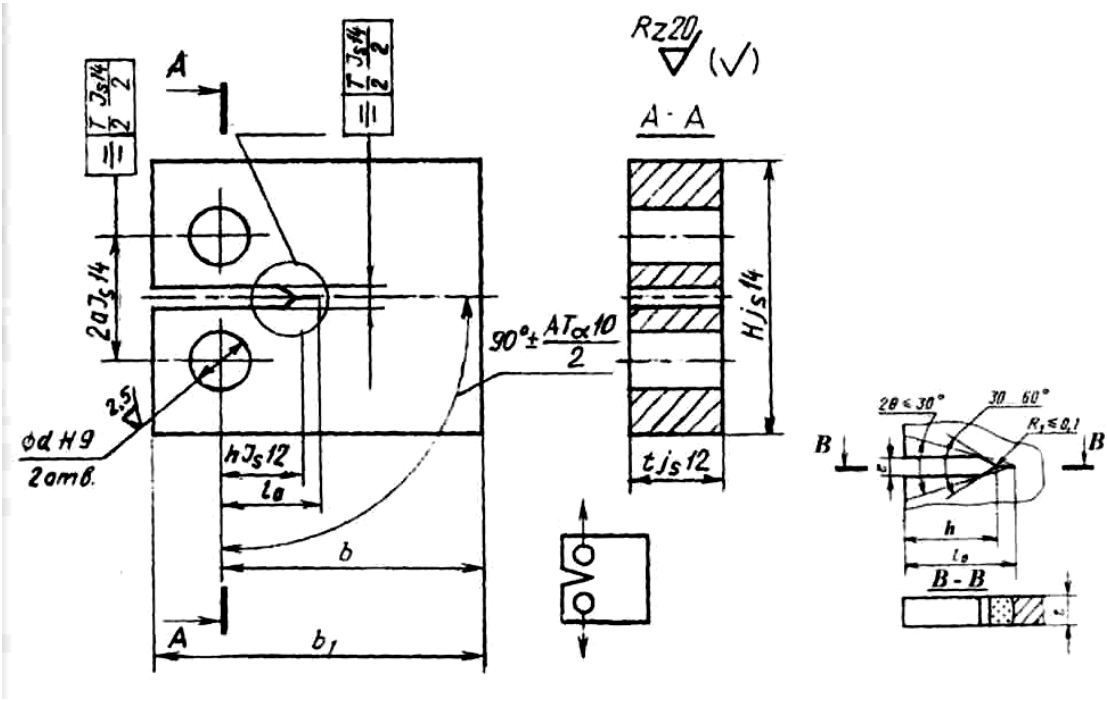


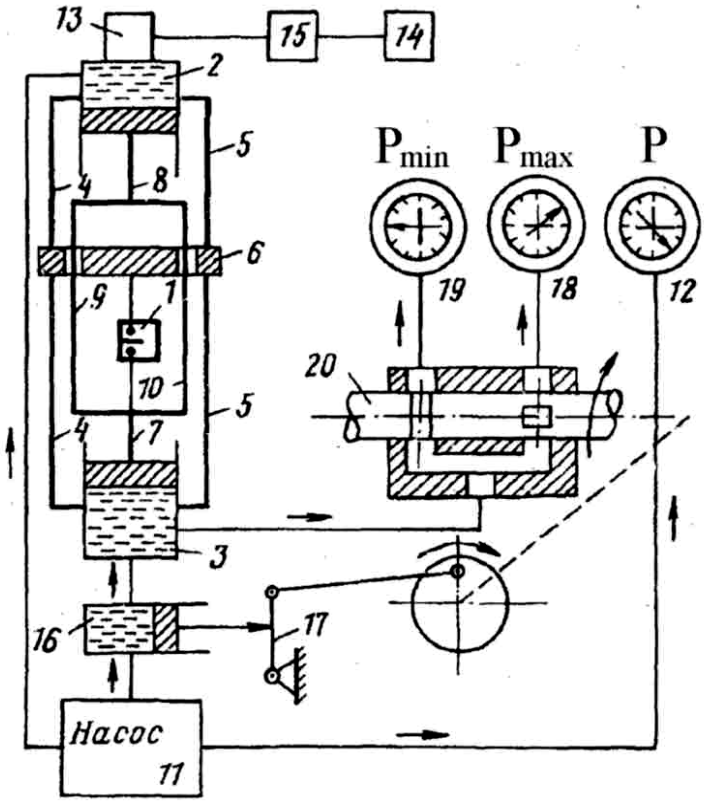
Рисунок 2 – Прямокутний компактний зразок з крайовою тріщиною для циклічних випробувань і силова схема навантаження

Під час руху поршня пульсатора відбувається періодичне відсмоктування мастила з нижнього циліндра, що супроводжується циклічною зміною навантаження на зразку. Максимальний і мінімальні тиски у нижньому робочому циліндрі вимірюються відповідно манометрами *18* (p_{max}) і *19* (p_{min}), з'єднаними з циліндром через золотниковий пристрій *20*. Вал золотника обертається синхронно з коливальним рухом поршня пульсатора *16*. За максимального тиску циліндр 3 з'єднується з манометром 18, за мінімального – з манометром *19*.

За максимального (p_{max}) і мінімального (p_{min}) тисків навантаження F_{max} і F_{min} на зразках визначають за різницею показів силовимірювача *12* і манометрів *18* і *19*.

Випробовування проводять поетапно, підтримуючи постійними всі параметри циклу навантаження. Бажано, щоб кожен етап відповідав випробовуванню одного зразка. Тривалість етапів повинна забезпечити не менше 10 вимірів на кожному з них. На кожному наступному етапі рекомендується плавно збільшувати навантаження: у межах другої ділянки діаграми втомного руйнування – на 10÷30%, на першій і третій – 5÷10%. Дослідження зразків здійснюють з однієї установки візуально за допомогою катетометра В-630.

Вимушені перерви в роботі повинні бути мінімальними, число циклів навантаження за час виходу машини на робочий режим не враховується. Якщо найбільший коефіцієнт інтенсивності напружень циклу з початку досліджень близький до порогового і не більший за значення, що відповідає швидкості росту тріщини 10^{-8} м/цикл (перша ділянка діаграми), навантаження знижують поступово на 10÷15%, а при $v = 10^{-9}$ м/цикл – не більше як на 5% і підтримують на даному рівні, доки вимірювальний пристрій не перевищить $(K_{max}/\sigma_{0,2})/2$.



1 – зразок; *2, 3* – верхній і нижній робочі циліндри; *4, 5* – колони; *6* – нерухома поперечина; *7* – тяга поршня нижнього робочого циліндра; *8* – тяга поршня верхнього робочого циліндра; *9, 10* – стрижні силової рами; *11* – насосна установка; *12* – циліндр маятникового силовимірювача з манометром; 13 – верхній циліндр з буферною камерою; *14* – балон; *15* – розподілювач; *16* – циліндр пульсатора; *17* – шатунний механізм; *18, 19* – манометри максимального і мінімального тисків

Рисунок 3 – Гідравлічна схема пульсатора ЦДМПу-10

У випадку затримки росту тріщини протягом $2\cdot10^5$ циклів навантаження збільшують до попереднього рівня, а після «зрушення» тріщини – знижують на величину вдвічі меншу.

На кожному з етапів досліджень за результатами l_i, N_i будують графік росту тріщини (рис. 4), на якому візуально оцінюють розсіювання експериментальних точок і виокремлюють перехідні періоди. Попередньо визначають швидкість за формулою

$$v=\frac{\Delta l}{\Delta N}.$$

Поточне значення (КІН) для кожного l_i, та N_i визначають за формулою

$$K=\frac{P^*}{t\cdot\sqrt{b}}\cdot Y(\varepsilon), \qquad (1)$$

де: P^* – граничне допустиме значення циклу;

$\varepsilon=l/b$ – відносна довжина тріщини ($0{,}2\le\varepsilon\le0{,}9$).

$$Y(\varepsilon)=\left\{\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^2}\times\right. \qquad (2)$$

$$\left.\times\left(9{,}172-13{,}829\cdot\varepsilon+11{,}822\cdot\varepsilon^2-3{,}056\cdot\varepsilon^3\right)\right\}^{1/2}.$$

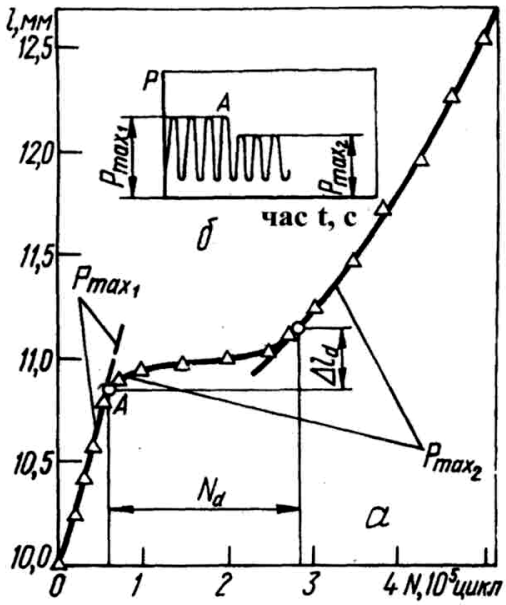


Рисунок 4 – Крива росту тріщини (а) і схема зміни навантаження (б)

Визначення циклічної тріщиностійкості матеріалів і побудову етичної діаграми втомного руйнування здійснюють у такій послідовності:

1. Вимірюють штангенциркулем у трьох перерізах з точністю до 0,1 мм товщину t і ширину b зразка та обчислюють їх середнє значення.

2. Відполіровують смугу шириною 1 см в області концентратора для спостереження за ростом тріщини.

3. Умикають машину та вимірювальні прилади і прогрівають їх протягом 30-ти хвилин; готують і прогрівають систему вимірювання (блок живлення, шлейфовий осцилограф, комутаційну апаратуру).

4. Виконують тарування вимірювальної системи установки.

5. Встановлюють компактний зразок у захоплювачі для розтягування.

6. Наводять початкову втомну тріщину довжиною не менше 2 мм, приклавши до зразка циклічне зусилля розтягу з коефіцієнтом асиметрії R=0,1. При цьому, після поширення тріщини на певну довжину фіксують мінімальне і максимальне зусилля і число циклів.

7. Проводять випробування зразка із початковою тріщиною на першому етапі; (відповідає ділянці I кінетичної діаграми втомного руйнування), підтримуючи постійними усі параметри циклу навантаження, забезпечивши 10 вимірів Δl і ΔN, $P_{max.}$ Визначають $P_{max.}$ (K_{max}) циклу для зрушення тріщини.

8. Визначають K_{th} з отриманими результатами першого етапу за відсутності росту тріщини протягом 10^7 циклів при найбільшому навантаженні циклу (відповідає $v = 10^{-10}$ м/цикл).

9. Проводять випробування на другому етапі, збільшуючи навантаження на 10÷20% (II ділянка кінетичної діаграми втомного руйнування), забезпечуючи при цьому не менше 10-ти вимірювань.

10. Проводять випробовування на третьому етапі (ділянка III - великих швидкостей), збільшуючи навантаження на 5-10% для забезпечення 5-ти вимірювань Δl і ΔN, $P_{max.}$ циклу.

11. Розраховують K_{fc} при зростаючому $K_{max.}$ і довжині тріщини, що відповідає переходу до спонтанного руйнування ($l \approx 0{,}6 \cdot b$).

12. Розраховують поточне значення коефіцієнта інтенсивності напружень для кожної точки, де проводиться вимірювання.

13. За сукупністю отриманих вимірювань у кожній точці будують у логарифмічній системі координат залежність v-K_{max} (кінетичну діаграму втомного руйнування) і проводять посередині смуги розсіювання даних криву швидкості росту втомних тріщин.

14. Визначають за кінетичною діаграмою втомного руйнування при v=10^{-7} м/цикл величину K^*.

15. Заносять результати вимірювань і обчислень до таблиці та оформляють протокол випробовувань.

Нижче наведено результати обробки кінетичних діаграм втомного руйнування для визначення відповідних характеристик циклічної тріщиностійкості трубної сталі Х70, отримані для зразка без зварного шва і зі зварним швом.

Зразок компактний без зварного шва, $b \times t \times H$×50×18×60 мм, початкова довжина втомної тріщини l_0= 9,45 мм.

Умови випробовувань:

- температура, 20 °С;
- установка – ЦДМПу-10 з синосоїдальною формою циклу;
- коефіцієнт асиметрії циклу – 0,1-0,2;

частота циклів – 14 Гц.

Всі дані оброблені методом найменших квадратів для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості сталі. Таким чином, встановлена степенева залежність для розрахунку швидкості росту тріщини залежно від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень, а також визначена критична (руйнуюча) величина. Кінетична діаграма втомного руйнування трубної сталі без зварного шва (рис. 5).

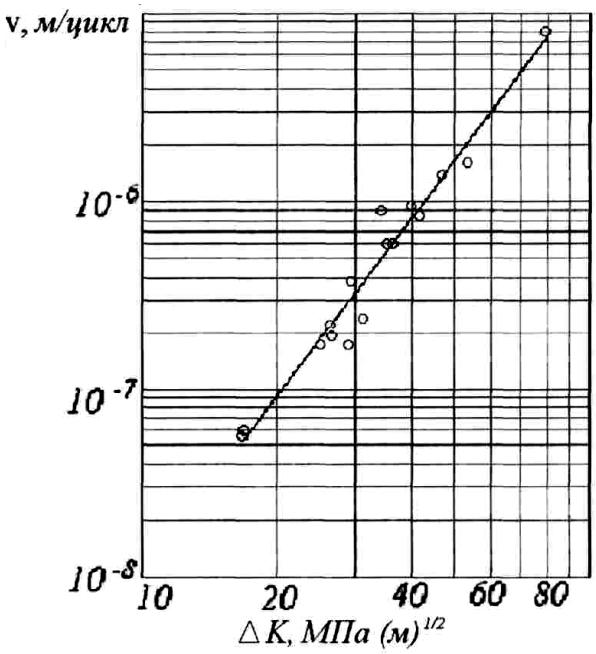


Рисунок 5 – Кінетична діаграма втомного руйнування трубної сталі без зварного шва

Зразок компактний без зварного шва, $b \times t \times H$×50×18×60 мм, початкова довжина втомної тріщини l_0= 10,5 мм.

Умови випробовувань:

- температура – 20 °С;
- установка - ЦДМПу-10 з синосоїдальною формою циклу;
- коефіцієнт асиметрії циклу –0,1-0,2;
- частота циклів 14 Гц.

На основі отриманих даних, швидкість росту втомних тріщини описується в цьому випадку залежністю $v = 10^{-7} (\Delta K/K^*)^n$. Знаходимо, що n=2.12, K^*=21,8МПа(м)$^{1/2}$, а критична величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_{fc} становить 84,1 МПа(м)$^{1/2}$.

Кінетична діаграма втомного руйнування трубної сталі зі зварним швом (рис. 6).

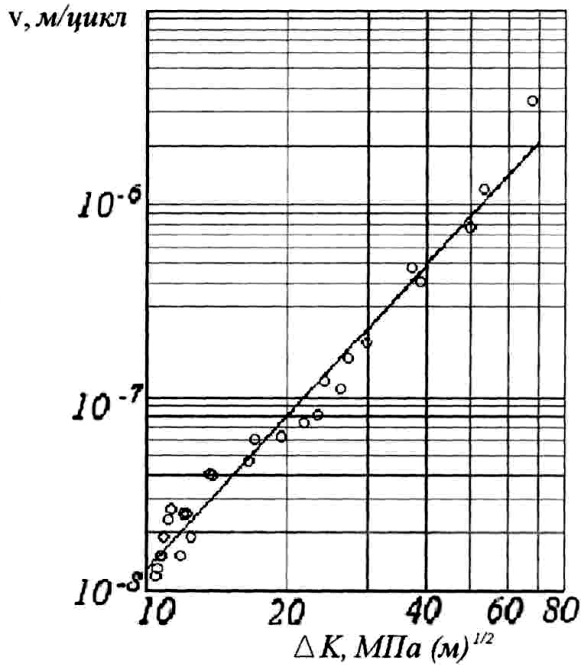


Рисунок 6 – Кінетична діаграма втомного руйнування зварного шва

Висновок. Одним з основним показником безаварійної роботи трубопровідних систем є тріщиностійкість. Тому визначення чинників, що впливають на її виникнення та ріст, побудова кінетичних діаграми втомного руйнування – один з методів визначення експлуатаційної надійності та довговічності трубопровідних систем.

Література

1 Грудз В.Я. Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання. Комплексна галузева методика / Грудз В.Я., Гораль Л.Т., Степ'юк М.Д., Мартинюк Р.Т., Запухляк В.Б., Порада Я.Р. // Прогнозування росту втомних тріщин в зварних з'єднаннях трубопроводів під тиском з урахуванням залишкових напружень. – Івано-Франківськ, 2009.

2 Мартинюк Р.Т. Вплив якості спорудження нафтопроводів на їх експлуатаційну надійність [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 08.04.10 / Мартинюк Ростислав Тарасович. – Івано-Франківськ, 2010. – 162 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 14.01.11
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.***