

## ОЦІНЮВАННЯ РУЙНУВАННЯ ТА МІЦНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ІЗ УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВОДНЕВОГО ЧИННИКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ

А.М. Сиротюк

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України; 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5,  
тел. (0322) 631400; e-mail: syrotyuk@ipm.lviv.ua; asyrotyuk@gmail.com

*Робота присвячена оцінюванню руйнування і міцності трубних сталей та конструкцій за підходами механіки руйнування матеріалів із урахуванням впливу водневого чинника експлуатаційних середовищ.*

*Базуючись на концепціях механіки руйнування матеріалів, розроблено і обґрунтовано критерії оцінювання міцності та безпечної експлуатації матеріалів, а також елементів трубних конструкцій за дії воденьвмісних середовищ. Використовуючи ці критерії, запропоновано спеціальні діаграми оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами за дії воденьвмісних середовищ. Такі діаграми будують у координатах „характеристичні значення глибини тріщиноподібних дефектів – форма дефекту” (форму дефекту-тріщини приймають як півеліпс). Діаграми містять три зони: безпечної експлуатації трубопроводу, експлуатації з прогнозованим розвитком наявних тріщиноподібних дефектів та зону ризику катастрофічного руйнування.*

*Здійснено оцінювання безпечної експлуатації трубопроводів з тріщиноподібними дефектами у робочих середовищах різного складу, зокрема розраховано безпечні значення розмірів дефектів залежно від їх форми та об'ємної концентрації водню в металі трубопроводів. Ці графічні залежності можна розглядати як базові діаграми для оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу за конкретних умов його експлуатації, за якими можна провести диференційоване оцінювання впливу на довговічність конструкції розмірів виявлених дефектів залежно від стану матеріалу трубопроводу (ступеня його наводнення).*

*Ключові слова:* трубопровідні конструкції; низьколеговані сталі; воденьвмісні середовища; концентратори напружень; тріщиноподібні дефекти; тріщиностійкість матеріалу; діаграми оцінювання роботоздатності та ризику руйнування.

*Робота посвящена оценке разрушения и прочности трубных сталей и конструкций по подходам механики разрушения материалов с учетом влияния водородного фактора эксплуатационных сред.*

*На основании концепции механики разрушения материалов разработаны и обоснованы критерии оценки прочности и безопасной эксплуатации материалов, а также элементов трубных конструкций при воздействии водородсодержащих сред. По этим критериям предложены специальные диаграммы оценки работоспособности и риска разрушения трубопровода с трещиновидными дефектами при воздействии водородсодержащих сред. Построение таких диаграмм проводят в координатах „характеристические значения глубины трещиновидных дефектов – форма дефекта” (форму дефекта-трещины принимают в виде полуэллипса). Диаграммы содержат три зоны: безопасной эксплуатации трубопровода, эксплуатации с прогнозируемым развитием имеющихся трещиновидных дефектов и зону риска катастрофического разрушения.*

*Проведена оценка безопасной эксплуатации трубопроводов с трещиновидными дефектами в рабочих средах разного состава, в частности рассчитаны безопасные значения размеров дефектов в зависимости от их формы и объемной концентрации водорода в металле трубопроводов. Эти графические зависимости можно рассматривать как базовые диаграммы для оценки работоспособности и риска разрушения трубопровода в конкретных условиях его эксплуатации. Они также позволяют дать дифференцированную оценку влияния на долговечность конструкции размеров выявленных дефектов в зависимости от состояния материала трубопровода (степени его наводнения).*

*Ключевые слова:* трубопроводные конструкции; низколегированные стали; водородсодержащие среды; концентраторы напряжений; трещиноподобные дефекты; трещиностойкость материала; диаграммы оценки работоспособности и риска разрушения.

*The article deals with the evaluation of fracture and strength of pipeline steels and structures on the basis of the fracture mechanics approaches with the account of operating environments hydrogen factor influence.*

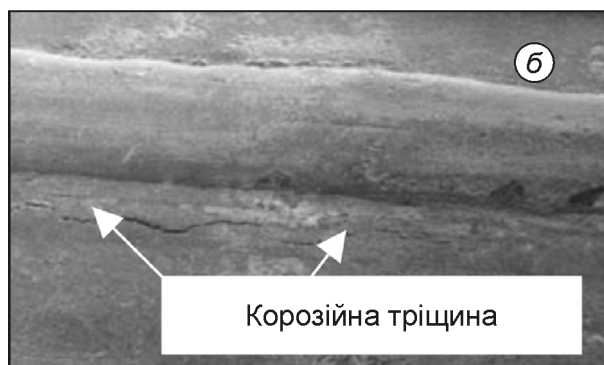
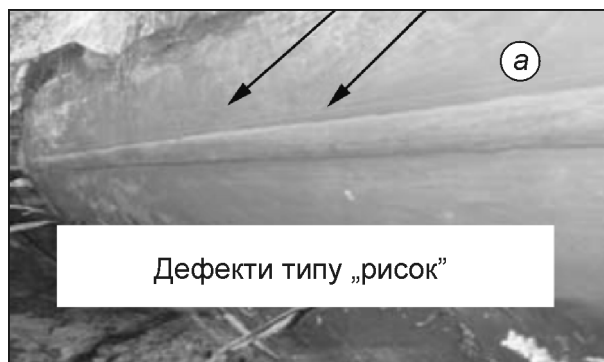
*Based on the fracture mechanics concepts, the criteria for evaluation of strength and safe operation of materials, as well as of the elements of pipeline structures, were developed and verified under the influence of the hydrogen-containing environments. When using these criteria, there were developed the special diagrams for evaluation of operability and fracture risk of the pipeline with the crack-like defects under the influence of the hydrogen-containing environments. These diagrams are built in the coordinates „characteristic values of depth of the crack-like defects – defect shape” (the shape of the crack-like defect is considered to be semi-elliptical) and contain the following three zones: pipeline safe operation, operation with predicted growth of the existing crack-like defects, and zone of brittle fracture risk.*

*Evaluation of safe operation of the pipelines with the crack-like defects was carried out in different composition environments. In particular, the safe shape values of the defects were calculated depending on their shape and hydrogen volume concentration in the pipeline metal. These graphical dependences can be considered as basic diagrams for evaluation of operability and fracture risk of the pipeline under the given conditions of its operation. They also allow to evaluate differentially the identified defect size influence on the lifetime of the structure depending on the state of the pipeline metal (rate of its hydrogenation).*

*Keywords:* pipeline structures; low-alloyed steels; hydrogen-containing environments; stress concentrators; crack-like defects; crack growth resistance of material; diagrams of evaluation of operability and fracture risk.

**Вступ.** Трубопровідний транспорт відіграє вагомую роль у вітчизняній промисловій інфраструктурі. Перш за все – це розгалужена мережа магістральних трубопроводів для транспортування природного газу, нафти та продуктів їхньої переробки, загальна довжина якої перевищує 42 тис. км [1–3]. Майже половина цих трубопроводів експлуатується понад 30 років і відпрацювала свій розрахунковий ресурс. Як свідчить технічна діагностика [2–5], для них характерна значна пошкодженість металу та дефектність конструктивних елементів від тривалої дії експлуатаційних та інших чинників.

Внаслідок тривалої експлуатації, в першу чергу, проявляються дефекти, зумовлені відхиленнями від вимог технології та стандартів під час заводського виробництва труб. Це призводить до появи на їх поверхнях різноманітних подряпин, задирок та рисок, які надалі відіграють роль ефективних концентраторів напружень. Ілюструють сказане результати [6] аналізу причин виникнення тріщин на двошовних трубах з високоміцних сталей (Х65 та Х70) контрольованої прокатки газопроводу „Уренгой–Помари–Ужгород”. Тут виявлено дефекти типу „повздожжніх рисок” (рис. 1а), які знаходились поблизу повздожжніх зварних швів. Це характерні дефекти, закладені на етапі виготовлення труб. Оскільки риси є концентраторами напружень та знаходяться в зоні термічного впливу зварного з’єднання або біля неї, то в подальшому вони слугували джерелом зародження та поширення в трубі тріщин, зумовлених корозійним розтріскуванням (рис. 1б).



**Рисунок 1 – Дефекти типу „повздожжні риси” на поверхні труби, які знаходяться поблизу повздожжніх зварних швів (а) та ініційовані ними корозійне розтріскування двошовної зварної труби зі сталі Х70 (б) [6]**

Ще одним чинником виникнення аналогічних механічних дефектів (вм’ятини, подряпини, риси тощо) є порушення комплексу вимог до транспортування та укладання труб [7]. Окрім цього, після неякісного зварювання в трубах можлива поява підрізів, непроварів швів та шлакових включень [8], які також є потенційними концентраторами напружень, біля яких можуть зароджуватись тріщиноподібні дефекти. Процеси тріщиноутворення можуть також додатково інтенсифікуватись за нерегламентованого підвищення тиску в трубопроводі через недотримання вимог його експлуатації [9].

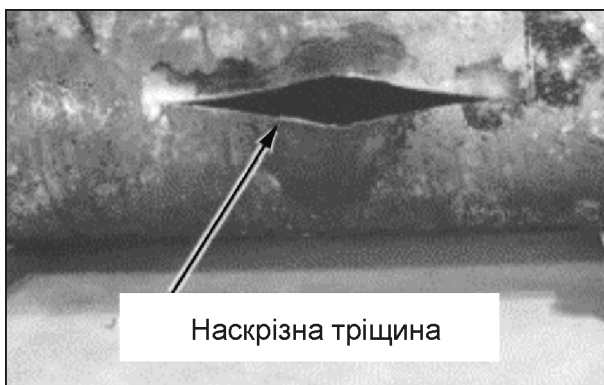
Однак основними тут слід вважати дефекти корозійної чи корозійно-механічної природи, які становлять більше половини всіх пошкоджень діючих нафтогазопроводів [1–3]. Вони, в першу чергу, пов’язані з втратою з часом експлуатаційних властивостей захисних покриттів [10, 11], що призводить до виникнення умов, які активізують корозію металу труб. У результаті цих процесів на поверхні металу починають розвиватися корозійно-механічні дефекти у вигляді пітингів, виразок або каверн. Таким характерним прикладом [6] може бути корозійне ураження металу магістрального газопроводу „Єфремівка–Диканька–Київ” (рис. 2) через активність ґрунтового електроліту внаслідок синергетичної дії хлорид- та сульфат-іонів, що спричиняє їх значну локалізацію та пришвидшення локальної корозії порівняно з загальною корозією до  $10^4$  разів. Слід відзначити, що незважаючи на різну природу експлуатаційних дефектів, зумовлених відшаруванням захисного покриття (рис. 3а) чи пошкодженнями під час ремонтних робіт (рис. 3б), всі вони є типовими прикладами потенційних концентраторів напружень, тобто місцями зародження руйнування труби. Спочатку біля них утворюється одна або декілька мікротріщин, подальший розвиток та злиття яких призводить до формування макротріщини, яка, поширюючись, може спричинити розрив (руйнування) трубопроводу (рис. 4).



**Рисунок 2 – Локалізоване корозійне ураження магістрального газопроводу „Єфремівка – Диканька – Київ” [6]**



**Рисунок 3 – Типові корозійні експлуатаційні дефекти газопроводів, спричинені пошкодженням ізоляційного покриття внаслідок відшарування (а) та ремонтними роботами (б) [6]**



**Рисунок 4 – Типовий приклад руйнування труби внаслідок розвитку макротріщини [7]**

Незважаючи на різну фізичну природу пошкодження, для всіх перелічених концентраторів напружень характерною є локалізація фізико-механічних та фізико-хімічних процесів руйнування матеріалу [12]. Тому оцінювання корозійно-механічної пошкоджуваності та руйнування матеріалу біля концентраторів напружень

різних типів можна здійснювати на основі спільного методологічного підходу. Таким науковим інструментарієм є механіка руйнування матеріалів та конструкцій, що вивчає закономірності зародження та розвитку неоднорідностей і дефектів структури матеріалу типу тріщин за статичних і циклічних навантажень.

#### **Аналіз сучасних досліджень і публікацій.**

На сьогоднішній день є загальновідомим факт впливу водню на механічні властивості матеріалів. Однак відомо також, що залежно від умов взаємодії у системі „матеріал – воденьвмісне середовище” цей вплив може реалізуватися через цілий спектр різноманітних за фізико-хімічною природою явищ, які в кінцевому рахунку і призводять до втрати матеріалом своїх службових характеристик. Тому наукова література визначає сучасний стан проблеми, як недостатньо вивчений, особливо у розумінні конкретних механізмів дії водню на процеси руйнування залежно від специфіки системи „матеріал – середовище” (див. [13–15]).

У цьому плані, трубопроводи, що використовуються для транспортування воденьвмісних середовищ (під воденьвмісними середовищами, в першу чергу, розуміється, газоподібний водень, а також потенційно воденьвмісні корсни копалини, тобто такі, які за певних умов при взаємодії з деформованим металом можуть виділяти водень, як продукт відповідних фізико-хімічних реакцій (наприклад, водні середовища, нафтопродукти тощо)), розглядаються як об’єкти підвищеної відповідальності і важливості в рамках індустріальної та соціальної інфраструктури. З технічної точки зору вони є складними тривимірними конструкціями, які складаються з прямолінійних ділянок, патрубків, гинів, різнорідних зварних з’єднань тощо. Крім того, умови їх експлуатації є досить жорсткими і складними, оскільки вони підлягають впливу таких чинників, як внутрішній тиск та циклічні навантаження (вібрації), дія яких підсилюється внутрішнім та зовнішнім середовищами. Потенційний синергізм впливу цих чинників підвищує ризик виникнення непередбачуваних пошкоджень та руйнувань впродовж їх тривалої експлуатації, що може спричинити аварійні ситуації з непередбачуваними техніко-економічними та соціальними наслідками.

Тому, проблеми, що відносяться до безпеки, надійності та цілісності газотранспортних мереж, які містять суміші природного газу та водню є актуальними та важливими. Перш за все, існує ймовірність, так званої, проблеми „водневого окрихчення” металу трубопроводів – впливу транспортованого водню на механічні властивості матеріалу (рис. 5а).

Окрім цього, специфічна тривала експлуатація трубопроводів сприяє процесам наводнення сталей. Умови зовнішнього середовища спричиняють процеси вільної корозії, де водень утворюється на поверхні металу як катодна складова відповідних електрохімічних реакцій (рис. 5б). Цей факт був доведений декількома спеціальними дослідженнями (див. наприклад

[14]). Також, у експлуатаційних умовах при застосуванні катодного протикорозійного захисту можливе наводнювання трубних сталей. Це спричиняє проблему конструкційної цілісності підземних трубопроводів, які експлуатуються тривалий період [16].

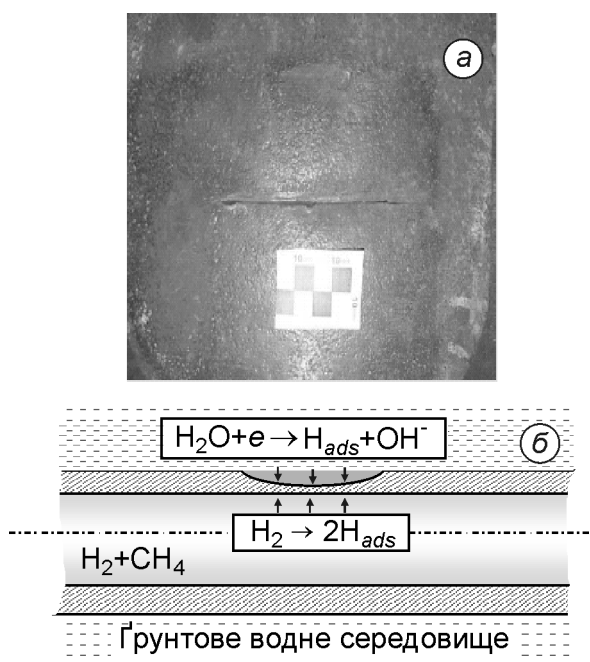


Рисунок 5 – Приклад труби з дефектом (а) та схема можливих шляхів впливу водню на локальну міцність трубопроводу (б) [17]

Слід зазначити, що різноманітні погляди на домінуючий механізм водневого руйнування конструкційних матеріалів активно обговорюється і дискутується [15, 18–20]. Ґрунтуючись на мікроскопічному та макроскопічному підходах, запропоновано певну кількість моделей руйнування металів у присутності водню, а також на цій основі зроблено спроби пояснення відомих результатів експериментальних досліджень. Узагальнено ці моделі можуть бути класифіковані як наступні [18, 19].

*Модель тиску водню* була запропонована на ранніх стадіях дослідження проблеми впливу водню на метали. Вона пояснює явище, так званого, водневого окрихчення, як ефект дії високого тиску, що створюється в результаті утворення молекулярного водню в порожнинах пор, тріщин та інших дефектів. Ця модель не може пояснити залежність окрихчення металу від швидкості деформування, особливо, коли випробування проводяться з дуже низькою швидкістю деформації.

*Адсорбційна модель* побудована на постулаті, що водень адсорбується на поверхні металу, що призводить до пониження поверхневої енергії матеріалу. Обмеження цієї моделі полягає в тому, що вона не враховує дифузії водню та його концентрацію в пластично деформованих зонах матеріалу, що існують біля тріщиноподібних концентраторів напружень. Як наслідок, ця модель не може пояснити морфологічних змін поверхні руйнування при поширенні

тріщини, яка під дією водню змінюється від ямкового до квазісколу.

*Гібридні моделі.* Ці моделі ґрунтуються на факті, що певні метали здатні утворювати з воднем хімічні сполуки – гібриди. В цьому випадку утворюються тверді й крихкі фази, які є відповідальними за окрихчення металу. Однак, багато конструкційних металів не утворюють стійких гібридів, і дана модель має специфічне обмежене застосування.

*Модель локалізованої пластичності.* Ця модель передбачає, що присутність надзвичайно високої концентрації водню, розчиненого у кристалічній ґратці матеріалу перед вершиною тріщини, сприяє полегшеному протіканню деформації матеріалу на мікроструктурному рівні. Ця модель має декілька слабких сторін. Основним недоліком є неврахування деформацій кристалічної ґратки, а також неможливість пояснення явища локалізації пластичних деформацій.

*Декогезивна модель* пропонує пояснення прискороного розвитку тріщиноподібних дефектів під впливом водню явищем послаблення міжатомних зв'язків у матеріалі перед вершиною тріщини, що поширюється. Модель не може пояснити процесів утворення (зародження) тріщин на деформованій поверхні матеріалу.

На підставі вищезазначеного, в сучасній літературі сформувалось усталене твердження [19, 21], що прискорене руйнування металів за присутності водню є, швидше, явище, що визначається одночасно кількома взаємопов'язаними або незалежними фізичними механізмами, ніж деяким одним – домінуючим. Це більш експериментально обґрунтовано, оскільки відомі факти [21] протікання різних за фізичною суттю процесів, спричинених наявністю водню в металі, для одного і того ж матеріалу, але різних умов випробування.

Слід зауважити, що при розгляді впливу водню на механічну поведінку металів є принципово важливою класифікація об'ємів матеріалу, що розглядаються. Вона визначає методологічні підходи, що повинні бути застосовані для певних випадків. Так, оцінка водневої деградації матеріалу в мікрооб'ємах (елементи структури, поодинокі кристали) здійснюється за підходами фізики твердого тіла. Зміна властивостей матеріалу в мезооб'ємах (локальні об'єми матеріалу біля тріщин та концентраторів напружень) може бути ефективно описана за параметрами механіки руйнування матеріалів. Механічні властивості макрооб'ємів матеріалу за дії водню визначаються стандартними механічними характеристиками та параметрами опору матеріалу втомному навантаженню.

На завершення, слід констатувати, що на сьогоднішній день в літературі нагромаджено значний об'єм інформації про вплив водню на механічні властивості конструкційних сталей і сплавів [18, 20], проте, тут часто зустрічаються доволі суперечливі дані про результати досліджень. Така ситуація, швидше за все, пов'язана з трудностю чи неможливістю урахування усіх існуючих чинників (розміри зразків, умови їх

наводнювання, контроль концентрації водню в матеріалі, специфіка прикладених навантажень, тощо), які мають вплив на досліджувані явища.

Слід також зауважити, що більшість проведених досліджень мають суттєвий недолік, а саме – дійсне значення концентрації водню в металі було невідомим, а ступінь наводнюваності матеріалу враховувався опосередковано. Це значно знижує їх цінність, оскільки унеможливорює узагальнення результатів досліджень проведених у різних умовах наводнювання матеріалу за різними методиками.

Таким чином, важливим та актуальним є розроблення експериментальних методів механіки руйнування матеріалів, які б давали змогу здійснювати деформування та руйнування зразків при відомому значенні об'ємної концентрації водню в металі, а зміна характеристик міцності та тріщиностійкості матеріалу під впливом водню визначалась би як функція концентрації водню. Це дасть змогу достовірно оцінювати опір руйнуванню та міцність трубопроводів за дії наводнювальних середовищ.

### Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи було оцінювання руйнування та міцності трубних сталей із урахуванням впливу водневого чинника експлуатаційних середовищ.

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення наступних задач:

- розробити і обґрунтувати критерії для оцінювання міцності та безпечної експлуатації матеріалів, а також елементів трубних конструкцій за дії воденьвмісних середовищ;

- побудувати діаграму оцінки роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами;

- на прикладі реальних елементів трубопроводу оцінити роботоздатність та ризик руйнування трубопроводів за дії воденьвмісних середовищ.

**Об'єкт дослідження:** процеси руйнування трубних сталей, що реалізуються шляхом зародження та подальшого розвитку тріщиноподібних дефектів за умов сумісної дії статичних і циклічних навантажень та воденьвмісних середовищ.

**Предмет дослідження:** базові параметри та критерії, що визначають міцність і руйнування трубних сталей та конструкцій за дії водневого чинника.

**Методи дослідження** – поєднання експериментальних та розрахункових методів механіки руйнування і міцності матеріалів.

**Виклад основного матеріалу.** Критерії міцності та безпечної експлуатації матеріалів та елементів трубних конструкцій за дії воденьвмісних середовищ, ґрунтуються на підходах механіки руйнування матеріалів. Тут основними параметрами для числових оцінок міцності та довговічності є базові діаграми циклічної тріщиностійкості матеріалів трубопроводів – залежності швидкості росту втомної тріщини  $dc/dN$  від розмаху КІН  $\Delta K_I$ , які побудо-

вані на основі експериментальних даних, одержаних за відповідними методиками випробувань. Такі діаграми розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим  $\Delta K_{Ih}$ , яке відповідає значенню  $\Delta K_I$ , за якого не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім  $\Delta K_{Ic}$ , яке відповідає значенню  $\Delta K_I$ , коли настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

Для сталей трубопроводів базові діаграми циклічної тріщиностійкості мають вигляд прямих ділянок у подвійній логарифмічній системі координат, кожна з яких описується степеневу залежністю типу Паріса

$$dc/dN = C \cdot (\Delta K_I)^n, \quad (1)$$

де  $C$  і  $n$  – константи, що характеризують систему „матеріал – середовище”.

Тріщиноподібний дефект у стінці трубопроводу з внутрішнім діаметром  $d$  та товщиною стінки  $t$  моделювали півеліптичною тріщиною із розмірами півосей  $a$  та  $c$  (рис. 6). Для підрахунку значень КІН  $\Delta K_I$  по контуру півеліптичної тріщини на внутрішній поверхні труби використовували відомі з літератури аналітичні залежності.

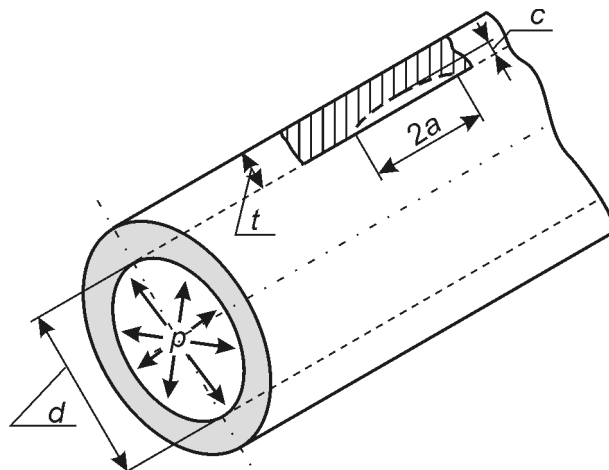


Рисунок 6 – Модельне представлення дефекту в стінці труби півеліптичною тріщиною

Тут вважали, що тріщиноподібний дефект розвивається з ростом кількості циклів навантаження  $N$ , зберігаючи півеліптичну форму. Однак співвідношення півосей  $a$  та  $c$  змінне, тобто  $c/a = f(C_m, N)$  і залежить від системи „матеріал – середовище”, що характеризується деякими сталими  $C_m$ . При цьому опір поширенню тріщини як у напрямку півосі  $c$ , так і в напрямку півосі  $a$  повністю визначає діаграма циклічної тріщиностійкості металу трубопроводу, одержана за заданих експлуатаційних умов. Остання аналітично описується за допомогою степеневу залежності (1).

Критерій безпечної експлуатації за пороговою глибиною тріщини. Корозійно-механічні дефекти тріщиноподібного типу за критерієм порогової глибини  $c_{th}$  та форми  $(c/a)$  півеліптичної тріщини оцінювали на основі її взаємозв'язку із пороговими значеннями КІН  $K_{Ih}$ . Це дає змогу, враховуючи експериментальні дані

про циклічну тріщиностійкість матеріалу труби та результати діагностики стану трубопроводів (тобто розміри та форму тріщин), оцінити потенційну можливість розвитку тріщин під час подальшої експлуатації, а також ступінь ризику руйнування трубопроводу.

Тут під пороговим розміром тріщини вважали півеліптичну тріщину фіксованої форми ( $c/a$ ) та глибиною  $c=c_{th}$ , у вершині якої значення КІН рівне пороговому ( $K_I=K_{th}$ ). Таким чином, критерієм безпечного тріщиноподібного дефекту буде умова  $c \leq c_{th}$ .

Тобто всі виявлені під час діагностичного огляду дефекти глибиною  $c \leq c_{th}$  вважають безпечними, оскільки не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Критерій безпечної експлуатації трубопроводу за граничною швидкістю росту наявних тріщин. Розглянуто випадок розрахунку допустимої глибини  $c_*$  тріщини для забезпечення безаварійної роботи трубопроводу між двома черговими профілактичними оглядами. Його пропонуємо здійснювати за критерієм приросту  $\Delta c$  виявленого тріщиноподібного дефекту глибиною  $c_0$ , тобто  $\Delta c \leq \Delta c_*$  при  $\Delta N = \Delta N_*$ , де  $\Delta c_*$  – допустимий приріст тріщини в глибину;  $\Delta N_*$  – планова кількість циклів навантаження впродовж експлуатації трубопроводу між двома профілактичними оглядами.

Фізично це означає оцінку за деякою граничною швидкістю розвитку корозійно-втомної тріщини впродовж запланованого терміну експлуатації трубопроводу  $dc/dN \leq (dc/dN)_*$ .

Наприклад, якщо виберемо значення  $(dc/dN)_* = 10^{-4}$  мм/цикл, то це означає, що наявні в трубопроводі тріщини глибиною  $c_i$  можуть максимально розвинутись на 1 мм упродовж 10000 циклів навантаження.

Процедура визначення допустимої глибини тріщини  $c_*$  у стінці трубопроводу за заданих значень  $\Delta c_*$  та  $\Delta N_*$  така. Спочатку знаходять граничну швидкість росту корозійно-втомної тріщини  $(dc/dN)_* = \Delta c_*/\Delta N_*$ .

За цією величиною з розглянутої діаграми циклічної тріщиностійкості матеріалу розраховують відповідне значення КІН  $K_*$ . На основі цього значення обчислюють допустиму глибину тріщини  $c_*$  із відомої формули для підрахунку КІН  $K_I$ , яка є функцією робочого навантаження на трубопровід, його геометричних розмірів та геометрії тріщиноподібного дефекту.

Оцінка ризику крихкого катастрофічного руйнування. Таку оцінку здійснюють за відомим критерієм механіки крихкого руйнування  $K_I = K_{fc}$ , де  $K_{fc}$  – циклічна в'язкість руйнування. Тут під критичним розміром тріщини розуміють півеліптичну тріщину фіксованої форми  $c/a$  та глибини  $c=c_{fc}$ , у вершині якої значення КІН рівне критичному, тобто  $K_I = K_{fc}$ .

Таким чином, критерієм критичного тріщиноподібного дефекту буде умова  $c \geq c_{fc}$ .

Тобто усі виявлені під час діагностичного огляду дефекти глибиною, близькою або більшою за значення  $c_{th}$ , є критично небезпечними,

оскільки мають потенційну здатність до спонтанного поширення, що може призвести до катастрофічного руйнування трубопроводу.

*Діаграма оцінки роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами.* Експертні оцінки можливого ризику руйнування трубопроводів, які знаходяться під дією пульсуючого тиску робочого середовища, можна здійснити на підставі критеріїв, викладених вище.

Для цього на їх основі для кожного розглянутих трубопроводу будують спеціальні діаграми в координатах „характеристичні значення глибини тріщиноподібних дефектів – форма дефекту” (рис. 7). Така діаграма містить три характерні зони. По-перше, це зона безпечної експлуатації трубопроводу, що знаходиться нижче кривої  $c_{th} = F_1(a/c)$ . Це стосується випадку, коли глибина всіх виявлених під час діагностичного огляду дефектів є меншою за порогове значення, тобто  $c \leq c_{th}$ . Такі дефекти вважають безпечними, оскільки не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Друга зона – це зона експлуатації з прогнозованим розвитком наявних тріщиноподібних дефектів. Це означає, що впродовж певного запланованого терміну експлуатації трубопроводу допускається розвиток існуючих тріщин зі швидкістю, що не перевищує деяку встановлену граничну, тобто  $dc/dN \leq (dc/dN)_*$ . Значення  $(dc/dN)_*$  вибирають згідно з технічними нормами експлуатації трубопроводу, а також конкретною виробничою ситуацією. За вибраним значенням граничної швидкості  $(dc/dN)_*$  розраховують криву  $c_* = F_2(a/c)$ . Всі наявні в трубопроводі тріщиноподібні дефекти глибиною  $c_i \leq c_*$  розвиватимуться зі швидкістю нижче граничної і можуть вважатись умовно безпечними для даного випадку.

Третя зона – зона ризику крихкого руйнування, яка знаходиться вище кривої  $c_{fc} = F_3(a/c)$ . Тобто для всіх виявлених під час діагностичного огляду дефектів глибиною  $c_i \geq c_{fc}$  реалізується критерій катастрофічного руйнування і експлуатація трубопроводу з такими дефектами неприпустима.

Наведені вище критерії оцінки безпечної експлуатації елементів конструкцій з тріщиноподібними дефектами послужили основою для оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводів за дії воденьвмісних середовищ.

У праці [22] показано, що швидкість росту втомної тріщини  $da/dN$  в низьколегованих трубних сталях в умовах наводнювання може бути представлена як функція локальної концентрації водню біля вершини тріщини, концентрації водню в об'ємі металу і розмаху КІН, що зумовлений зовнішнім навантаженням:

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \left( \frac{C_{H(t)}}{C_{H(v)}} \right) \cdot (\Delta K_I)^m, \quad (2)$$

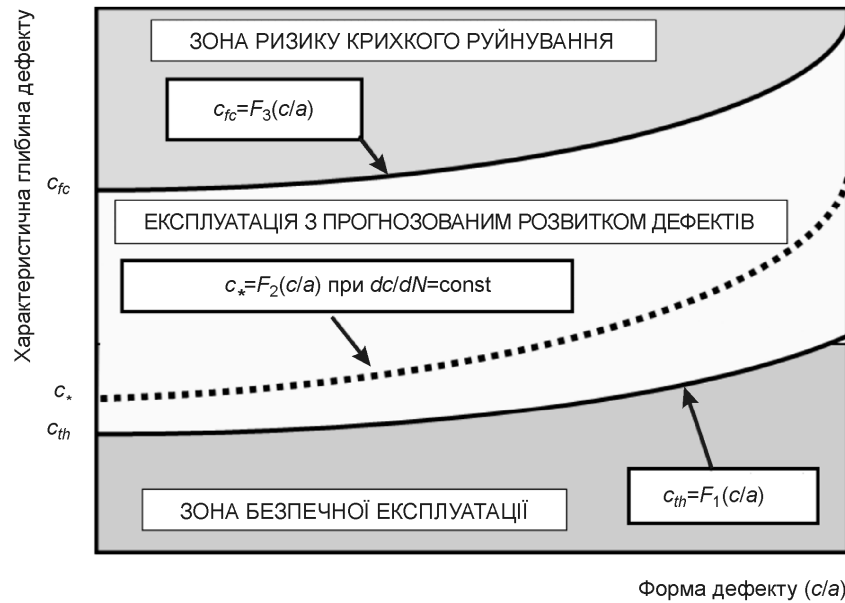


Рисунок 7 – Діаграма оцінки робоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами

де  $A$  і  $m$  константи системи „матеріал – середовище”, а величини  $C_{H(v)}$  і  $C_{H(t)}$  задовольняють умови:

$$C_{H(v)} \neq 0; C_{H(t)} \geq C_{H(v)}. \quad (3)$$

Фізична інтерпретація одержаного співвідношення (2) може бути наступною. В деяких останніх наукових публікаціях, присвячених проблемам водневого окрихчування металевих матеріалів використовується поняття „напруження індуковане воднем”, тобто абсорбований водень спричиняє в матеріалі додаткові напруження (див., наприклад, [20, 23]). У роботі [23], на підставі масштабних експериментальних даних, було показано, що напруження, спричинені воднем, зростають лінійно зі збільшенням його концентрації у матеріалі. На цій підставі відношення  $C_{H(t)}/C_{H(v)}$  можна інтерпретувати як деякий коефіцієнт, що відображає вплив на швидкість росту тріщини напруження індукованого абсорбованим воднем.

Залежність (2) є важливим результатом фізико-хімічної механіки матеріалів для визначення та прогнозування довговічності металевих конструкцій у воденьвмісних середовищах.

Використовуючи формулу (2), а також результати експериментальних досліджень наводнювання трубної сталі 16ГС [24, 25], розраховано значення локальної концентрації водню біля вершини тріщини  $C_{H(t)}$  за різної концентрації водню в об’ємі металу  $C_{H(v)}$  та різної швидкості  $da/dN$  розвитку тріщини. При цьому в основу розрахунку було покладено спрощену діаграму циклічної тріщиностійкості матеріалів, схематично показано на рис. 8, для трубних сталей за різних умов наводнювання. З цією метою були встановлені значення порогового КІН  $K_{th}$  та критичного КІН  $K_{fc}$  від концентрації

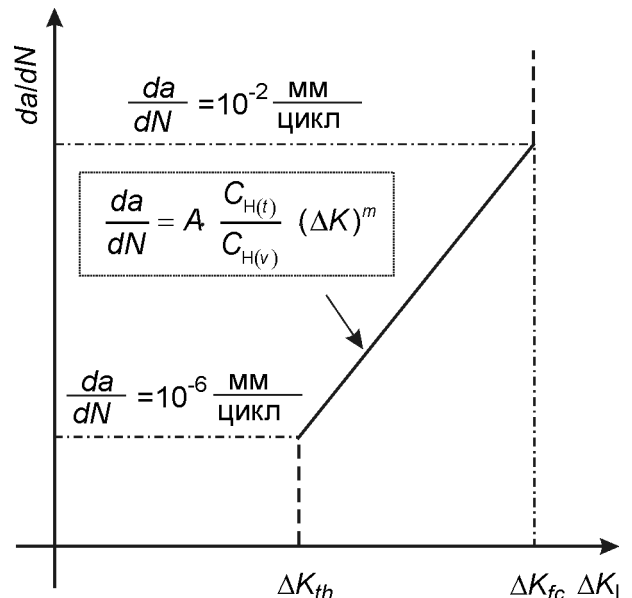


Рисунок 8 – Схематизоване представлення діаграми циклічної тріщиностійкості трубної сталі у воденьвмісному середовищі

водню в об’ємі металу  $C_{H(v)}$ . Тріщиноподібні дефекти у стінці трубопроводу з внутрішнім діаметром  $d$  та товщиною стінки  $t$  моделювали півеліптичною тріщиною з розмірами півосей  $a$  та  $c$  (рис. 6).

Для досліджених випадків локальну концентрацію водню біля вершини тріщини  $C_{H(t)}$ , що розвивається зі швидкістю  $da/dN$  у трубній сталі 16ГС з об’ємною концентрацією водню  $C_{H(v)}$  при розмаху КІН  $\Delta K$  розраховували за формулою:

$$C_{H(t)} = 5 \cdot 10^{13} C_{H(v)} \cdot (\Delta K)^{-6,42} \frac{da}{dN}. \quad (4)$$



Таблиця 1 – Розрахункові величини  $C_{H(t)}$  (в ppm) за різних значень  $C_{H(v)}$  та  $da/dN$

$da/dN$ , мм/цикл	$C_{H(v)}$ , ppm				
	1,97	2,07	2,20	2,47	2,68
$10^{-6}$	37,648	119,322	77,201	134,932	118,034
$10^{-5}$	23,278	47,854	47,09	82,322	77,626
$10^{-4}$	14,393	19,192	28,723	50,225	51,051
$10^{-3}$	8,899	7,697	17,52	30,642	33,574
$10^{-2}$	5,502	3,087	10,686	18,695	22,08

Результати розрахунків локальної концентрації водню біля вершини тріщини  $C_{H(t)}$  на підставі співвідношення (4) наведено у табл. 1.

На основі співвідношення (4) було також розраховано значення порогових  $\Delta K_{th}$  та критичних  $\Delta K_{fc}$  КІН від концентрації водню в об'ємі металу  $C_{H(v)}$ . Тут, згідно досліджень [26], використовували співвідношення (рис. 8):

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{da/dN=10^{-6} \text{ мм/цикл}} \quad (5)$$

$$\Delta K_{fc} = \Delta K_{da/dN=10^{-2} \text{ мм/цикл}} \quad (6)$$

Згідно з розрахованими значеннями  $\Delta K_{th}$  та  $\Delta K_{fc}$  було побудовано залежності порогового значення  $\Delta K_{th}$  (рис. 9а) та критичного значення  $\Delta K_{fc}$  (рис. 9б) від концентрації водню в об'ємі металу.

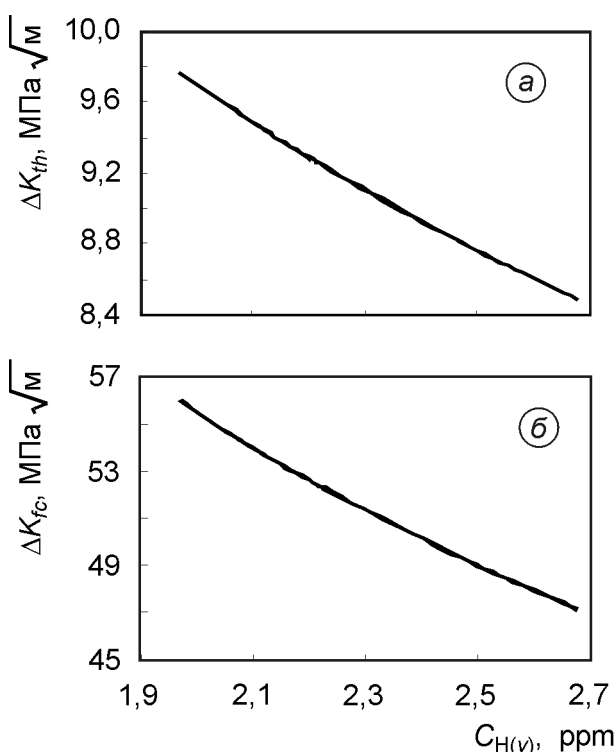


Рисунок 9 – Залежність порогового значення  $\Delta K_{th}$  (а) та критичного значення  $\Delta K_{fc}$  (б) від концентрації водню в об'ємі металу

Для більшої зручності при використанні в інженерних розрахунках дані для сталі 16ГС (рис. 9 можуть бути представлені аналітично за допомогою таких співвідношень:

$$K_{th} = 19,70261 - 9,15616 \cdot C_{H(v)} + 2,8775 \cdot (C_{H(v)})^2 - 0,4513 \cdot (C_{H(v)})^3 + 0,02597 \cdot (C_{H(v)})^4; \quad (7)$$

$$K_{fc} = 137,70625 - 84,39573 \cdot C_{H(v)} + 32,72698 \cdot (C_{H(v)})^2 - 6,62165 \cdot (C_{H(v)})^3 + 0,54266 \cdot (C_{H(v)})^4. \quad (8)$$

Використання залежностей (7) та (8) дає змогу для розглядуваної системи „матеріал – воденьвмісне середовище” оцінювати величини характеристичних значень КІН, а саме: порогового значення  $\Delta K_{th}$  та критичного значення  $\Delta K_{fc}$  від концентрації водню в об'ємі металу  $C_{H(v)}$ , тобто від ступеня наводнювання металу трубопроводу.

Оцінку потенційної небезпеки виявлених у трубопроводі тріщиноподібних дефектів здійснювали за підходом, викладеним у роботах [27, 28]. Він полягає у встановленні для даного трубопроводу, так званих „критичних” розмірів дефектів і побудови на цій основі відповідних діаграм для оцінювання його роботоздатності. В основу були покладені параметри механіки руйнування матеріалів, а саме – характеристики циклічної тріщиностійкості металу трубопроводу у воденьвмісному середовищі [17, 29]. Розглядалися найбільш типові випадки форми дефектів, які виявляють методами неруйнівного контролю при профілактичному огляді трубопроводів [26].

Діаграми оцінки роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу (труба:  $D = 526$  мм,  $t = 50$  мм) за різних концентрацій водню в об'ємі металу  $C_{H(v)}$  наведено на рис. 10. На цих діаграмах зони, що знаходяться нижче кривих 1 є зонами безпечної експлуатації трубопроводу. Виявлені в трубопроводі дефекти, що попадають в цю зону не будуть в подальшому розвиватись у заданих умовах експлуатації. Зони, що знаходяться вище кривих 2 є зонами ризику, оскільки для дефектів такого розміру можлива реалізація критерію катастрофічного руйнування трубопроводу. Зони, що знаходяться між кривими 1 та 2 – це зони розвитку наявних тріщиноподібних дефектів.



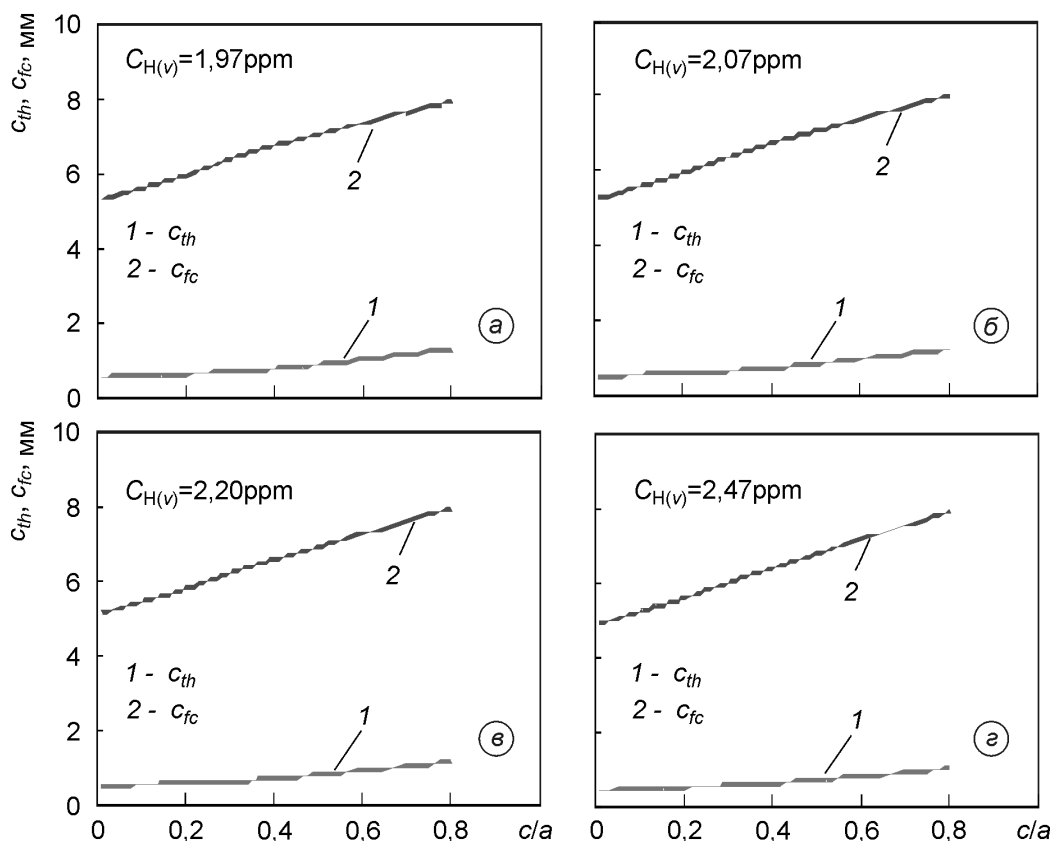


Рисунок 10 – Діаграми критичних розмірів дефектів  $c_{th}$  та  $c_{fc}$  у трубопроводі 526 × 50 мм за різних концентрацій водню в об’ємі металу

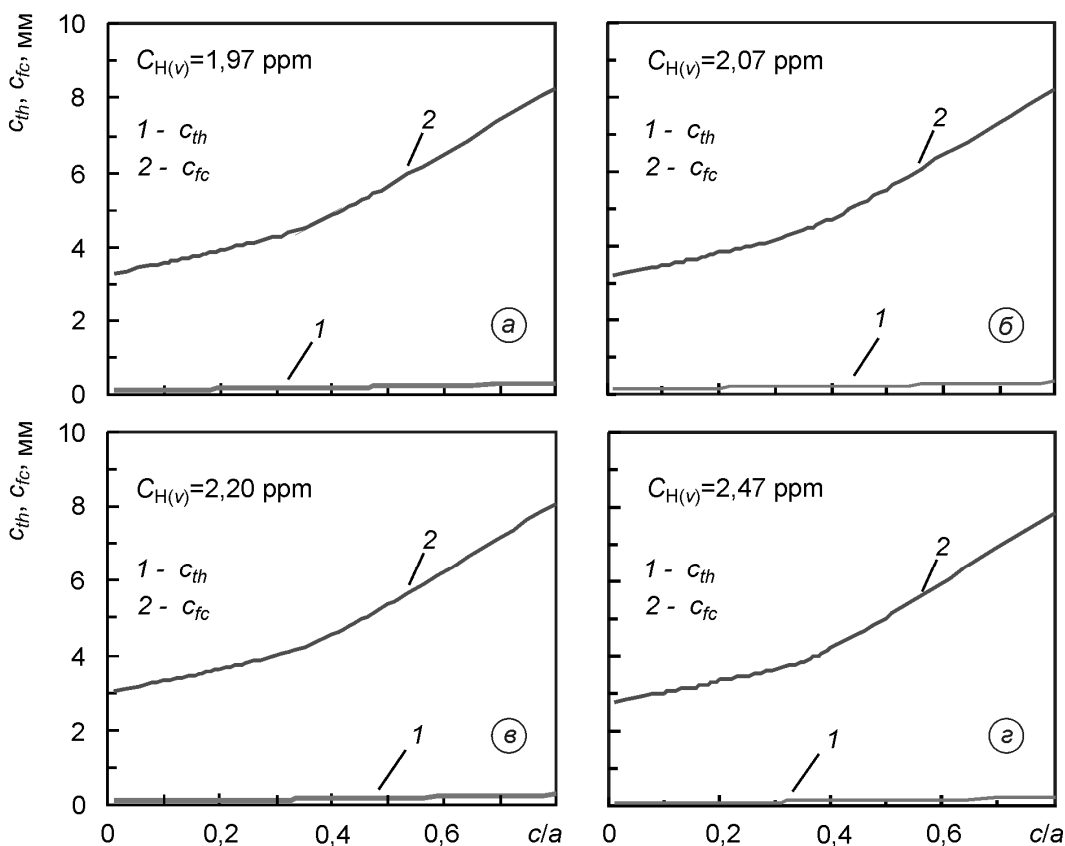


Рисунок 11 – Діаграми критичних розмірів дефектів  $c_{th}$  та  $c_{fc}$  у магістральному трубопроводі 610 × 11 мм за різних концентрацій водню в об’ємі металу

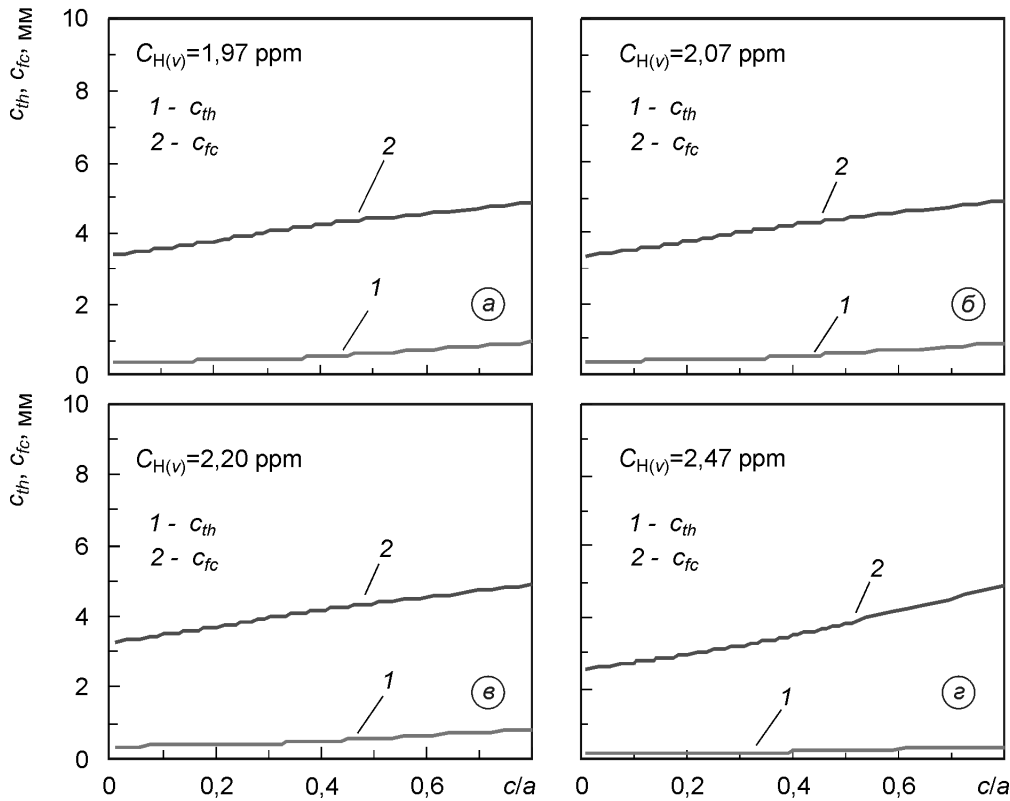


Рисунок 12 – Діаграми критичних розмірів дефектів  $c_{th}$  та  $c_{fc}$  у трубопроводі вторинної мережі  $219 \times 6$  мм за різних концентрацій водню в об’ємі металу

Аналогічні діаграми для магістрального трубопроводу та трубопроводу вторинної мережі наведено відповідно на рис. 11 та 12. Вони вказують на зменшення характеристичних значень розмірів дефектів  $c_{th}$  та  $c_{fc}$  зі зростанням концентрації водню в об’ємі металу трубопроводу. Тобто, водність трубопроводу з дефектами стає відчутно залежною від ступеня його наводнювання впродовж тривалої експлуатації.

Вплив об’ємної концентрації водню в металі на критичні розміри дефектів у трубопроводах різних типорозмірів зображено на рис. 13. Одержані результати вказують на зниження допустимих розмірів дефектів з ростом концентрації водню в об’ємі металу, тобто на його негативний вплив на експлуатаційну міцність та довговічність розглядуваних трубопроводів.

На завершення слід зауважити, що одержані залежності (рис. 13) можна розглядати як базові діаграми для оцінювання робоздатності та ризику руйнування трубопроводу за конкретних умов його експлуатації. Вони також дозволяють дати диференційовану оцінку впливу на довговічність конструкції розмірів виявлених дефектів залежно від стану матеріалу трубопроводу (ступеня його наводнювання).

**Висновки.** За підходами механіки руйнування матеріалів запропоновано спеціальні діаграми оцінювання робоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами за дії воденьвмісних середовищ. Такі

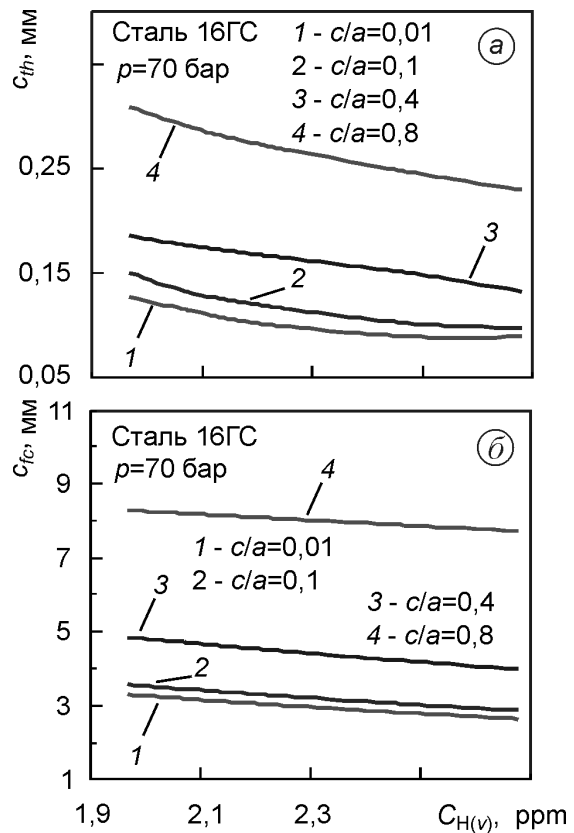


Рисунок 13 – Вплив об’ємної концентрації водню в металі на критичні розміри дефектів  $c_{th}$  (а) та  $c_{fc}$  (б) у магістральному трубопроводі  $610 \times 11$  мм

діаграми будують у координатах „характеристичні значення глибини тріщиноподібних дефектів – форма дефекту” (форму дефекту – тріщини приймають як півеліпс) і вони містять три зони: безпечної експлуатації трубопроводу, експлуатації з прогнозованим розвитком наявних тріщиноподібних дефектів та зону ризику катастрофічного руйнування.

Здійснено оцінювання безпечної експлуатації трубопроводів з тріщиноподібними дефектами у робочих середовищах різного складу, зокрема, розраховано безпечні значення розмірів дефектів залежно від їх форми та об'ємної концентрації водню в металі трубопроводів.

### Література

- 1 Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб. / За заг. ред. В. В. Панасюка. [Т. 11]: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватук, І. В. Ориняк та ін.: [за ред. Г. М. Никифорчина]. – Львів: Сполом, 2009. – 504 с.
- 2 Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст]: наук.-техн. посіб.: у 3-х томах / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин; за ред. В. В. Панасюка. – Т. 2: Деградація нафтопроводів і резервуарів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2011. – 447 с.
- 3 Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст]: наук.-техн. посіб.: у 3-х томах / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин; за ред. В. В. Панасюка. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2012. – 433 с.
- 4 Красовський А. Я. Методологія і експертна система для поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу / А. Я. Красовський, І. В. Ориняк, В. М. Тороп, С. А. Радченко, М. В. Бородій, А. С. Батура, А. В. Богдан // Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”: [зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / наук. кер. Б. Є. Патон]. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. – С. 309–314.
- 5 Шишківський В. А. Діагностування технічного стану засобів протикорозійного захисту та корозійного стану ГТС ДК „Укртрансгаз” / В. А. Шишківський, В. Б. Гаврильцев // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 4. – С. 48–51.
- 6 Охрімчук С. О. Огляд можливих причин виникнення тріщин на двшовних трубах / С. О. Охрімчук, С. М. Руденко, Р. М. Бабельський // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 4. – С. 23–25.
- 7 Щербаков С. Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / С. Г. Щербаков. – М.: Наука, 1982. – 207 с.
- 8 Василюк В. М. Підвищення надійності роботи магістральних нафтопроводів ВАТ „Укртрансгаз” / В. М. Василюк // Вісник національної газової спілки України. – 2004. – № 4. – С. 11–14.
- 9 Зайцев Л. Ф. Регулирование режимов работы магистральных нефтепроводов / Л. Ф. Зайцев. – М.: Недра, 1982. – 240 с.
- 10 Борисенко В. Коррозионное разрушение газопроводов / Владимир Борисенко, Юрий Нихаенко, Виктор Крикун // Проблемы коррозии та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2006): у 2-х т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – Т. 1. – С. 296–299.
- 11 Поляков С. Корозія внутрішньої поверхні магістральних газопроводів / Сергій Поляков, Людмила Ниркова, Анатолій Клименко, Сергій Коваленко // Проблемы коррозии та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2006): у 2-х т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – Т. 1. – С. 300–304.
- 12 Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 342 с.
- 13 Capelle J. Using the Existing Natural Gas Network to Transport Hydrogen / J. Capelle, I. Dmytrakh, J. Gilgert G. Pluvinage // Le climat en question: séminaire EMMA, 10 May 2007: proceedings. – Nancy (France): University of Nancy, 2007. – P. 14.
- 14 Yan M. Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging / Maocheng Yan, Yongji Weng // Corrosion Science. – 2006. – V. 48, Is. 2. – P. 432–444.
- 15 Андрейків О. Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у воденьвмісних середовищах / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
- 16 Shipilov S. A. Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection / Sergei A. Shipilov, Iain Le May // Engineering Failure Analysis. – 2006. – V. 13, Is. 7. – P. 1159–1176.
- 17 Capelle J. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh, G. Pluvinage // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – V. 33, Is. 24. – P. 7630–7641.
- 18 Hanneken J. W. Hydrogen in metals and other materials: a comprehensive reference to books, bibliographies, workshops and conferences / John W. Hanneken // International Journal of Hydrogen Energy. – 1999. – V. 24, Is. 10. – P. 1005–1026.
- 19 Gadgil V. J. Effect of hydrogen on mechanical behaviour / V. J. Gadgil // Materials Ageing and Life Management (ISOMALM 2000): Int. Symp., 3–6 Oct. 2000, Kalpakkam (India). – Allied Publishers Limited, 2000. – P. 1039–1044.

20 Effects of Hydrogen on Materials: Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference / Ed. by Brian Somerday, Petros Sofronis, Russell Jones. – Ohio (USA): ASM International, Materials Park, 2009. – 766 p.

21 Katz Y. Nanomechanical probes as new approaches to hydrogen/deformation interaction studies / Y. Katz, N. Tyimiak, W.W. Gerberich // Engineering Fracture Mechanics. – 2001. – V. 68, Is. 6. – P. 619–646.

22 Syrotyuk A. M. Methods for the Evaluation of Fracture and Strength of Pipeline Steels and Structures Under the Action of Working Media. Part II. Influence of Hydrogen-Containing Media / A. M. Syrotyuk, I. M. Dmytrakh // Materials Science (Springer Science + Business Media New York). – 2015. – V. 50, No 4. – P. 475–487.

23 Zhang T. Study of correlation between hydrogen-induced stress and hydrogen embrittlement / T. Zhang, W.Y. Chu, K.W. Gao, L.J. Qiao // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – V. 347, Is. 1–2. – P. 291–299.

24 Лакомский В. И. Некоторые особенности проведения локального масс-спектрального анализа содержания газовых примесей / В. И. Лакомский, О. Д. Смиян // Методы определения газов в металлах и сплавах: науч.-техн. конф., 1971 г. – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1971. – С. 115–124.

25 Dmytrakh I. M. Experimental study of fatigue crack growth in pipeline steel under hydrogenating conditions [Електронний ресурс] / Dmytrakh I. M., Smiyan O. D., Syrotyuk A. M. // Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale: 18th European Conf. on Fracture (ECF-18), 30.08–03.09.2010: Dresden (Germany): proceedings. – 80 Min / 700 Mb. – Dresden (Germany): DVM, 2010. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 2000, XP; MS Word 97–2000. – Назва з диска.

26 Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб. / За заг. ред. В.В. Панасюка. [Т. 13]: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк: [за ред. В.В. Панасюка]. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.

27 Dmytrakh I. M. Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines / I. M. Dmytrakh // Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines: NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – The Netherlands: Springer, 2008. – P. 99–113.

28 Dmytrakh I. M. On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches / I. M. Dmytrakh // Notch Effects in Fatigue and Fracture: NATO Science Series: II. Mathematics, Physics and Chemistry. – The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. – V. 11. – P. 331–346.

29 Capelle J. Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength / J. Capelle, I. Dmytrakh, G. Pluvinage // Corrosion Science. – 2010. – V. 52, Is. 5. – P. 1554–1559.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
03.09.15*

*Рекомендована до друку  
професором Грудзом В.Я.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Никифорчиним Г.М.  
(відділ діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів)*