

УДК 620.191.33

А.М. Сиротюк

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

**ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТОЗДАТНОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ
ІЗ УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КОРОЗИВНОГО ЧИННИКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
СЕРЕДОВИЩ**

Базуючись на концепціях механіки руйнування матеріалів запропоновано спеціальні діаграми оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами за дії корозійних середовищ. Ці 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. Наведено приклад оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводних систем пароводяного тракту енергоблоків ТЕС. Такі дані можна використати для інтерпретації результатів неруйнівного контролю дефектних трубопроводів, а також для формування рекомендацій при проведенні технічної діагностики тривало експлуатованих трубопроводних систем теплоенергетичного призначення.

Ключові слова: трубопроводні конструкції; низьколеговані сталі; статичні та циклічні навантаження; корозійні середовища; концентратори напружень; тріщиноподібні дефекти; тріщиностійкість матеріалу; діаграми оцінювання роботоздатності та ризику руйнування.

А.М. Сыротюк**ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО ФАКТОРА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СРЕД**

Основываясь на концепциях механики разрушения материалов предложены специальные диаграммы оценки работоспособности и риска разрушения трубопровода с трещиноподобными дефектами при воздействии коррозионных сред. Эти диаграммы строят в координатах „характеристические значения глубины трещиноподобных дефектов – форма дефекта” (форму дефекта – трещины принимают как полуэллипс). Диаграммы содержат три зоны: безопасной эксплуатации трубопровода, эксплуатации с прогнозируемым развитием имеющихся трещиноподобных дефектов и зону риска катастрофического разрушения. Приведен пример оценки работоспособности и риска разрушения трубопроводных систем пароводяного тракта энергоблоков ТЭС. Такие данные можно использовать для интерпретации результатов неразрушающего контроля дефектных трубопроводов, а также для формирования рекомендаций при проведении технической диагностики длительноэксплуатируемых трубопроводных систем теплоэнергетического назначения.

Ключевые слова: трубопроводные конструкции; низколегированные стали; статические и циклические нагрузки; коррозионные среды; концентраторы напряжений; трещиноподобные дефекты; трещиностойкость материала; диаграммы оценки работоспособности и риска разрушения.

A. M. Syrotyuk**WORKABILITY CHARACTERISTICS EVALUATION OF PIPELINE STEELS WITH
TAKING INTO ACCOUNT OF CORROSION FACTOR EFFECT OF OPERATING
ENVIRONMENTS**

Based on the conceptions of fracture mechanics of materials, the special diagrams for assessment of workability and fracture risk of pipeline with crack-like defects have been proposed for case of corrosive environments. These diagrams are built in coordinates „critical depth of crack-like defects – shape of defect” (shape of defect has been considered as semi-elliptical) and they contain three zones: safe exploitation, exploitation with predicted growth of existed defects and zone of brittle fracture risk. The example of serviceability and fracture risk assessment for the pipeline systems of steam circuit of NPP units are given. Such data can be used for interpretation of the NDT results of defective pipelines and also for formulating of the recommendations under technical diagnostics of long-term exploited pipeline systems of heat-and-power equipment.

Keywords: pipeline structures; low-alloyed steels; static and cyclic loadings; corrosive environments; stress concentrators; crack-like defects; crack growth resistance of material; diagrams of assessment of workability and fracture risk.

Постановка проблеми. Технічна діагностика та досвід експлуатації відповідальних трубопроводних конструкцій засвідчують, що в таких об'єктах зростає кількість, так званих, нетрадиційних пошкоджень, які не прогнозувалися нормативними інструкціями та документами і виникають внаслідок тривалої роботи устаткування, або різноманітних відхилень від експлуатаційних режимів.

Для теплової енергетики технологічні дефекти, і в першу чергу, дефекти зварних з'єднань трубопроводів різноманітного призначення відіграють важливу роль у визначенні ресурсу обладнання тепломеханічної частини станцій. Кількість аварійних ситуацій, спричинених дефектами зварних з'єднань труб, є значною, і навіть має певну тенденцію до зростання. Характерним прикладом [9] може бути пошкодження екранних труб (рис. 1) типорозміром 60 × 6,0 мм

виготовлених зі сталі 20 на котлі типу ТП-92 ст. № 11 енергоблоку Добротвірської ТЕС ПАТ „ДТЕК Західенерго”. На момент виникнення аварійної ситуації котел напрацював 303997 год та 1438 пусків (після капітального ремонту серпень–жовтень 2006 р. – 12294 год). Пошкодження екранних труб на барабанних котлах високого тиску було зафіксовано після тривалої експлуатації, як правило, за заводськими контактними стиками зі сторони паливної. Вони зумовлені корозійно-кавітаційними процесами, що виникають внаслідок недостатньо ретельного видалення (на заводі-виробнику) напливів металу і зварювального ґрату з неметалевими включеннями після контактного зварювання оплавленням, що є каталізаторами утворення пошкоджень.

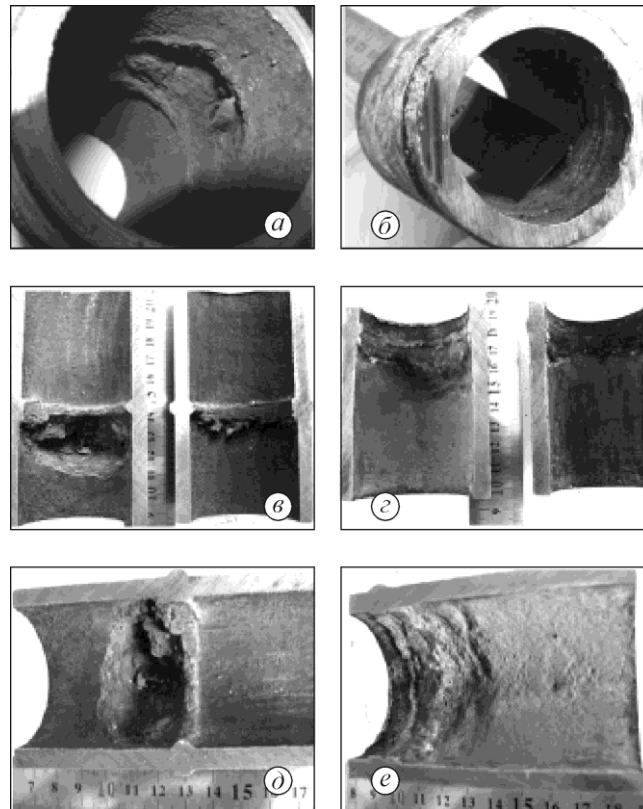


Рис. 1. Характерні пошкодження екранних труб за заводськими контактними стиками по ходу робочого середовища (пароводяної суміші): а, в, д – пошкодження труби 1; б, з, е – пошкодження труби 2 [9]

Вивчення умов роботи основних конструкційних елементів енергетичного устаткування що працює у паровому потоці, дозволяє стверджувати, що їх експлуатаційні пошкодження мають ерозійний або абразивний тип зношування. При цьому, зовні деталі покриваються неглибокими пітингами, розмір яких з часом поступово збільшується. В цьому випадку пітингова або точкова корозія перетворюється у виразкову і, у деяких випадках, ці виразки можуть утворювати наскрізні пошкодження, або, як ефективні концентратори напружень, можуть стати джерелом зародження тріщин. Характер ерозійного пошкодження залежить від структурного класу сталей та режимів експлуатації. Ці випадки досліджувались у роботі [12], де показано, що лопатки останньої ступені парової турбіни К-300-240 зазнають інтенсивного ерозійного зношування на відстані 0...90 мм від вершини лопатки. Процес зношування зумовлений технологічними процесами підтримання певного температурного режиму промперегріву і контролю за утворенням вологи та її кількістю (рис. 2).

Іншим прикладом такого типу пошкоджень, що призводять до виникнення у конструктивних елементах локалізованої концентрації напружень, може бути стоянкова корозія (рис. 3), яка проявляється при тривалих простоях котлів, у вигляді пітингів, окремих поверхневих виразок та їх ланцюжків (як правило, у недренованих зонах змійовиків пароперегрівачів з залишками конденсату). Під дією термоциклічного навантаження або механічних напружень під час роботи котла на окремих ділянках внутрішньої поверхні труб пароперегрівачів відбувається руйнування (розтріскування, відшарування, деградація) захисних оксидних плівок, внаслідок чого, під час простою котла та зволоження вказаних ділянок, саме на їх незахищеній поверхні, в першу чергу, розвивається процес стоянкової корозії. Водночас, дефекти утворені при простої котла в

результаті стоянкової корозії, стають вираженими концентраторами напружень, а тому, після запуску котла в роботу активно прогресують, переростаючи в тріщини [2].

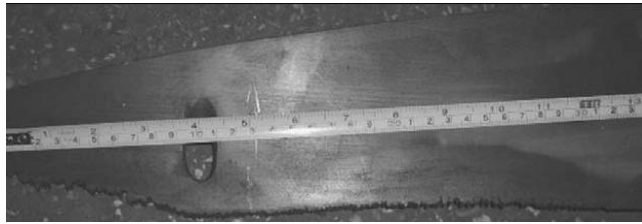


Рис. 2. Ерозія робочої лопатки останньої ступені парової турбіни К-300-240 [12]

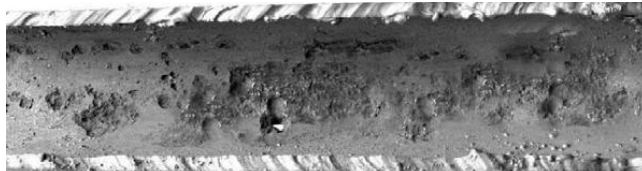


Рис. 3. Типовий вигляд внутрішньої поверхні труб першої ступені конвективного пароперегрівача низького тиску котла ТПП-312А ураженої стоянковою корозією [2]

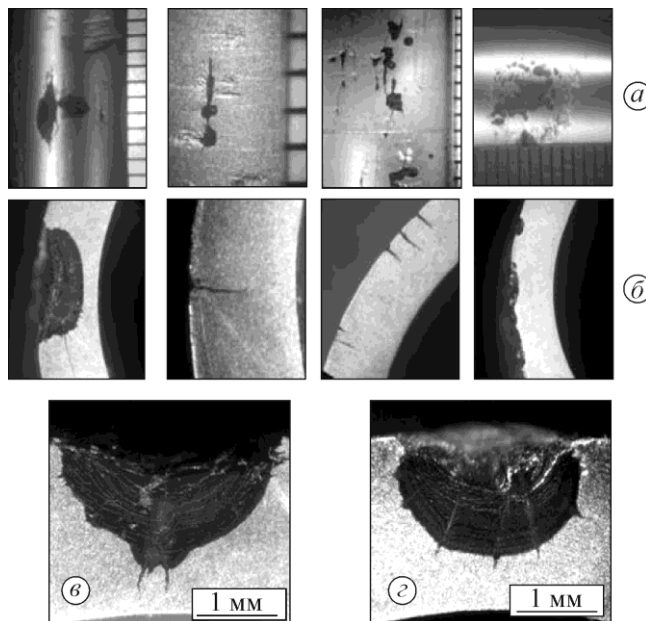


Рис. 4. Приклади експлуатаційних дефектів теплообмінних труб парогенераторів ПГВ-1000 АЕС, виконаних з аустенітної нержавіючої сталі 08X18Н10Т [10]: (а) – вигляд дефектів на поверхні труб; (б) – вигляд дефектів у площині шліфа; (в), (г) – зародження тріщиноподібних дефектів від корозійних виразок на зовнішній поверхні теплообмінних труб

Експлуатаційні дефекти теплообмінних труб парогенераторів (рис. 4) також мають корозійну природу. В даному випадку ситуація погіршується тим, що теплообмінні труби працюють за підвищених температур, що додатково збільшує концентрацію напружень у таких пошкоджених елементах. Внаслідок розвитку таких дефектів, вони об'єднуються та переростають у магістральні тріщини, подальший розвиток яких призводить до руйнування елемента конструкції (рис. 5), і тим самим, до аварійної зупинки обладнання.



Рис. 5. Зовнішній вигляд руйнованої теплообмінної труби [3]

Наведені вище приклади свідчать, що характерною особливістю тривалої експлуатації трубопроводів енергетичного устаткування є утворення чисельних пошкоджень металу, які мають корозійну чи корозійно-механічну природу. Це призводить до виникнення у конструктивних елементах локалізованої концентрації напружень, яку необхідно враховувати при оцінюванні ризику руйнування та залишкового ресурсу такого устаткування.

Зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Електроенергетика – базова галузь економіки, яка забезпечує потреби країни в електричній енергії і може виробляти значний її обсяг для експорту. До 2030 р. основою електроенергетичної системи України залишатимуться теплові електростанції (ТЕС), тому вирішальне значення має технічний стан та безпечна експлуатація діючого теплоенергетичного устаткування [7].

На сьогодні 92,1% енергоблоків ТЕС відпрацювали свій розрахунковий ресурс (100 тис. год), а 63,8% перетнули визнану в світовій енергетичній практиці межу граничного ресурсу та межу фізичного зносу – відповідно, 170 тис. та 200 тис. год і потребують модернізації чи заміни [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній інженерній практиці при вирішенні проблем оцінювання міцності дефектних елементів відповідальних конструкцій тривалої експлуатації, а також при продовженні терміну їх безпечної та надійної роботи, в якості наукового інструментарію, широко використовуються підходи механіки руйнування матеріалів [1, 6]. Такий вибір обґрунтовується наступним чином. Досвідом експлуатації та численними дослідженнями однозначно доведено, що процеси пошкодження та руйнування елементів конструкцій та деталей машин під впливом експлуатаційних умов (статичні та циклічні механічні навантаження, рідинні та газоподібні агресивні середовища, підвищена температура тощо) є по своїй фізичній суті локалізованими фізико-механічними процесами утворення та розвитку в матеріалі тріщиноподібних дефектів до критичних розмірів в місцях підвищеної концентрації напружень (отвори, вирізи, щілини та інші технологічні та конструктивні концентратори напружень).

Механіка руйнування матеріалів є самостійним розділом механіки деформівного твердого тіла, що вивчає закономірності зародження та розвитку неоднорідностей і дефектів структури матеріалу типу тріщин, за статичних та динамічних навантажень. У механіці руйнування широко використовується аналітичний апарат механіки суцільних середовищ, теорія пружності, теорія пластичності, матеріалознавство, але при цьому вводяться нові підходи й критерії, властиві лише їй одній [1, 6].

Основною концепцією [1, 6] механіки руйнування матеріалів є трактування процесу руйнування як процесу зародження і поширення тріщини у деформованому твердому тілі. У рамках такого підходу важливим є врахування особливостей напружено-деформованого стану у вершині тріщини та встановлення критеріїв руйнування твердих тіл з тріщинами, тобто поширення тріщини в конкретному тілі за заданих умов його деформування у заданому середовищі.

Слід зазначити, що підходи та уявлення механіки руйнування матеріалів покладено в основу сформованої в останні роки нової галузі механіки руйнування твердих тіл – механіки корозійного руйнування [4, 11]. Об'єктом її досліджень є процеси руйнування матеріалів та елементів конструкцій, що зазнають одночасної дії механічних напружень (статичних чи циклічних) і різних корозійно-агресивних середовищ.

Руйнування конструкційних металів і сплавів за сумісної дії механічних навантажень та корозійно-агресивних середовищ визначається сукупністю фізико-механічних і фізико-хімічних процесів [14, 15], природа яких залежить від матеріалу та характеру прикладених до нього навантажень, а також від типу середовища. Сам процес корозійного руйнування конструкційних металів та сплавів під дією тривалих статичних або циклічних навантажень та корозійних середовищ характеризується певною стадійністю, що підтверджено численними дослідженнями [4, 8, 13].

Формулювання цілей статті. Базуючись на концепціях механіки руйнування здійснити розрахункове оцінювання характеристик роботоздатності трубних сталей із урахуванням впливу корозивного чинника експлуатаційних середовищ.

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси руйнування конструкційних металів та сплавів теплоенергетичного призначення за дії механічних навантажень та робочих середовищ.

Мета роботи – розробити і обґрунтувати критерії для оцінювання характеристик роботоздатності матеріалів, а також елементів трубних конструкцій за дії корозивних середовищ; оцінити ризик руйнування та міцність трубних сталей із урахуванням впливу корозивного чинника експлуатаційних середовищ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основними характеристиками для розрахункового оцінювання міцності та довговічності, а відтак, безпечної експлуатації елементів конструкцій, що містять дефекти типу тріщин, є характеристики тріщиностійкості матеріалів, які встановлено експериментальним шляхом для умов, що відповідають умовам експлуатації конструкції.

Перш за все – це діаграми циклічної (втомної) тріщиностійкості матеріалів, оскільки практично всі відповідальні конструкції тривалої експлуатації у різних галузях індустрії (енергетичне устаткування, трубопровідний транспорт тощо) зазнають дії змінних (циклічних) навантажень. Під час побудови таких діаграм принципово важливо урахувати чинник реального робочого середовища (наприклад, корозійного чи воденьвмісного).

Базові (для розрахунків) діаграми циклічної тріщиностійкості – це залежності швидкості росту корозійно-втомної тріщини dc/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) за цикл навантаження ΔK_I , побудовані на основі експериментальних результатів, одержаних за відповідними методиками випробувань [6]. Такі діаграми розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим значенням ΔK_{th} , яке відповідає значенню ΔK_I , коли не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім ΔK_{fc} , яке відповідає значенню ΔK_I , за якого реалізується спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

Окрім цього, під час розрахунків для конструктивного елемента заданої геометрії необхідно знати схему його навантаження, форму і місце розташування тріщиноподібних дефектів, а також відповідні аналітичні співвідношення для обчислення КІН.

Слід зауважити, що здебільш [4, 7] дефекти можна моделювати півеліптичною тріщиною з розмірами півосей a та c (рис. 6). За такого підходу залежно від відношення (a/c) можна з достатньою точністю аналітично описати найтиповіші форми дефектів, які виявляють методами неруйнівного контролю під час профілактичного огляду елементів конструкцій упродовж їх експлуатації.

Об'єктами оцінок були елементи трубопровідних систем різного призначення. Розглянуто найбільш типові випадки форми початкових дефектів, які виявляються методами неруйнівного контролю під час профілактичного огляду трубопроводів в експлуатаційних умовах (табл. 1).

Для підрахунку значень КІН ΔK_I по контуру півеліптичної тріщини на внутрішній поверхні труби (рис. 6) використовується наступна залежність [4]:

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1,12 - 0,48\beta + 0,13 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \cdot \beta (3\beta - 2 - \alpha)}{1 - \alpha (1 - 0,75\beta)} + \right. \\ \left. + \frac{1,13}{k_f} \left[\beta \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \cdot (\alpha - 0,4 + 0,6\beta) + \beta (1 - 1,4\alpha) + 0,62\lambda (1 - \beta) \cdot \psi(\alpha) \right] \right\}, \quad (1)$$

де $\Delta \sigma$ – розмах напружень розтягу за цикл навантаження: $\Delta \sigma = (\Delta p \cdot d) / 2t$; Δp – пульсація (зміна тиску) робочого середовища в трубопроводі за цикл навантаження; d – внутрішній діаметр труби; t – товщина стінки труби; c – глибина тріщини; $\beta = c/a$; ($0 \leq \beta \leq 1$), a – довжина тріщини; $\alpha = c/t$; ($0 \leq \alpha \leq 0,4$); θ – кут від малої осі півеліптичної тріщини; k_f – коефіцієнт, що враховує відхилення поперечного перерізу

$$\text{труби від колового } \lambda = \begin{cases} 1, & \alpha \geq 1/20 \\ 1,15 - 60(\alpha)^2; & 0 \leq \alpha \leq 1/20 \end{cases}, \quad \psi(\alpha) = (\alpha)^{-1/2} \cdot \sqrt{(1-\alpha)^{-3} - (1-\alpha)^3}.$$

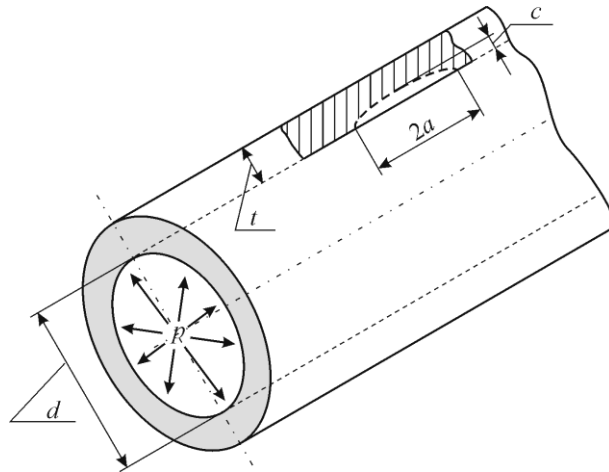


Рис. 6. Модельне представлення дефекту в стінці труби півеліптичною тріщиною

Вважається, що тріщиноподібний дефект розвивається зі збільшенням кількості циклів навантаження N зберігаючи півеліптичну форму. Однак співвідношення півосей a та c є величиною змінною, тобто:

$$c/a = f(C_m, N), \tag{2}$$

і залежить від системи „матеріал–середовище”, що характеризується деякими сталими C_m .

Таблиця 1. Типові початкові дефекти на внутрішній поверхні трубопроводів

№ з/п	Тип дефекту	c/a
1	Корозійна виразка	0,8
2	Корозійна виразка	0,6
3	Корозійна виразка	0,4
4	Корозійна боріздка	0,2
5	Корозійна боріздка	0,1
6	Корозійна боріздка	0,05
7	Корозійна боріздка	0,01

Опір поширенню тріщини, як в напрямку півосі c , так і в напрямку півосі a , повністю визначається діаграмою циклічної тріщиностійкості металу трубопроводу, яка одержана при заданих експлуатаційних умовах. Остання аналітично описується за допомогою степеневі залежності, тобто:

$$dc/dN = da/dN = C(\Delta K)^n. \tag{3}$$

Розрахункове оцінювання міцності та безпечної експлуатації дефектних елементів трубопровідних конструкцій за дії корозійних чи воденьвмісних середовищ здійснюється за критеріями наведеними нижче.

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 ΔK_I , які побудовані на основі експериментальних даних, одержаних за відповідними методиками випробувань. Такі діаграми розміщені між двома граничними значеннями: нижнім пороговим ΔK_{th} , яке відповідає значенню ΔK_I , за якого не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім ΔK_{fc} , яке відповідає значенню ΔK_I , коли настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

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

$$dc/dN = C \cdot (\Delta K_I)^n, \tag{4}$$

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 ΔK_I по контуру півеліптичної тріщини на внутрішній поверхні труби використовували відомі з літератури аналітичні залежності.

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 степеневі залежності (4).

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_{th} . 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 Δc виявленого тріщиноподібного дефекту глибиною c_0 , тобто $\Delta c \leq \Delta c^*$ при $\Delta N = \Delta N^*$, де Δc^* – допустимий приріст тріщини в глибину; ΔN^* – 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_0 можуть максимально розвинути на 1 мм упродовж 10000 циклів навантаження.

Процедура визначення допустимої глибини тріщини c^* у стінці трубопроводу за заданих значень Δc^* та ΔN^* 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 розглядуваного 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 $c_{th} = F_1(c/a)$. 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.

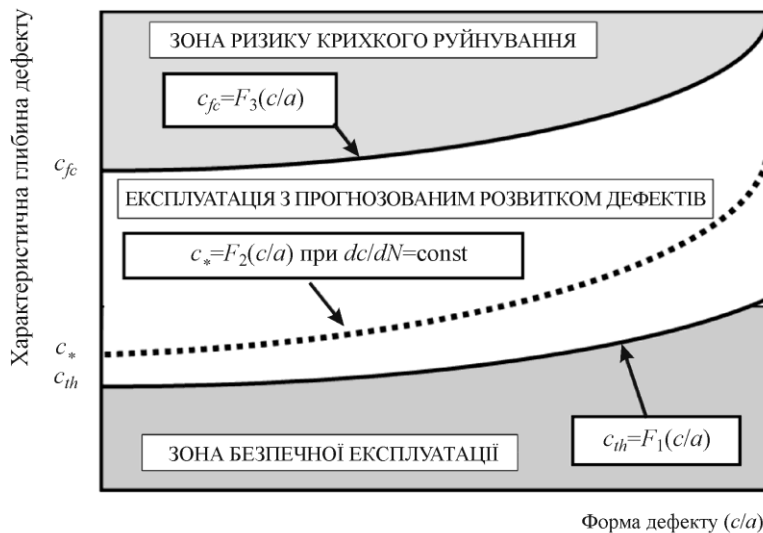


Рис. 7. Діаграма оцінки роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами

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 $c_* = F_2(c/a)$. 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 $c_{fc} = F_3(c/a)$. 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 недопустима.

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

Експертні оцінки можливого ризику руйнування трубопровідних систем ТЕС, які знаходяться під дією пульсуючого тиску теплоносія (водного робочого середовища) здійснено на підставі критеріїв викладених у розділі 6. На їх основі для кожного розглядуваного трубопроводу побудовано спеціальні діаграми в координатах „критичні значення глибини тріщиноподібних дефектів–форма дефекту”.

Нижче наведена чисельна база даних для експертних заключень про можливість подальшої експлуатації трубопроводів з дефектами виявленими під час профілактичних оглядів. Тут враховано наступні чинники: фактичний стан металу на даній ТЕС; реальний склад робочого середовища; геометричні розміри елемента; специфіка експлуатаційних навантажень та форма тріщиноподібного дефекту. Слід відзначити, що при розрахунках характеристичних значень був врахований також і тип ділянки трубопроводу: прямолінійна ділянка – згин. Це здійснено шляхом підстановки у формулу (1) різних значень коефіцієнта k_f , що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового. Було прийнято [5], що для прямолінійної ділянки трубопроводу його поперечний переріз залишається близьким до кола, тобто $k_f = 1$, а на згині його значення рівне $k_f = 0,8$.

Результати обчислень наведено в табл. 2, яка містить значення порогової c_{th} та критичної c_{fc} глибини тріщин залежно від їх форми (c/a) для труб різних типорозмірів. Діаграма оцінювання роботоздатності та ризику руйнування нових та експлуатованих впродовж 145 тис. год живильних трубопроводів представлено на рис. 8.

Таблиця 2.

Характеристичні значення глибини тріщиноподібних дефектів у новому живильному трубопроводі (труба 467 × 45 мм)

Характеристика	c/a	k_f	c_{th} , мм	c_{fc} , мм
			$K_{th} = 6,32 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$	$K_{fc} = 22,05 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$
Матеріал: сталь 16ГС Номінальний зовнішній діаметр $D = 467$ мм Номінальна товщина стінки в нейтральній зоні $t = 45$ мм Робочий тиск $p = 35$ МПа Вода високого ступеня очистки	0,01	0,8	0,69	8,38
		1,0	0,99	10,62
	0,05	0,8	0,72	8,69
		1,0	1,03	11,00
	0,1	0,8	0,75	9,10
		1,0	1,08	11,52
	0,2	0,8	0,83	10,05
		1,0	1,20	12,70
	0,4	0,8	1,02	12,73
		1,0	1,50	15,99
	0,6	0,8	1,30	17,62
		1,0	1,94	21,55
	0,8	0,8	1,72	28,51
		1,0	2,54	31,29

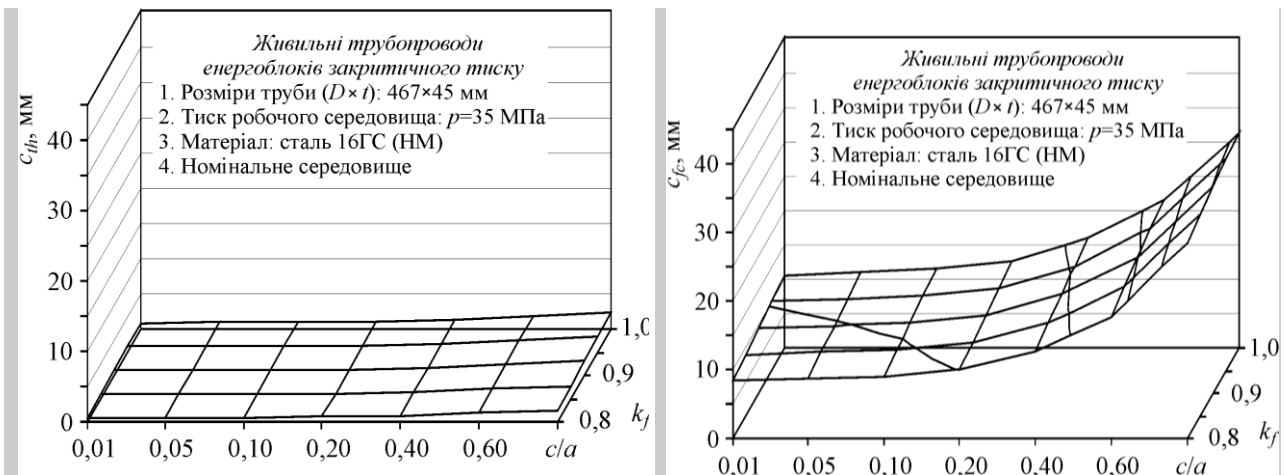


Рис. 8. Діаграми оцінювання роботоздатності та ризику руйнування нового (неексплуатованого) живильного трубопроводу (труба 467 × 45 мм)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Базуючись на концепціях механіки руйнування матеріалів запропоновано спеціальні діаграми оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами за дії корозійних і воденьвмісних середовищ. Ці 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. Наведено приклад оцінювання роботоздатності та ризику руйнування трубопроводних систем пароводяного тракту енергоблоків ТЕС. Такі дані можна використати для інтерпретації результатів неруйнівного контролю дефектних трубопроводів, а також для формування рекомендацій при проведенні технічної діагностики тривало експлуатованих трубопроводних систем теплоенергетичного призначення.

1. Броек Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
2. Вайнман А. Б. Анализ повреждаемости труб пароперегревателей котлов энергоблоков сверхкритического давления / А.Б. Вайнман, А.В. Жабров, Е.Л. Болтенкова и др. // Энергетика та електрифікація. – 2009. – № 10. – С. 9–25.
3. Давиденко С.Е. Вопросы продления ресурса парогенераторов АЭС с ВВЭР–440 / С.Е. Давиденко, Н.Б. Трунов, В.А. Григорьев и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 1. – С. 38–42.

4. 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.
5. Дмитрах І.М. Оцінка ризику руйнування та запобігання виникненню аварійних ситуацій у парогенеруючих системах енергоблоків ТЕС за присутності техногенних органічних домішок у теплоносії / І.М. Дмитрах, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк, О.Д. Сміян, Р.А. Барна, Б.П. Русин, Ю.В. Обух // Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”: [зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. / наук. кер. Б.С. Патон]. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2009. – С. 109–114.
6. Механика разрушения и прочность материалов [Текст]: справ. Пособ./Под общ. ред. В.В. Панасюка. [Т. 1]: Основы механики разрушения материалов / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон. – К: Наукова думка, 1988. – 488 с.
7. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб./За заг. ред. В.В. Панасюка. [Т. 7]: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Сташук, Л. Тот: [за ред. І.М. Дмитраха]. – К.: ВД „Академперіодика”, 2005. – 378 с.
8. Міллер К.Дж. Застосування підходів мікроструктурної механіки руйнування до металів із різним станом поверхні / К. Дж. Міллер, Р. Акід // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1997. – Т. 33, № 1. – С. 9–32.
9. Мороз М.О. Виникнення пошкоджень екранних труб барабанних котлів високого тиску після довготривалої експлуатації / М.О. Мороз, І.П. Гарбузов // Енергетика та електрифікація. – 2009. – № 9. – С. 31–34.
10. Неклюдов И.М. Разновидности и диагностика эксплуатационных дефектов в теплообменных трубах парогенераторов АЭС / И.М. Неклюдов, А.С. Митрофанов, Л.С. Ожигов и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 1. – С. 79–85.
11. Романив О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин. – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
12. Тарелин А.А. Контроль распределения эрозионно опасной влаги в паровом потоке турбин при изменении режимных параметров / А.А. Тарелин, В.П. Скларов // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 5. – С. 13–18.
13. Akid R. Localised corrosion a new evaluation approach / R. Akid // Materials World. – 1995. – V. 3, № 11. – P. 522–525.
14. Parkins R.N. Environmental effects in crack growth / R.N. Parkins // The Journal of Strain Analysis for Engineering. – 1975. – V. 10, № 4. – P. 251–257.
15. Parkins R.N. Localized corrosion and crack initiation / R.N. Parkins // Materials Science and Engineering: A. – 1988. – V. 103, Is. 1. – P. 143–156.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2015.