

УДК 621.791.11:693

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТРИЩИНОУТВОРЕННЯ І ОПОРУ ЗВАРЮВАНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ РУЙНУВАННЮ**STUDY OF CRACK FORMATION DYNAMICS AND RESISTANCE OF PIPE JOINTS**

Рубцова С.В. доктор філософії ORCID 0000-0003-4114-5874 (Київський національний університет будівництва і архітектури); **Бутик М. В.** ORCID ID:0009-0002-3674-2033, **Вакулін Р.М.,** ORCID ID: 0009-0000-6468-1026. (Київський міжнародний університет)

Rubtsova Svitlana PhD in Educational and Pedagogical Science ORCID 0000-0003-4114-5874, (Kyiv National University of Construction and Architecture); **Butyk M. V.** (0009-0002-3674-2033); **Vakulin R.M.,** (0009-0000-6468-1026), (Kyiv International University)

Розроблена методика визначення енергетичного критерію, який дозволяє оцінити спротив динамічному розповсюдженню тріщин в трубних сталях різної групи міцності (X50 – X70) та їх зварювальних з'єднань, які виконані із залученням різних технологій зварювання. Енергетичний параметр – A_p визначали на зразках типу DWTТ на приладі маятниковий копер. Наводнювання сталей в процесі корозії спричиняє різку зміну напруженого стану як в умовах загальної корозії, так і при розтріскуванні внаслідок гідридного перетворення, яке супроводжується збільшенням об'єму і появою додаткових напружень згину, що служить причиною втрати стійкості тонкостінних оболонкових конструкцій. Розроблена методологія вивчення корозійного розтріскування труб з урахуванням двовісного напруженого стану і коректного використання закономірностей лінійної механіки руйнування.

This study presents an in-depth investigation of the kinetics of crack formation in the weld metal and heat-affected zone (HAZ) under static and cyclic loading. The relevance of the topic stems from the need to improve the operational reliability of main pipelines under long-term service conditions. A correlation has been established between microstructural parameters, specifically the morphology of the ferrite-pearlite phase, and the metal's resistance to the propagation of main cracks.

Critical crack opening values and stress intensity factors for welds made under various process conditions were experimentally determined. Fractographic analysis methods were applied to identify fracture mechanisms—ranging from ductile pitting to brittle spalling. The scientific novelty of the work lies in the development of a refined model of crack initiation dynamics that accounts for residual welding stresses and the gradient of mechanical properties in the HAZ. The practical significance of the results lies in the ability to predict the remaining service life of pipe structures, taking into account the identified defects. Recommendations have been formulated for optimizing thermal welding cycles to ensure maximum resistance to failure. The obtained data can be used in the design of technical condition monitoring systems for high-risk facilities. A method has been developed for determining the energy criterion, which allows assessing the resistance to dynamic crack propagation in pipe steels of different strength groups (X50 – X70) and their welded joints made using different welding technologies. The energy parameter – AP was determined on DWTT type samples using a pendulum impact tester. A methodology has been developed for studying the corrosion cracking of pipes, taking into account the biaxial stress state and the correct use of the laws of linear fracture mechanics.

Ключові слова. Труба, деформація, тріщина, пластична зона, тріщиностійкість.

Pipe, deformation, crack, plastic zone, crack resistance.

Вступ. Проведені дослідження показують, що при тривалій експлуатації сталевих оболонкових конструкцій в умовах безпосереднього контакту з агресивними середовищами — кислотами, лугами тощо — визначальним чинником ініціювання та кінетики формування корозійних шарів є сили хімічної адгезії. Хімічно активні сполуки, що транспортуються або зберігаються в резервуарах та ємностях різного призначення, виступають джерелом дифузії кисню в реакційну зону, що інтенсифікує окиснювальні процеси на поверхні металу.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження тривалості міцності конструкцій трубопроводів, їх властивостей в роботах В. Макаренко, Р. Палія та ін.

Постановка мети і задач досліджень. Метою роботи є створення спротиву зварювальних з'єднань трубних систем корозійним процесам.

Методика досліджень. Розроблена методика визначення енергетичного критерію, який дозволяє оцінити спротив динамічному розповсюдженню тріщин в трубних сталях різної групи міцності (X50 – X70) та їх зварювальних з'єднань, які виконані із залученням різних технологій зварювання. Енергетичний параметр – A_p визначали на зразках типу DWTT на приладі маятниковий копер.

Уперше для оцінки кінетики динамічного розповсюдження тріщин розроблений метод акустичної емісії. Комп'ютерну обробку результатів замірів параметрів процесів (траєкторія, час, швидкість росту тріщин та ін.) проводили за допомогою аналізатора нестационарних емісійних процесів (АНЕП), що дозволяло обробку експериментальних даних в аналоговому режимі, що значно пришвидшило термін проведення випробувань і підвищило точність вимірів результатів.

Отримана серія результатів стосовно спротиву нових економічно модифікованих сталей марок 06Г2АФ і 06Г2БА, які леговані ванадієм і ніобієм, тобто сильними карбідо- і нітридо-утворюючими елементами в порівнянні з традиційною низьколеговою сталлю марки 17Г1СУ, яка широко використовується в будівництві нафтогазопроводів України. Отримані результати однозначно свідчать про високий спротив нових сталей динамічному тріщино утворенню газопроводів тривалого терміну експлуатації в корозійно-агресивному NACE – середовищі. При інтенсивній загальній корозії зварювального шва сталі 17Г1С-У (5-% розчин NaCl) залишкові напруження зникають внаслідок руйнування шва. Збережене при цьому поле напружень визначається пружно-пластичними деформаціями зони термічного впливу.

Результати досліджень. Відомо що для оцінки працездатності зварюваних з'єднань газопроводів використовують енергетичні і деформаційні критерії які отримують при випробуванні повно товщинних зразків типу DWTT і натурних (полігонних) випробуваннях повно розмірних труб. При цьому параметр A_p (робота розповсюдження тріщини), як енергетична характеристика спротиву розповсюдженню тріщини визначають за результатами випробувань повно товщинних зразків типу DWTT використовуючи динамічну діаграму згину (рис. 1) із співвідношення $A_p = A_{II} - A_3$, де A_{II} – поглинута енергія при руйнуванні зразка виміряна по силовимірювача копра A_3 – вираховується по діаграмі згину.

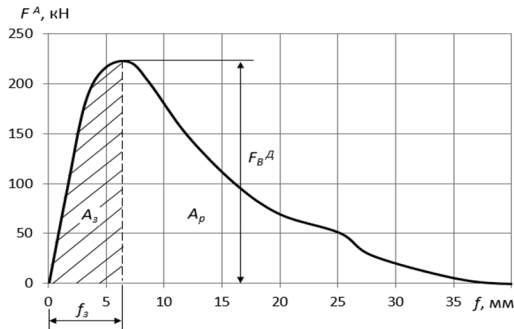


Рис. 1. Діаграма динамічного згину зразка DWTT із зварюваного з'єднання труби 720x14мм (сталь X-70 – марки 06Г2АФ – надріз по зоні термічного впливу)

В інженерній практиці будівництва магістральних газопроводів для оцінки спротиву зварювальних з'єднань руху тріщини використовують процент волокна в зломі (В%) і швидкість розповсюдження тріщини v . Процент волокна в зломі дозволяє надавати порівняльну оцінку здатності металу чинити спротив розповсюдженню тріщини.

Процент волокна визначають в зломах зразків типу DWTT випробуваних в заданому інтервалі температур. На рис. 2 показана залежність спротиву розповсюдженню руйнування від кількості волокна в зломах зразків типу DWTT із основного металу труб різних сталей, зокрема Х70 (06Г2АФ), Х60 (06Г2БА) і 17Г1СУ. Видно, що в області $V=100\%$ залежність $A_p(V)$ має більше невизначеності. Наприклад, для сталі класу Х-70 значення A_p при $V=100\%$ змінюються в межах від 26 до 60кДж. При $V<90\%$ між роботою, витраченою на розповсюдження тріщини, і площею волокнистих ділянок в зломі спостерігається пропорційна залежність. Аналогічна закономірність встановлена і при випробуванні зразків типу DWTT з надрізом по металу шва і по зоні термічного впливу (рис. 3). В цьому випадку пропорційна залежність $A_p(V)$ спостерігається при $V=80\%$.

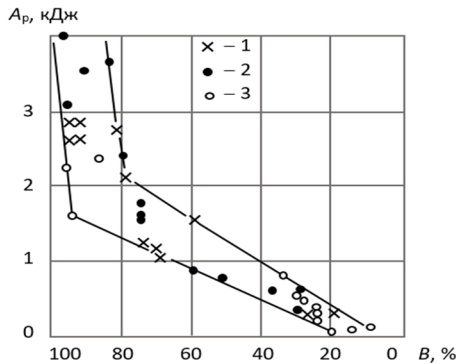


Рис. 2. Залежність роботи розповсюдження тріщини від кількості волокнистої складової в зломах зразків DWTT труби діаметром 720мм із сталей контрольованої прокатки: 1 – 17Г1СУ; 2 – 06Г2АФ (економно модифікована ванадієм) і 3 – 06Г2БА (економно модифікована ніобієм)

На рисунку 4 представлена залежність спротиву розповсюдженню руйнуванню від температури випробування зразків DWTT основного металу і зварювального з'єднання труб 720x14мм. Різке зниження спротиву розповсюдженню руйнування в зразках (процент волокна в зломі) із основного металу настає при $T=-20^{\circ}\text{C}$; зони термічного впливу - при $T=-10^{\circ}\text{C}$, а металу шва – в інтервалі від 20 до 0°C . Процент волокна в зломі використовується і як характеристика для визначення критичної температури $T_{кр}$ переходу основного металу чи зварювального з'єднання в крихкий стан. Критичну

температуру крихкості на зразках DWTT для газопроводів діаметром 720-820 мм при тиску 7-9 МПа прийнято визначати при $V=80\%$ і позначати T_{80} .

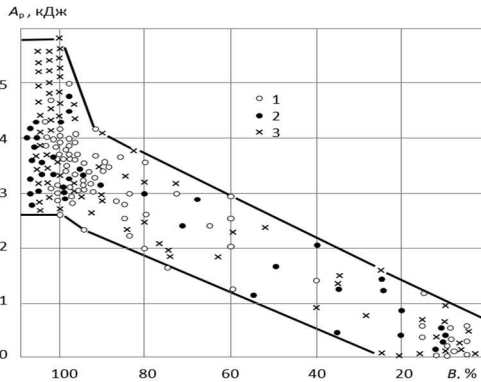


Рис. 3. Залежність роботи розповсюдження тріщини від кількості волокна в зломах зразків DWTT із зварювальних з'єднань труб 720x12мм (сталь класу X-70) з надрізом по зоні термічного впливу (а) і по центру шва (б). Позначення: 1 – 3 – різні варіанти режимів зварювання

Швидкість розповсюдження тріщин також характеризує спротив руйнуванню металу і зварюваних з'єднань газопроводів. Крихким руйнуванням відповідають високі швидкості розповсюдження – звичайно більші 500-600 м/с, а в'язким -100-300 м/с.

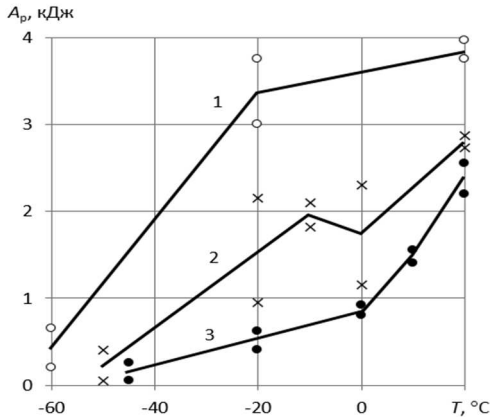


Рис. 4. Залежність роботи розповсюдження руйнування від температури випробування поперечних зразків DWTT із труби 720x14мм (сталь X-70 – марки 06Г2АФ). Позначення: 1 – основний метал; 2 – зона термічного впливу; 3 – метал шва

Викладені методики визначення характеристик зварювальних з'єднань труб дозволяють оцінити працездатність на стадії зародження і розповсюдження руйнування в газопроводах. Методи визначення характеристик в ряді випадків враховують природню концентрацію напружень і деформацій в трубі. Як відмічалось вище, в процесі експлуатації магістральних трубопроводів можуть виникати циклічні навантаження. Подібні дослідження в умовах мало циклових напружень проводилися в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ [1, 2].

Відомо [3, 4], що сигнали акустичної емісії мають стохастичний характер, а тому обробка результатів експериментальних вимірів вимагає застосування статистичних методів обробки результатів. В той же час, статистичні методи дослідження, які включають обробку результатів вимірювань за допомогою ЕВМ, є інформативними і прийнятними для вивчення перехідних процесів при використанні методу акустичної емісії. Вони дозволяють отримувати додаткову інформацію про особливості деформаційного старіння, наприклад, трубних сталей тривалої експлуатації та розповсюдження тріщин при в'язкокрихкому руйнуванні металу, яка може бути використана при розробці методів і способів захисту трубних сталей від корозійно-механічних та циклічних (втомлених) руйнувань.

В процесі проведення комплексу досліджень нами використовувалась, крім акустично-емісійної апаратури, також інформаційно-вимірювальна система "Аналізатор нестационарних емісійних процесів" (АНЕП) і ЕОМ. Застосування аналізатора АНЕП з гнучкою системою програмування дозволила вибрати найбільш інформативні показники і алгоритми обробки отриманої інформації (рис. 5).

Тривалість вимірювання параметрів акустичної емісії необмежена але, як правило, не перевищує 120-140 с. Обробка інформації здійснюється в реальному масштабі часу. Загальний термін експерименту від початку вимірювання до закінчення виводу результатів складає не більше 5 хв. При аналізі характеру акустичної емісії зразків вирізаних з трубних сталей різних марок і терміну експлуатації вимірюється, як правило, від 100 до 1000 і більше значень (механізований і автоматичний контроль). При цьому реєструється термін проходження сигналів на електричних перетворювачах, по якому можна судити про параметри крихкого стрибка тріщин. Частота навантаження зразків на малих частотах ≈ 50 циклів за хвилину. Частота відображення стрибків тріщин, особливо при крихкому розповсюдженні тріщин, може змінюватися від 100 Гц до 20 кГц. Побудова гістограми параметрів і вирахування їх середніх значень і характеристик розсіювання проводиться на основі 100-1000 вимірювань.

Датчик акустичної емісії перетворює поширювані пружні зміщення частинок матеріалу в електричний сигнал, який підсилюється й обробляється електронною апаратурою на основі прийнятого алгоритму. Для сигналу акустичної емісії що реєструється характерні насамперед первинні параметри,

якими є амплітуда, тривалість, енергія, форма і час появи. Всі інші параметри, що використовуються для аналізу акустичного процесу, є вторинними. Крім того, інформативність параметрів акустичної емісії визначається перебігом конкретних фізичних процесів.

Для оцінки міцності і довговічності зварювальних з'єднань листових конструкцій найбільш прийнятними є методи випробувань в умовах двовісного напруженого стану по схемі зображеній на рис. 6. В якості зразків використовували зразки діаметром 130 мм товщиною 8-10 мм отриманих зварюванням колових і поздовжніх швів. Паралельно випробували серію зразків у випробувальних комірках конструкція яких показана на рис. 6.

Відомо, що вершина розвинутої тріщини (концентратор напружень) – зона, де процеси сорбції, проходять найбільш інтенсивно. Це обумовлено наступними обставинами: а) у вершини тріщини, яка представляє собою активну зону виділяється підвищена кількість водню, внаслідок інтенсивного корозійного процесу; б) внаслідок концентрації і різкого градієнту напружень виникає направлена дифузія водню до вершини тріщини; в) у результаті утворення гідридних (неметалевих) з'єднань заліза в умовах посиленої дифузії водню виникають додаткові напруження II роду з об'ємним полем розтягуючих напружень на кінцях гідридних пластинок, прискорюючи процес дифузії, тобто процес починає протікати авто каталітично.

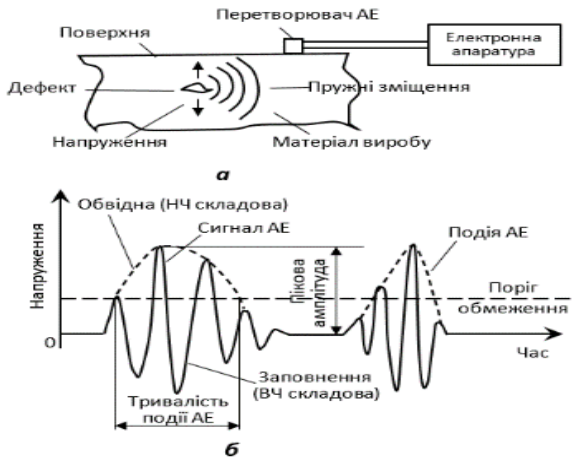


Рис. 5. Схема реєстрації пружних зміщень у процесі розвитку тріщино-утворення в структурі матеріалу під дією напружень (а) та оброблення реєстрованого сигналу акустичної емісії (АЕ) (б).

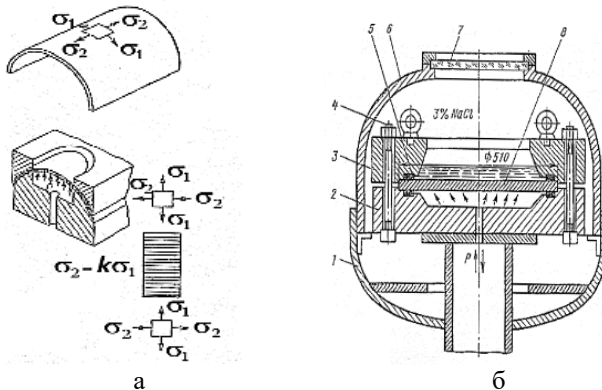


Рис. 6. Схема випробувань зразків при двовісному напруженому стані створеному розтягуванням (а) та експериментальна установка для випробувань зварювальних з'єднань при двовісному згині в умовах повторно-статичного навантаження (б)

Відмічені обставини при досягненні критичної для даних умов ступені наводнювання (для зварюваних з'єднань на основі економно модифікованої сталі 06Г2АФ це складає $\geq 004-005\%$ по масі) приводять до утворення тріщин, розвиток яких полегшується поверхнево-адсорбційним ефектом зниження міцності.

В розглянутому механізмі роль електрохімічного фактору полягає в основному в генеруванні водню при катодному процесі. Напружений стан (енергетична умова розтріскування) локалізує корозійний процес, підсилює процеси місцевого і загального наводнювання.

При наявності міцної захисної плівки метал, стійкий проти розтріскування (солянокислі розчини при низьких температурах), так як плівка захищає метал від дифузії водню. Коли метал знаходиться в активному стані і швидкість загальної корозії настільки велика, що подавляються процеси наводнювання, тобто швидкість загальної корозії більше швидкості критичної ступені наводнювання, то розтріскування також не має місця. Швидкість корозії визначалася по кількості виділеного водню H_2 за одиницю часу з одиниці поверхні і зміною товщини зразків. При різкому зниженні швидкості суцільної корозії відбувається корозійне розтріскування, внаслідок насичення металу воднем, не дивлячись на те, що вміст виділеного при корозії водню в першому випадку на порядок вищий, чим у другому. Визначення вмісту водню в зразках показало, що в першому випадку вміст водню не змінюється в порівнянні з вихідним, у другому відбувається його сорбція, так як швидкість корозії менше швидкості сорбції. При цьому створюються перед умови для розтріскування.

Висновки та рекомендації. 1. Розроблена методика визначення енергетичного критерію, який дозволяє оцінити спротив динамічному розповсюдженню тріщин в трубних сталях різної групи міцності (X50 – X70)

та їх зварювальних з'єднань, які виконані із залученням різних технологій зварювання. Енергетичний параметр – A_p визначали на зразках типу DWTT на приладі маятниковий копер.

2. Уперше для оцінки кінетики динамічного розповсюдження тріщин розроблений метод акустичної емісії. Комп'ютерну обробку результатів замірів параметрів процесів (траєкторія, час, швидкість росту тріщин та ін.) проводили за допомогою аналізатора нестационарних емісійних процесів (АНЕП), що дозволяло обробку експериментальних даних в аналоговому режимі, що значно пришвидшило термін проведення випробувань і підвищило точність вимірів результатів.

3. Отримана серія результатів стосовно спротиву нових економно модифікованих сталей марок 06Г2АФ і 06Г2БА, які леговані ванадієм і ніобієм, тобто сильними карбідо- і нітридо-утворюючими елементами в порівнянні з традиційною низьколегованою сталлю марки 17Г1СУ, яка широко використовується в будівництві нафтогазопроводів України. Отримані результати однозначно свідчать про високий спротив нових сталей динамічному тріщино утворенню газопроводів тривалого терміну експлуатації в корозійно-агресивному NACE – середовищі.

4. При інтенсивній загальній корозії зварювального шва сталі 17Г1С-У (5-% розчин NaCl) залишкові напруження зникають внаслідок руйнування шва. Збережене при цьому поле напружень визначається пружно-пластичними деформаціями зони термічного впливу.

5. Наводнювання сталей в процесі корозії спричиняє різку зміну напруженого стану як в умовах загальної корозії, так і при розтріскуванні внаслідок гідридного перетворення, яке супроводжується збільшенням об'єму і появою додаткових напружень згину, що служить причиною втрати стійкості тонкостінних оболонкових конструкцій.

6. Розроблена методологія вивчення корозійного розтріскування труб з урахуванням двовісного напруженого стану і коректного використання закономірностей лінійної механіки руйнування.

1. P.Chindaprasrt, T.Cao Setting, segregation and bleeding of alkali-activated cement, mortar and concrete binders / Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes, WP, 2015, p.p.113-131.

2. Krivenko P., Petropavlovskii O., Vozniuk H., Lakusta S. The development of alkali-activated cement mixtures for fast rehabilitation and strengthening of concrete structures / Procedia Engineering 195 (2017), p.p. 142-146.

3. ДСТУБВ.2.7-185:2009 "Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму".DSTU B V.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'iemu.

DSTUBV.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'iemu".DSTU B V.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'iemu.

4. Berdnyk O Yu, Lastivka O V, Maystrenko A A, Amelina N O. Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 020). – Vol. 907. – 012036. (Scopus) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	11.03.2026	Received	11.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	19.03.2026	Received in revised form	19.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.