

## ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

Л.Ю. Козак, В.Г. Панчук, О.Л.Козак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42351,  
e-mail: l u b 5 3 @ u k r . n e t

*Представлено методичні аспекти і обґрунтовано необхідність дослідження циклічної тріщиностійкості трубних сталей. Наведено дослідження трубних сталей на циклічну тріщиностійкість. Подається коротка характеристика основних концепцій механіки руйнування. Наводиться детальний опис, схема і принцип роботи установки для визначення циклічної тріщиностійкості з використанням балочних зразків. Докладно описано спосіб визначення силових і деформаційних параметрів у експериментах. Наведено загальний вигляд кінетичної діаграми втомного руйнування і аналітичні залежності.*

Ключові слова: трубні сталі, циклічна тріщиностійкість, втомні тріщини, механіка руйнування

*Представлены методические аспекты и обосновано необходимость исследования циклической трещиностойкости трубных сталей. Подается краткая характеристика основных концепций механики разрушения. Приведено описание, схема и принцип работы установки для определения циклической трещиностойкости с использованием балочных образцов. Детально описан способ определения силовых и деформационных параметров в экспериментах. Приведен общий вид кинетической диаграммы усталостного разрушения и аналитические зависимости.*

Ключевые слова: трубные стали, циклическая трещиностойкость, усталостные трещины, механика разрушения

*In the article presented are the methodical aspects of pipe steels fatigue crack growth resistance as well as substantiated is the necessity of its research. A brief analysis of the basic concepts of fracture mechanics are given. The description principles mode of operation of the device for determining fatigue crack growth resistance by using beam samples is suggested. The detailed description of the way of determination force and deformation parameters during experiments is given. The general view of kinetics diagram of fatigue fracture and analytical dependences is shown.*

Keywords: pipe steels, fatigue crack growth resistance, fatigue cracks, fracture mechanics

Нафтогазотранспортна система України володіє широкою мережею трубопроводів, загальна протяжність яких становить понад 35 тис. км. Надійність постачання енергоносіїв всередині нашої країни і транзит їх в інші країни світу залежить від технічного стану трубопроводів і його збереження. Однак в процесі довготривалої їх експлуатації (понад 20 років) відбувається старіння трубних сталей нафтогазопроводів. Під дією деформацій, що виникають через вплив високих тисків, втомних напружень, дії корозивно-агресивних середовищ суттєво змінюється структура і механічні властивості трубних сталей. Старіння проявляється у підсиленні одних властивостей, таких як межа плинності і меншою мірою міцності, та пониженням інших, таких як ударна в'язкість, тріщиностійкість, пластичність (зменшується відносне поперечне звуження і залишкове відносне подовження). Сучасні методи розрахунку міцності магістральних трубопроводів базуються на визначенні допустимого значення максимального тиску з урахуванням механічних властивостей трубних сталей, розміру труб і рівномірності розподілу напружень в стінці трубопроводу, що практично унеможлиблює визначення зниження рівня надійності МТ під час їх експлуатації. Через це виникають проблеми з запобіганням аварійному руйнуванню. Аварії на магістральних трубопроводах є загальносвітовою проблемою, наслідком якої є значні ма-

теріальні втрати та нанесення шкоди навколишньому середовищу. Тому сьогодні важливо розробити наукові та практичні основи продовження ресурсу експлуатації трубопроводів.

Всі стандартні механічні параметри, які використовуються під час розрахунку трубопроводів на міцність, є інтегральними характеристиками, що не враховують виникнення тріщин, у той час, як майже всі руйнування, за винятком корозійних, відбуваються через зародження і поширення тріщин. Відомо, що руйнування трубопроводів в процесі експлуатації пов'язано з циклічним навантаженням металу труб, оскільки тільки циклічне руйнування є чутливим до концентраторів напружень (дефектів) і тільки циклічне навантаження викликає втомне і деформаційне старіння трубних сталей. Тому велике значення має дослідження тріщиностійкості металу труб магістральних трубопроводів як для визначення оптимального навантаження нафтогазопроводів, що перебувають в експлуатації, так і оцінки їх залишкового ресурсу [1-2].

Надійність і довговічності елементів конструкцій має особливо важливе наукове і прикладне значення в різних галузях промисловості і економіки, зокрема у випадках, коли об'єкти або споруди експлуатуються тривалий час. Магістральні і локальні нафто- і газопроводи є прикладами таких об'єктів. Для оцінки ресурсу їх елементів конструкцій, зокрема в умовах їх

тривалості експлуатації, необхідно враховувати факт пошкодження конструкційних матеріалів під час експлуатації, виникнення в них таких дефектів, як тріщини і кінетику їх розвитку. Ці питання, як правило, вирішують на основі концепцій і методів механіки руйнування і міцності матеріалів. В основу цього наукового напрямку закладено концепції зародження і розповсюдження тріщин у деформованому твердому тілі. Найважливішим параметром опору матеріалу руйнуванню у випадку поширення тріщин є його тріщиностійкість [2].

Інтенсивність розвитку механіки руйнування обумовлено універсальністю і простотою вихідних концепцій, відповідно до яких різноманітні види навантажень твердих тіл з точки зору створених ними напружених станів можуть бути описані коефіцієнтами інтенсивності напружень (КІН), в той час як різноманітні стани можуть характеризуватись критичними і пороговими значеннями цих коефіцієнтів. Інваріантність таких значень КІН за певних умов навантаження свідчать про можливість їх використання як нових механічних характеристик матеріалів [1, 3].

У випадку статичних навантажень одним із інженерних розрахункових параметрів міцності матеріалів є критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН)  $K_{Ic}$ , що характеризує тріщиностійкість матеріалів. Загалом  $K_I$  використовується для оцінки навантаження тіла з тріщиною і визначається за формулою

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot \ell \cdot \gamma}, \quad (1)$$

де:  $\sigma$  – середнє напруження по тілу деталі;  
 $\ell$  – довжина тріщини;  
 $\gamma$  – параметр, який залежить від форми зразків і геометрії тріщин.

В загальному випадку умова міцності при розтягу записується  $K_I < K_{Ic}$ .

Коефіцієнтом інтенсивності напружень визначається поле напружень у вершині тріщини і навколо неї. Цим коефіцієнтом визначається також те, що відбувається всередині зони пластичності.  $K_I$  є мірою всіх напружень і деформацій. Коли напруження і деформації у вершині тріщини досягають критичних значень, відбувається поширення тріщини. Це означає, що у випадку досягнення  $K_I$  критичного значення  $K_{Ic}$  відбудеться руйнування. Можна вважати, що  $K_{Ic}$  є константою матеріалу,  $K_{Ic}$  є мірою тріщиностійкості матеріалу, тому  $K_{Ic}$  ще називають в'язкістю руйнування у випадку плоского деформованого стану. Для матеріалів з малою в'язкістю руйнування допускаються тільки маленькі тріщини.

Для оцінки міцності у випадку динамічних навантажень використовують діаграми, які відображають залежність швидкості росту втомної тріщини (ВТ)  $v = dl/dN$  за цикл від величини розмаху КІН ( $\Delta K$ ) або його максимального значення у циклі  $K_{max}$  (рис. 1). Ці діаграми називають кінетичними діаграмами втомного руйнування (КДВР).

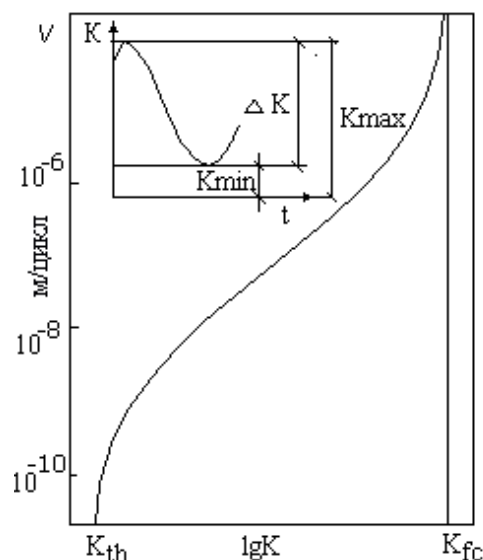


Рисунок 1 – Кінетична діаграма втомного руйнування

Циклічне навантаження змінюється від нуля до деякої позитивної величини (постійної амплітуди), а коефіцієнт інтенсивності напружень змінюється в інтервалі  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ , де  $K_{min} = 0$ . Поширення тріщини за один цикл за циклічного навантаження (швидкість поширення тріщини) є величиною, яка залежить від амплітуди зміни інтенсивності напружень  $\Delta K$ :

$$\frac{da}{dn} = f(\Delta K) = f(2\sigma_a \sqrt{\pi a}); \quad (2)$$

де  $\sigma_a$  – амплітуда зміни напруги.

Циклічне напруження визначається двома параметрами: амплітудою  $\sigma_a$  і середнім напруженням  $\sigma_m$ . Якщо  $\sigma_m = \sigma_a$ , то мінімальне напруження за цикл дорівнює нулю. Це означає, що максимальна інтенсивність напружень за цикл  $K_{max} = \Delta K$ . Якщо  $\sigma_m > \sigma_a$ , то максимальна інтенсивність напружень  $K_{max} = (\sigma_m + \sigma_a)\sqrt{\pi a}$  перевищує значення  $\Delta K$ . Швидкість росту тріщини залежить від максимальної інтенсивності напружень. Тому узагальнюючою формою рівнянь (2) є співвідношення [3]

$$\frac{da}{dn} = f_1(K_{max}, \Delta K) = f_2(R, \Delta K);$$

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}; \quad (3)$$

де  $R$  – коефіцієнт асиметрії циклу.

Важливою особливістю КДВР є їх інваріантність від ряду умов досліджень, що має дуже важливе значення у випадку використанні цих діаграм для прогнозування кінетики руйнування виробів та визначення залишкового ресурсу працездатності.

Побудова КДВР проводиться у відповідності з методичними вказівками РД 50-345-82 [4]. Базовим документом для побудови КДВР є експериментальна залежність зміни довжини тріщини зі збільшенням кількості циклів навантаження.

На рисунку 1 у логарифмічних координатах наведена КДВР, яка охоплює весь діапазон швидкостей росту тріщини (ШРТ) – від порогових значень КІН, які відповідають умові непоширення тріщини  $\Delta K_{th}$  (це швидкість ВТ, що відповідає приблизно  $10^{-10}$  м/цикл), аж до гранично високих значень КІН, що відповідають спонтанному поширенню тріщини  $K_{max} = K_{fc}$ .

Початкова, припорогова ділянка КДВР обмежена зліва асимптотою, пов'язаною з виходом кривої на порогові значення  $\Delta K_{th}$ , крайнє ліве положення, якої відповідає умові повної зупинки тріщини. Враховуючи значні експериментальні складності оцінки кінетики тріщин за умови  $v \leq 10^{-10}$  м/цикл, то під час експериментів обмежуються для  $\Delta K_{th}$  величиною швидкості  $v \leq 10^{-10}$  м/цикл і вважають, що це і є порогові значення  $\Delta K_{th}$ .

Пороговий КІН відіграє важливе значення як показник довготермінової експлуатаційної надійності матеріалів у виробках. Тому особливе значення приділяється встановленню  $\Delta K_{th}$  зі структурою та іншими механічними характеристиками матеріалів. Одержані дослідження свідчать про досить складний характер структурної чутливості порогового КІН у порівнянні з іншими показниками, такими як  $K_{lc}$ , а також межею втоми.

Середню ділянку КДВР можна відобразити в логарифмічних координатах лінійною залежністю:

$$V = C(\Delta K)^n, \quad (4)$$

де  $C$  і  $n$  – константи.

Середня ділянка КДВР охоплює діапазон швидкостей росту тріщини  $10^{-9} \leq v \leq 10^{-6}$  м/цикл.

Верхня ділянка КДВР відповідає значному прискоренню росту ВТ, аж до спонтанного поширення тріщини у випадку, коли  $K_{max} = K_{fc}$ . Величина  $\Delta K_{fc}$  є важливою розрахунковою характеристикою для оцінки довговічності виробів. Верхня ділянка КДВР відхиляється від лінійної залежності. Для неї є характерним яскраво виражена немонотонність росту втомної тріщини, пов'язаної з наявністю стрибків.

Інваріантність КДВР регламентується стабілізацією ряд умов випробування. До них відносяться коефіцієнт асиметрії циклу і температури випробувань. Частота навантаження і форма циклу в визначеному інтервалі значень можуть не впливати на хід КДВР. Вплив товщини зразка на КДВР неоднозначний. Але, коли ріст втомної тріщини відбувається в умовах плоскої деформації, товщина зразка не відображається на ході кінетичної діаграми втомного руйнування.

Найбільш цікавим у випадку практичного використання КДВР для прогнозування довговічності конструкцій є припорогова ділянка. В цьому діапазоні навантаження швидкість росту тріщини в значній мірі залежить від структури, середовища і асиметрії циклу. Значна кількість досліджень направлена на встановлення зв'язку з припороговою тріщиностійкістю матеріалів з цими факторами.

Використання більш точного інструментарію механіки руйнування дасть змогу врахувати всю різноманітність умов експлуатації, деградації властивостей трубних сталей в результаті їх старіння і впливу навколишнього середовища, закономірності зародження і поширення тріщин. Це є важливим для магістральних трубопроводів, що вже використали проектний термін експлуатації. Оскільки будівництво нових МТ потребує значних капітальних затрат, а проектний ресурс не враховує всієї різноманітності довготривалої експлуатації, все більше застосування знаходить концепція напрацювання на ресурс, що базується на прогнозуванні конкретного залишкового ресурсу трубопроводу.

Загалом циклічні навантаження під час експлуатації, роблять чутливим матеріал труб до концентраторів напружень (дефектів), викликають втомне і деформаційне старіння і тим самим створюють умови для руйнування трубопроводів внаслідок поширення тріщин. Що стосується хімічної, електрохімічної корозії, абсорбції і наводнювання, то вони впливають лише на швидкість росту тріщин, тому велике значення має теоретичне і практичне дослідження циклічної тріщиностійкості.

Отже, для дослідження характеристик трубних сталей нами було вирішено застосувати методи механіки руйнування, а саме визначення циклічної тріщиностійкості трубних сталей. З цією метою було створено спеціальну установку.

Загальний вигляд установки дослідження матеріалів на циклічну тріщиностійкість та її схема наведені на рис. 2. Установка дає змогу досліджувати зразки 5 призматичної форми на консольний згин. Зразок закріплюється в нерухомий 4 і рухомий 8 захвати. Нерухомий захват 4 прикріплений з динамометром 2, що виконаний у вигляді пружної балки з тензодавачами, до масивної пластини 1, і є єдиним цілим зі станиною установи. Станина змонтована на рамі, де розміщено електродвигун та електрообладнання (на схемі не показано).

Рухомий захват утримує кінець зразка і з'єднаний за допомогою важеля 9 з тягою 11, яка може переміщатися по чергово угору і вниз з різними, наперед заданими амплітудами. Підшипниковий вузол 10 забезпечує їх рухоме з'єднання. Механічний привод пристрою (на рисунку не вказаний) забезпечує трифазний асинхронний електродвигун, що через пасову передачу приводить в рух кривошип зі змінним радіусом. Зміною радіуса кривошипа можна змінювати амплітуду коливання важеля 9 і захвата 8, за рахунок чого регулюється величина змінного навантаження на зразок 5.

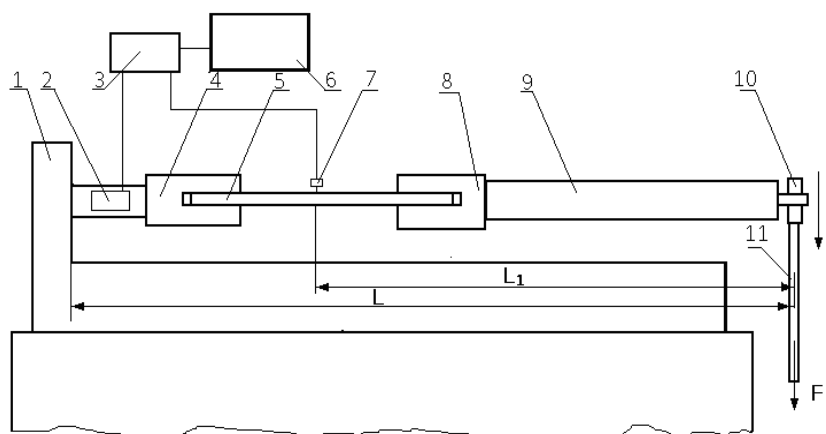
Амплітуду коливання важеля 9 за циклічного навантаження у більшості випадків підбирають так, щоб вона змінювалася від значень зусилля, близьких до нульових, до деякої додатної величини. Тоді коефіцієнт інтенсивності напружень змінюється в інтервалі

$$\Delta K = K_{max} \div K_{min},$$

де  $K_{min} = 0-0,05$ .



а)



б)

Рисунок 2 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) установки для визначення циклічної тріщиностійкості матеріалів

Тоді коефіцієнт асиметрії циклу наближатиметься до нуля. Можливі і інші співвідношення між максимальними і мінімальними значеннями коефіцієнта інтенсивності напружень, які задаються коефіцієнтом асиметрії циклу  $R = K_{\min} / K_{\max}$ .

Максимальну величину коефіцієнта інтенсивності напружень  $K$  у випадку випробування на консольний згин призматичних зразків (рис. 3) визначають за формулами:

$$K = \frac{4.12M}{b\sqrt{h^3}} \sqrt{\alpha^{-3} - \alpha^3}; \quad (5)$$

де:  $\alpha = 1 - \frac{l}{h}$  – коефіцієнт;

$M = FL_1$  – момент згину,  $F$  – сила;

$L_1$  – відстань між прикладеною силою і тріщиною;

$l$  – довжина тріщини;

$b, h$  – товщина та висота зразка відповідно.

Вимірювання довжини тріщини виконується оптичним методом, за допомогою мікроскопів, які розміщують з обох боків зразка. Заміри з обох боків зразка необхідні для контролю за рівномірністю росту поширення фронту тріщини за товщиною зразка, оскільки можливі перекося у випадку зміщення важеля і нерівномірності циклічного навантаження.

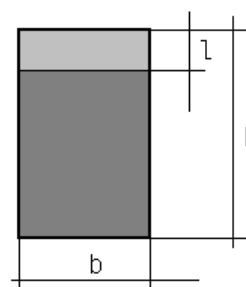


Рисунок 3 – Поперечний переріз зразка

Для визначення кількості циклів навантаження пристрій обладнаний лічильником кількості циклів.

До складу лабораторної установки входить комп'ютеризована вимірювальна система, яка дозволяє в режимі реального часу контролювати процес динамічного навантаження зразка і його деформації.

До аналогової частини вимірювальної установки входить два ідентичні вимірювальні канали (рис. 4). Аналоговий сигнал розбалансування тензометричного вимірювального моста поступає на диференціальні входи інструментального підсилювача, який забезпечує попереднє підсилення сигналу. Нормалізатор виконує остаточне підсилення і установлення нуля-

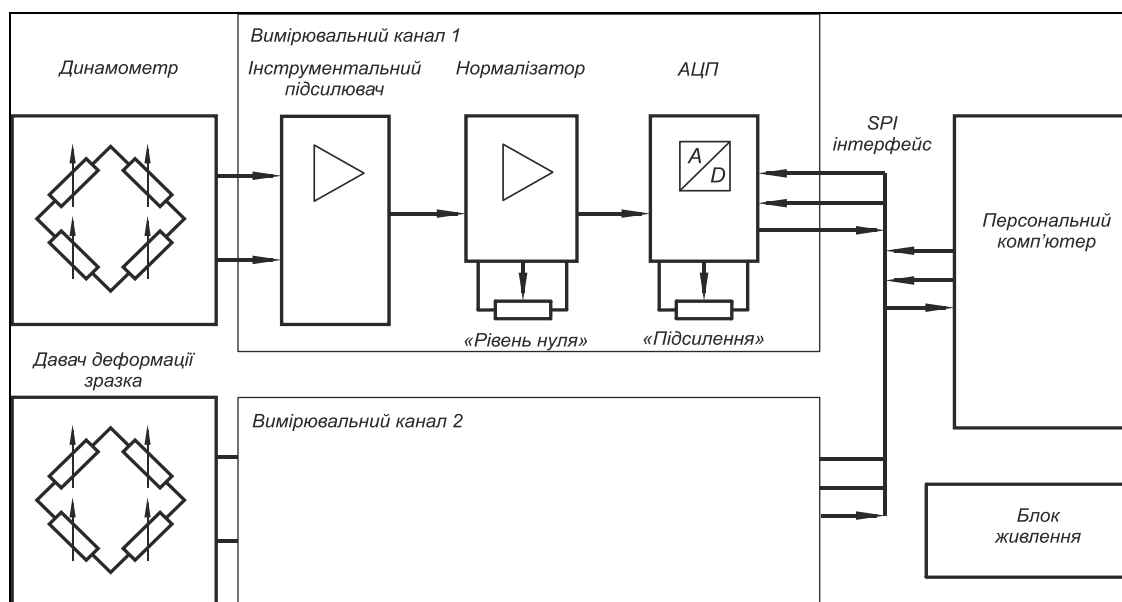


Рисунок 4 – Структурна схема вимірювальної системи

вого рівня сигналу. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) здійснює перетворення аналогового сигналу в цифрову форму із заданою точністю. Зв'язок АЦП із персональним комп'ютером через паралельний порт виконується трипровідним синхронним послідовним інтерфейсом.

До складу вимірювальної системи входить також спеціальне програмне забезпечення, що здійснює керування процесом вимірювання, попередню обробку, зберігання та відображення результатів вимірювання.

Концепції механіки руйнування можна застосовувати для оцінки поточного технічного стану магістральних трубопроводів (МТ), що дасть змогу прогнозувати їх залишковий ресурс. Характеристики циклічної тріщиностійкості – порогові значення коефіцієнта інтенсивності напружень, кінетична діаграма втомного руйнування та граничні значення КІН, що відповідають спонтанному поширенню тріщини, є локальними характеристиками матеріалу, що враховують наявність дефектів. Вони є більш чутливими до впливу середовищ і структури порівняно з втомними напруженнями, які відображають інтегральні характеристики матеріалу. Показники міцності і пластичності як інтегральні характеристики механічної поведінки матеріалу часто не чутливі до зміни стану матеріалу внаслідок його експлуатації.

### Література

- 1 Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин. – М.: Металургия, 1986. – 294 с.
- 2 Гумеров А.Г. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалеев, Г.В. Журавлев, Ф.И. Бадиков – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 231 с.
- 3 Броек Д. Основы линейной механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1987. – 368 с.
- 4 РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Из-во стандартов, 1983. – 96 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
29.04.11

Рекомендована до друку професором  
Грудзом В.Я.