

На правах рукопису

ДМИТРАХ
Ігор Миколайович

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ
КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЛОКАЛЬНОГО РУЙНУВАННЯ МЕТАЛІВ**

01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла,
05.17.14 — хімічний опір матеріалів та захист від корозії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

666.9.019:620.19

№ 26.84

66.018

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00825928 (Y)

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка АН України.

Офіційні опоненти: АНДРЕЙКІВ Олександр Євгенович, член-кореспондент АН України, професор, доктор технічних наук; ПЕТРОВ Леонід Микитович, професор, доктор технічних наук; КРИЖАНІВСЬКИЙ Євстахій Іванович, професор, доктор технічних наук.

Провідна установа — Інститут проблем міцності АН України (м. Київ).

Захист відбудеться « 31 » березня 1993 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої ради Д 01642.01 при Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка Академії наук України (290601, Львів, МСП, вул. Наукова, 5).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка АН України.

Автореферат розісланий « 23 » лютого 1993 р.

Учений секретар спеціалізованої ради, доктор технічних наук

НИКИФОРЧИН Г. М.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Проблема запобігання раптовому руйнуванню елементів конструкцій відповіального технологічного обладнання, що експлуатується в різних галузях промисловості в специфічних умовах, зокрема, при одночасній дії механічних навантажень та корозійно-агресивних середовищ, завжди стояла в центрі уваги інженерної практики. Даний факт обумовлений її виключною важливістю, яка визначається технічними, економічними та екологічними факторами. В світовій практиці відомі різноманітні випадки руйнування обладнання і конструкцій, які виникли із-за корозійно-механічного руйнування і привели до тяжких матеріальних та екологічних втрат. В даний час значимість і актуальність цієї проблеми зростає і набуває першорядного значення для розвитку сучасної техніки, якій властиві більш жорсткі експлуатаційні умови роботи та його однічної потужності обладнання. Це, в багатьох випадках, приводить до ускладнення конструктивних форм і росту абсолютних розмірів конструкції з одночасним підвищенням рівня як загальних, так і місцевих (локальних) напружень в його несучих елементах. Крім цього, освоєння нових технологічних процесів і виробництво нових речовин призводить до зростання параметрів робочого експлуатаційного середовища, як сукупності основних факторів, що визначають передчасне руйнування елементів конструкцій.

Багаточисельними дослідженнями показано, що основною причиною руйнування елементів конструкцій і деталей машин в заданих експлуатаційних умовах є локалізовані процеси утворення та розвитку тріщиноподібних дефектів до критичних розмірів. У зв'язку з даною проблемою в науці про міцність матеріалів і конструкцій на рубежі сорокових-п'ятдесятих років нашого століття сформувався новий науковий напрямок - механіка руйнування матеріалів. Цей розділ науки спрямований на розробку загальних підходів розрахунку на міцність і довговічність елементів конструкцій на основі даних про опір матеріалів зародженню і поширенню в них тріщин, тобто на основі вивчення самого механізму і кінетики процесу руйнування. В останні десятиліття в рамках загальних підходів механіки руйнування твердих тіл інтенсивний і самостійний розвиток одержує її нове відгалуження - механіка корозійного руйнування. Об'єктом її досліджень є процеси руйнування конструкційних матеріалів, що знаходяться під одночасною дією механічних навантажень та різноманітних корозійно-агресивних середовищ. Основна харак-

терна особливість даного наукового напрямку - це вирішення проблем пов'язаних з фізико-хімічними взаємодіями в системі "матеріал-середовище", які суттєво впливають на характер і особливості процесу руйнування матеріалу. Розроблені на даний час методологічні підходи механіки корозійного руйнування можна розділити на два основних напрямки. Для першого напрямку характерним є розгляд корозійного середовища в якості окремого фактору, що визначає умови випробувань матеріалу. При цьому формалізовано використовуються підходи механіки руйнування, що справедливі для випадків неважливих (інертних) з матеріалом середовищ. Другий напрямок характеризується визначенням локальних процесів корозійно-механічного руйнування матеріалу на основі даних про вплив зовнішніх фізико-хімічних факторів на процес розвитку корозійних тріщин. Необхідну для цього інформацію одержують із спеціально поставлених експериментів, що полягають в цілеспрямованих варіаціях фізико-хімічних умов випробувань з метою прискорення або гальмування процесу корозійного руйнування матеріалу (наприклад, використання в базовому корозійному середовищі спеціальних домішок, що є каталізаторами або інгібіторами тих або інших електрохімічних процесів, накладення на випробуваний зразок чи деталь зовнішнього потенціалу поляризації та ін.).

Основним і суттєвим недоліком таких підходів є те, що зміна зовнішніх факторів в цілому неадекватно відображає зміну фізико-хімічної ситуації в зоні передруйнування матеріалу в околі вершини тріщини, яка є визначальною характеристикою процесу локального корозійного руйнування матеріалу. Дане твердження на сьогоднішній день є вже доведеним. Неврахування цієї обставини, приводить до неоднозначності одержуваних результатів щодо корозійного розтріскування металів, а також їх трактовок і висновків; це, далі, суттєво знижує практичну і наукову цінність корозійно-механічних досліджень. Крім цього, використання існуючих підходів не дозволяє надійно визначати базові характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів для оцінки міцності і довговічності елементів конструкцій, а також прогнозувати зміну локальних характеристик міцності матеріалу в залежності від особливостей фізико-хімічної взаємодії в системі "матеріал-середовище".

У зв'язку з цим для універсального і більш коректного вирішення проблеми визначення та прогнозування процесів корозійного руйнування матеріалів, необхідна розробка нових підходів, які б враховували специфіку фізико-хімічної взаємодії корозійного сере-

довища і деформованого металу безпосередньо в зоні передруйнування матеріалу. Дана проблема є актуальною як в науковому, так і прикладному плані і спрямована на формування нового наукового напрямку - фізико-хімічної механіки процесів локального руйнування матеріалів в корозійних середовищах.

Мета роботи. Розробка методів визначення і прогнозування характеристик локального корозійно-механічного руйнування конструкційних металів з урахуванням параметрів напружено-деформованого стану матеріалу та параметрів електрохімічних процесів, які протікають між деформованим металом і корозійним середовищем в зоні передруйнування.

Поставлена мета реалізується шляхом комплексного вирішення наступних завдань.

1. Розробки методології, технічних засобів і апаратури, включаючи створення спеціальної автоматичної системи, що управляється комп'ютером, для дослідження характеристик локального корозійно-механічного руйнування металів, а також фізико-хімічних процесів, які протікають між деформованим матеріалом і корозійним середовищем в зоні передруйнування.
2. Визначення основних характеристик і закономірностей зміни фізико-хімічного стану зони передруйнування на різних етапах процесу корозійного руйнування матеріалу.
3. Встановлення фізико-механічних і електрохімічних умов початку процесу локального руйнування матеріалу та формування критеріїв старту (початку поширення) корозійної тріщини.
4. Розробки прискорених методів визначення та прогнозування порогових (тобто таких, при яких не відбувається поширення тріщини в заданих умовах випробовувань) параметрів тріщиностійкості матеріалу при корозійному розтріскуванні та корозійній втомі.
5. Розробки методології визначення базових (тобто таких, що служать основою для розрахунків на довговічність елементів конструкцій) діаграм корозійної тріщиностійкості матеріалів з врахуванням електрохімічних процесів у вершині тріщини.
6. Апробації та впровадження розроблених підходів при вирішенні практичних завдань по визначенню базових характеристик корозійної тріщиностійкості сталей енергообладнання з врахуванням типових водно-хімічних режимів його роботи.

Наукова новизна роботи. Розвинуто, запропонований у співавторстві (В.В.Панасюк, Л.Б.Ратич), новий підхід механіки корозійного руйнування металів, згідно з яким зона передруйнування ма-

теріалу в околі вершини тріщини (або швидкість росту тріщини) описується деяким функціоналом, що містить параметри напружено-деформованого стану матеріалу та параметри, що контролюють фізико-хімічні процеси, які протікають між деформованим матеріалом та корозійним середовищем. Запропоновані на цій основі нові розрахункові моделі корозійного розтріскування металів.

Одержані узагальнюючі дані та встановлені основні характеристики і закономірності зміни фізико-хімічного стану зони передруйнування на різних стадіях процесу локального корозійного руйнування матеріалу: при інкубаційному періоді, що передує початку поширення тріщини, в момент старту тріщини, а також при її стабільному поширенні.

Встановлено аналогію між корозійною тріщиною та корозійною щілиною, як геометричними об'єктами з точки зору протікання в них електрохімічних процесів, які відповідають за початок зародження процесу локального корозійно-механічного руйнування матеріалу. При цьому показано існування деякої характеристичної ширини (розкриття) тріщини-щілини в її тупиковій частині, при якій в околі зони передруйнування буде мати місце екстремальна інтенсивність корозійних процесів.

Встановлені критерії початку поширення корозійної тріщини (початку процесу локального корозійно-механічного руйнування матеріалу) і одержані експериментально-аналітичні залежності для їх опису, що містять параметри напружено-деформованого стану матеріалу та параметри електрохімічних процесів, що протікають між деформованим матеріалом та корозійним середовищем в околі зони передруйнування.

Запропоновано елементи теорії визначення базових характеристик опору металів локальному корозійно-механічному руйнуванню, що ґрунтується на аналізі характеристичних (граничних) електрохімічних станів, що можуть реалізуватись в зоні передруйнування в околі вершини тріщини для розглядуваної системи "матеріал-середовище".

Практична цінність роботи. Створено комплекс оригінальних методик для локальних фізико-хімічних досліджень процесів корозійно-механічного руйнування, що протікають в тріщинах, а також інших концентраторах напружень тріщиноподібного типу, які дозволяють здійснювати принципово нову постановку експериментів при вибаченні даних явищ. Розроблено відповідні технічні засоби для реалізації цих методик, включаючи спеціальні датчики-мініелектроди для локальних електрохімічних вимірювань різної конструкції,

зразки та зипробовувальні камери, а також комплекс дослідних установок для проведення випробовувань при статичному і циклічному навантаженні. Дані розробки, внаслідок їхніх широких функціональних можливостей, були використані також на інших підприємствах і організаціях для вирішення проблем, пов'язаних з обґрунтуванням працездатності конструкційних металів в заданих експлуатаційних умовах.

Розроблений і створений автоматичний комплекс апаратури, що управляється комп'ютером для проведення спеціальних досліджень. Він має самостійне значення, як новий інструментарій для визначення фізико-хімічних процесів локального руйнування матеріалів в корозійних середовищах, на базі якого можна планувати принципово нові дослідження в даній області.

Розроблені методики прискореного визначення та прогнозування принципово важливих інженерних характеристик корозійної тріщиностійкості матеріалів: порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Icsc} при корозійному розтріскуванні та ΔK_{th} при корозійній втомі, як функцій електрохімічних параметрів зони перед руйнуванням в околі вершини тріщини.

Встановлені багаточисельні дані про базові характеристики опору сталей енергообладнання локальному корозійно-механічному руйнуванню з врахуванням широкого спектру зміни експлуатаційних умов, які покладені в основу розрахунків на довговічність елементів обладнання та трубопроводів енергоустановок.

Основні положення роботи, що виносяться на захист.

1. Методологія, технічні засоби та апаратура, включаючи спеціальну автоматичну систему (керовану комп'ютером) для визначення характеристик локального корозійно-механічного руйнування металів, а також процесів, які протікають між деформованим металом і корозійним середовищем в зоні передруйнування.
2. Встановлені основні характеристики і закономірності зміни фізико-хімічного стану зони передруйнування в околі вершини тріщини на різних стадіях процесу локального корозійного руйнування матеріалу.
3. Результати досліджень фізико-механічних і електрохімічних умов початку процесу локального руйнування матеріалу і сформульовані на їх основі критерії старту (початку поширення) корозійної тріщини, що містять параметри напружено-деформованого стану матеріалу і параметри електрохімічних процесів, які протікають між деформованим металом і корозійним середовищем в зоні пе-

редруйнування.

4. Методика прискороного визначення і прогнозування порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Isc} і ΔK_{th} , при яких не проходить розвиток тріщини в матеріалі в умовах корозійного розтріскування і корозійної втоми, а також експериментально-аналітичні залежності для їх підрахунку.
5. Елементи теорії визначення базових діаграм корозійної тріщиностійкості металів, які полягають у врахуванні характерних екстремальних фізико-хімічних станів, які можуть реалізуватися для розглядуваної системи "матеріал-середовище" в околі вершини тріщини.
6. Експериментальні дані про базові характеристики корозійної тріщиностійкості конструкційних сталей енергомашинобудування, які одержані на основі комплексу досліджень, де враховує взаємозв'язок зміни фізико-механічних параметрів умов експлуатації та електрохімічного стану в вершині тріщини.
7. Методичні рекомендації для інженерної практики.

Публікації та апробації роботи. Всього по темі дисертації опубліковано 72 роботи в журналах та збірниках, включаючи 9 міжнародних. Одержано 9 авторських свідоцтв на винаходи. Найбільш суттєві результати опубліковані в роботах, порецензованих в кінці автореферату, і доповідались на наступних наукових форумах: VI Міжнародному colloquium "Механічна втома металів" (Київ, 1981); науково-технічній конференції "Циклічна міцність і підвищення несучої здатності виробів" (Перм, 1981); VI Всесоюзній конференції по електрохімії (Москва, 1982); II Всесоюзному з'їзді по теорії машин і механізмів (Одеса, 1982); III Всесоюзній конференції по втомі металів (Москва, 1982); III Всесоюзній конференції по колоїдній хімії та фізико-хімічній механіці (Ташкент, 1983); IV Всесоюзному симпозиумі "Малоперіодична втома - механіка руйнування, м'яучість і матеріалознавчі конструкції" (Краснодар, 1983); VII Міжнародному colloquium "Механічна втома металів" (Мішкольц, Угорщина, 1983); IV Всесоюзному семінарі "Водень в металах" (Москва, 1984); науково-технічній конференції "Застосування методів механіки руйнування в розрахунках будівельних металічних конструкцій на міцність та довговічність" (Красноярськ, 1984); IV Республіканській конференції "Електрохімічний захист та корозійний контроль" (Севродолярськ, 1985); V Всесоюзному симпозиумі по механіці руйнування (Дніпропетровськ, 1985); V Всесоюзному симпозиумі "Малоперіодична втома - критерії руйнування і структура матеріалів" (Волгоград, 1987);

I Всесоюзній конференції по механіці руйнування матеріалів (Львів, 1967); X Міжнародному конгресі по корозії металів (Мадрас, Індія, 1967); IX Міжнародному колоквиумі "Механічна втома металів" (Братислава-Смоленіце, Чехо-Словачія, 1967); У Республіканській конференції по корозії та протикорозійному захисту металів "Корозія металів під напруженням та методи захисту" (Львів, 1985); III Всесоюзному симпозиумі по механіці руйнування (Житомир, 1990); Міжнародній нараді спеціалістів з країн-членів МАГАТЕ "Докритичний ріст тріщини" (Москва, 1990); семінари "Аналіз корозійного стану обладнання АЕС з реакторами ВВЕР: методи випробовувань та критерії оцінки корозійної стійкості" (Москва-Боровськ, 1990); Міжнародній конференції "Зародження і ріст тріщин в металах та кераміці" (Дарна, Болгарія, 1991); IV науково технічній конференції "Підвищення надійності і довговічності машин та споруд" (Одеса, 1991); науково-технічній конференції по корозії та протикорозійному захисту металів фонду "Ресурс-92" (Львів, 1992); 17 з'їзді по металах (Дрезден, Німеччина, 1990); конгресі з проблем корозії "Захис.-92" (Москва, 1992).

Крім цього по темі дисертаційної роботи було зроблено наукову доповідь на засіданні Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства Президії АН України (1991), а також ряд наукових повідомлень на семінарах у фізико-механічному інституті ім.Г.В. Карпенка АН України.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, семи глав, загальних висновків, бібліографії і додатку. Вона містить 340 сторінок, включаючи 139 рисунків, 26 таблиць та список літератури з 454 назв.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показана актуальність та наукова і практична значимість розглядуваної проблеми, наведено основні визначення характеристик локального корозійно-механічного руйнування конструкційних металів. З позицій механіки руйнування твердих тіл наведено аналіз розвитку досліджень в галузі корозійно-механічного руйнування металів, які передували даній роботі. Сформульовано основні положення та об'єм даної роботи, а також основні результати, які виносяться на захист. В кінці глави є відомості про публікації та апробацію роботи.

В першій главі коротко викладені вихідні концепції, основні положення та визначення механіки руйнування матеріалів, включаючи

ІІ самостійне відгалуження - механіку корозійного руйнування. Розглянута роль фізико-хімічних процесів при руйнуванні металів та сплавів в корозійних середовищах, а також приведено літературний огляд та аналіз робіт по визначенню процесів корозійно-механічного руйнування матеріалів методами механіки руйнування. На основі цього показано принципову необхідність розгляду та врахування, при визначенні характеристик локального корозійно-механічного руйнування матеріалів, параметрів фізико-хімічних процесів, що протікають безпосередньо в зоні передруйнування. Виходячи з цього, викладено основи нового підходу, заг опонованого спільно автором даної роботи і В.В.Панасюком та Л.В.Рачичем, згідно якого пропонується наступна концепція механіки корозійного руйнування матеріалів. В загальному випадку стан зони передруйнування матеріалу в скелі вершини тріщини можна описати такими групами параметрів (рис.1):

$P_j(\sigma)$ - параметри, що характеризують напружено-деформований стан матеріалу і є функціями прикладених до тіла зовнішніх зусиль σ ;

$A_n(\tau)$ - параметри, які визначають в часі τ фізико-хімічні процеси, що протікають між деформованим металом і корозійним середовищем;

$B_m(S)$ - параметри, що характеризують стан поверхонь матеріалу S , які утворюються в процесі руйнування.

В такому випадку швидкість локального процесу корозійного руйнування матеріалу (швидкість розвитку корозійної тріщини) буде описуватись деякою функцією Φ від зазначених вище параметрів, тобто

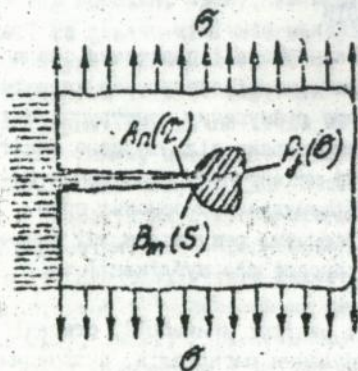


Рис.1. Загальне представлення зони передруйнування матеріалу в умовах одночасної дії механічного навантаження та корозійного середовища.

$$V = \Phi [C_i; P_p(\sigma); A_n(\tau); B_m(S)], \quad (1)$$

де C_i - константи, що характеризують розглядувану систему "матеріал-середовище"; $i, j, n, m = 1, 2, 3, \dots$

Залежність типу (1) пропонується в якості базової при описі, аналізі і прогнозуванні процесів локального корозійного руйнування матеріалів. Вибір структури функції, а також конкретних параметрів здійснюється окремо для різних класів систем "матеріал-середовище" з врахуванням найбільш характерних для них фізико-хімічних взаємодій. При розгляді конкретних систем можна зробити деякі додаткові обмеження на вказані параметри.

Розглянемо реалізацію запропонованого підходу для найбільш поширеного на практиці випадку, а саме для прискореного руйнування конструкційних металів у водних корозійних середовищах, тобто середовищах, що являють собою слабкі водні розчини солей, лугів та кислот. Цей клас середовищ і характер їх фізико-хімічних взаємодій з деформованим металом є практично універсальним і зустрічається в різних галузях промисловості при використанні корозійних середовищ. Для нього характерно домінуюче значення електрохімічних процесів, які призводять до прискореного руйнування матеріалу під дією середовища. Виходячи з цього і виберемо необхідні параметри в рівнянні (1).

Відомо, що для встановлення границь термодинамічної можливості протікання електрохімічної корозії металів у водних середовищах використовують діаграми стану системи "матеріал-середовище" (діаграми типу Пурбе). Параметрами для побудови таких діаграм служать водневий показник середовища pH та електродний потенціал металу φ , які як показують літературні дані, однозначно визначають електрохімічну ситуацію системи "матеріал-середовище". Це становить основу припущення, що у випадку руйнування металів у водних корозійних середовищах електрохімічні процеси в зоні передруйнування в околі вершини тріщини достатньо повно контролюються значеннями pH_b та φ_b біля вершини тріщини. В якості параметра, що визначає напружено-деформований стан матеріалу в зоні передруйнування, вибраний коефіцієнт інтенсивності напружень K_I , як одна з найбільш універсальних характеристик, що об'єднує в собі розмір тріщини, геометрію тіла та спосіб і величину прикладеного зовнішнього навантаження.

Таким чином, наближено зону передруйнування матеріалу, деформованого в умовах дії водного корозійного середовища будемо харак-

теризувати трьома параметрами K_T , ρH_0 та φ_0 , а рівняння (I) для визначення швидкості росту корозійної тріщини, тобто швидкості руйнування матеріалу, набуде вигляду:

$$v = \Phi_0 [C_i, K_T, \rho H_0(x), \varphi_0(x)] \quad (2)$$

При цьому вважається, що стан поверхні руйнування S опосередньо входить в параметри ρH_0 і φ_0 та відображається їх зміною.

Дана модельна схема вибрана в якості основної при вирішенні поставленої в роботі проблеми. В деяких випадках при детальному розгляді окремих стадій процесу корозійного руйнування матеріалу були використані також інші фізико-хімічні параметри (величина розкриття тріщини в її вершині, час та електродний потенціал пасивації новоутвореної поверхні в зоні передруйнування, густина струму локальної гальванопари, характеристики міцності пасивної плівки та ін.).

Друга глава роботи присвячена опису розроблених методик, технічних засобів та випробувальної апаратури для досліджень процесів локального корозійно-механічного руйнування металів, зокрема визначення характеристик ρH_0 і φ_0 . Запропоновані методи базуються на підходах механіки руйнування і полягають в дослідженні фізико-хімічних процесів, які протікають в порожнинах корозійних тріщин, а також інших концентраторах напружень тріщиноподібного типу. Характерною відмінною особливістю цих методів є одночасне (синхронне) проведення механічних та корозійних досліджень, тобто локальні електрохімічні вимірювання здійснюються в умовах взаємодії деформованого металу з корозійним середовищем. Їх можна умовно розділити на дві групи. До першої відносяться методи основані на безпосередніх локальних електрохімічних вимірюваннях в тріщинах при випробуванні матеріалів на тріщиностійкість при корозійній втомі або корозійному розтріскуванні, а друга група містить методи, що базуються на електрохімічних дослідженнях в модельних тріщинах-щілинах.

Методика безпосередніх електрохімічних вимірювань в корозійних тріщинах при випробуваннях на тріщиностійкість ґрунтується на застосуванні спеціальних датчиків-мініелектродів різної конструкції, які розміщують в спеціальних отворах випробуваного зразка з тріщиною. При цьому переважно використано спосіб установки датчиків-мініелектродів в площині розвитку тріщини і перпендикулярно її фронту, як найбільш підходящий для безперервних

електрохімічних вимірювань в околі вершини корозійної тріщини, що розвивається (рис.2).

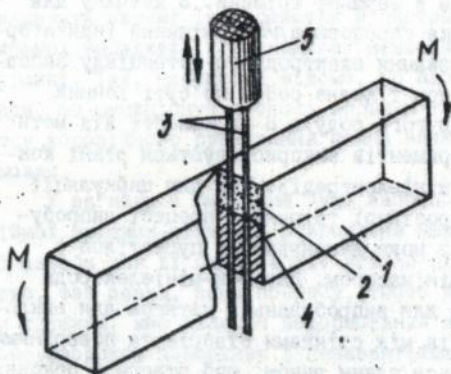


Рис.2. Принципова схема установки у випробовуваному зразку датчиків-мініелектродів для електрохімічних вимірювань в корозійній тріщині: 1 - зразок; 2 - площина тріщини; 3 - датчики-мініелектроди; 4 - фронт поширення тріщини; 5 - механізм переміщення датчиків-мініелектродів.

В основу методики покладено балочний зразок з кривою тріщиною та отвором в площині її поширення, вісь якого перпендикулярна фронту тріщини. Значення коефіцієнта інтенсивності напружень в вершині тріщини в такому зразку у випадку його навантаження по схемі чистого згину визначають по формулі:

$$K_I - [6M/t\sqrt{b^3}][\sqrt{\lambda} f(\lambda)/\sqrt{(1-\epsilon)^3}], \quad (3)$$

при $0 \leq \lambda \leq 0,8$; $0 \leq \epsilon \leq 0,5$.

де M - згинаючий момент; t - товщина зразка; b - висота зразка; $\lambda = t/b$; l - довжина тріщини; $\epsilon = d/t$; d - діаметр отвору; $f(\lambda) = 1,99 - 2,47\lambda + 12,97\lambda^2 - 23,17\lambda^3 + 21,80\lambda^4 + 60,50\lambda^6$.

Залежність (3) одержана аналітичним шляхом на основі порівняльних випробувань на короткочасну статичну тріщиностійкість зразків з отворами і без отворів з наступною її перевіркою по діаграмах циклічної тріщиностійкості на повітрі.

В залежності від завдань досліджень можливе виконання в площині розвитку тріщини двох або ряду отворів. При цьому врахування їх впливу на величину K_I здійснюється аналогічно на основі порівняльних випробувань на тріщиностійкість в інертному середовищі зразків з отворами і без отворів, з наступним вичисленням по одержаних даних відповідної корелюючої функції.

Датчики-мініелектроди для локальних електрохімічних вимірювань представляють собою тонкі трубки (діаметром менше 1 мм), що

виконані із хімічностійкого еластичного діелектрика і мають в бокових стінках спеціальні отвори (діаметром порядку 0,2 мм) для контакту з корозійним середовищем в вершині тріщини. В датчику для вимірювання водневого показника середовища pH розміщений індикаторний метал, а датчик для вимірювання електродного потенціалу заповнений електропровідною речовиною і являє собою по суті іонний електропровідник (провідник другого роду). В залежності від мети досліджень і постановки експериментів використовуються різні конструктивні варіанти датчиків-мініелектродів. Так для циркуляції середовища через порожнину корозійної тріщини в процесі випробувань, частина трубки в датчику може виконуватись пустотілою і з'єднуватись із спеціальним мінінасосом. Датчики-мініелектроди встановлюють в отворах зразка для випробувань з натягом для виключення можливих щілинних ефектів між стінками отворів та поверхнями датчиків. Установка здійснюється таким чином, щоб отвори в бокових стінках датчика-мініелектрода співпали з фронтом тріщини (рис.2). По мірі розвитку корозійної тріщини датчики-мініелектроди дискретно переміщують з допомогою механізму переміщення, постійно слідуючи за околom вершини тріщини. Максимальний крок їх дискретного переміщення Δh відповідає вимірюваному приросту тріщини Δl і знаходиться в діапазоні 0,2...0,5 мм.

Для реалізації програми експериментальних досліджень був розроблений і створений комплекс спеціальних установок, які дозволяють вивчати фізико-хімічні та механічні особливості процесів локального корозійного руйнування металів при корозійному розтріскуванні та корозійній втомі. Всі установки базуються на випробувуванні балочних зразків різних розмірів ($l = 2,5...25$ мм) при статичному і циклічному згині і передбачають зміну в широкому діапазоні фізико-механічних параметрів випробувань: частоти циклічного навантаження ($\nu = 0,02...12$ Гц); коефіцієнта асиметрії циклу ($R = 0...0,8$); температури ($20...100^\circ C$) та складу ($pH = 1...14$) корозійного середовища, а також можливість електрохімічної поляризації випробовуваного зразка, циркуляції заданого корозійного середовища через робочу камеру та інше. Це дало можливість реалізувати запланований спектр фізико-хімічних досліджень локального корозійно-механічного руйнування металів з врахуванням процесів, що протікають безпосередньо в зоні передруйнування в околі вершини тріщини.

Слід відмітити, що визначення фізико-хімічних процесів локального руйнування матеріалу вимагає поєднання як безпосередніх,

так і модельних методів досліджень. Це викликано наступними обставинами. По-перше, внаслідок складності і багатогранності процесів, що протікають в реальних корозійних тріщинах, часто затруднено визначити окремі їх параметри в чистому вигляді, а по-друге, в окремих випадках їх принципово неможливо визначити безпосередньо в тріщині. Так, наприклад, відомо, що параметри локальної гальванопари, що функціонує в околі вершини тріщини на певних стадіях процесу корозійного руйнування можна визначити тільки в модельних умовах.

У зв'язку з цим нами була запропонована модельна схема корозійної тріщини-щілини і розроблена методика і оригінальні технічні засоби для її реалізації. Згідно цієї схеми основну роль відіграє, так звана, зона процесу, тобто деяка область в околі вершини тріщини, яка включає деформований матеріал біля її вершини з новоутвореною поверхнею і ненавантажений матеріал прилеглих ділянок стінок тріщини з пасивною в електрохімічному відношенні поверхнею. При цьому вважається, що в зоні процесу площі новоутвореної деформованої та пасивної недеформованої поверхонь є приблизно однаковими. Роль стінок тріщини, окрім прилеглих до її вершини ділянок, а також роль поверхні зразка чи деталі не враховується в явному вигляді і вважається її вплив опосередним, що відбувається електрохімічним станом зони процесу. Правомірність такого підходу підтверджена літературними та власними даними, які свідчать, що електрохімічні реакції між вершиною тріщини і її берегами протікають в основному на віддалях, співрозмірних з розкриттям тріщини. Таким чином, моделювання корозійної тріщини в даному випадку зводиться до моделювання зони процесу, яку можна представити у вигляді двох поверхонь, що утворюють між собою щілину шириною Δ , заповнену корозійним середовищем. При цьому одна з поверхонь ненавантажена і знаходиться в пасивному стані, а друга - новоутворена і навантажена розтягуючими напруженнями σ . Дана модельна схема реалізується шляхом використання двох зразків із спряженими циліндричними поверхнями, що утворюють між собою щілину регульованої ширини Δ , в порожнину якої подається корозійне середовище. При цьому зразок із ввігнутою поверхнею кріпиться нерухомо, а з випуклою - розтягується напруженнями σ та обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю ω , і його поверхня при цьому неперервно оновлюється з допомогою спеціального пристосування. Створена на даній принциповій схемі спеціальна дослідна установка дозволяє визначати в модельних умовах параметри локальних електрохімічних

процесів (густину струму гальванопари, час пасивації зони процесу, значення електродних потенціалів, які відповідають активному і пасивному стану зони процесу) в залежності від ρH та складу середовища та параметрів σ і Δ . Відмітимо також, що конструкція установки передбачає виконання інших корозійно-механічних досліджень і має широкі функціональні можливості пов'язані з різними аспектами дослідження корозії та корозійно-механічного руйнування металів.

Для вирішення завдань, поставлених в роботі, були запропоновані також інші методи досліджень, а також використані відомі експериментальні підходи. Так розроблено оригінальний метод визначення характеристик міцності пасивних плівок в вершині корозійної тріщини, що базується на аналізі діаграм "приріст навантаження - зміщення електродного потенціалу в вершині тріщини". Він дозволяє визначати залежності міцності пасивної плівки від різних фізико-хімічних факторів системи "матеріал-середовище" (складу та ρH середовища, хімічного складу матеріалу та ін.). Розроблена також методологія та відповідні технічні засоби для локальних електрохімічних вимірювань у вузьких щілинах ($\Delta = 0,01 \dots 1,0$ мм). Крім цього для одержання базових даних про досліджувані матеріали були використані стандартні методи механічних випробувань, електрохімічні поляризаційні дослідження, а також відомі методики визначення характеристик статичної та циклічної тріщиностійкості в умовах дії інертних середовищ.

В третій главі роботи розглянуті основні характеристики і закономірності зміни фізико-хімічного стану зони передруйнування матеріалу в околі вершини тріщини. На різних стадіях процесу локального корозійно-механічного руйнування матеріалу зона передруйнування має свої характерні особливості, виходячи з яких, визначаючими її стан будуть ті чи інші фізико-хімічні параметри.

На початковій стадії, після поступлення корозійного середовища в вершину навантаженої тріщини, вирішальна роль належить корозійним процесам, що мають електрохімічну природу. Як відомо, ці процеси, активовані значними пружнопластичними деформаціями, призводять до розчинення металу в вершині тріщини і виділення водню на прилеглих до вершини поверхнях. В цьому випадку стан зони передруйнування буде описуватись наступними параметрами: коефіцієнтом інтенсивності напружень K_T або розкриттям тріщини δ_T , які визначають механічну ситуацію, а також біжучими значеннями електрохімічних параметрів $\rho H_0(\tau)$ та $\varphi_0(\tau)$. З перебігом часу τ ін-

тенсивність електрохімічних процесів в вершині тріщини знижується і вони, в залежності від розглядуваної системи "матеріал-середовище", або протікають з деякою малою, практично постійною швидкістю (корозійно-активні системи), або затухають взагалі, і в вершині тріщини проходить утворення пасивної плівки (корозійно-пасивні системи). При цьому значення параметрів ρH і φ стабілізуються і приймають деякі характерні величини ρH_0^c та φ_0^c , які і будуть визначати електрохімічний стан зони передруйнування в розглядуваному випадку. Слід відмітити, що для корозійно-пасивних систем суттєве значення має також величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_T^* або розкриття тріщини δ_T^* , при яких проходить руйнування сформованої пасивної плівки. Тому для даного випадку стан зони передруйнування буде описуватись наступними параметрами: $K_T^*(\delta_T^*)$, ρH_0^c , φ_0^c . При розвитку тріщини на деяку величину Δl в околі вершини тріщини утворюється нова електрохімічно активна поверхня, електродний потенціал якої різко відрізняється від поверхні прилеглих стінок тріщини. Як відомо, внаслідок різниці потенціалів між цими поверхнями в зоні передруйнування виникає локальна гальванопара, що функціонує на віддалі порядку розкриття тріщини. В цьому випадку основними параметрами, що визначають стан зони передруйнування будуть параметри цієї гальванопари, а саме: густина струму i_c та час пасивації τ_p новоутвореної поверхні. В залежності від співвідношення часу τ_p і часу чергового приросту тріщини, функціонування гальванопари в процесі розвитку тріщини може бути як дискретним, так і неперервним.

Розглянемо основні закономірності і тенденції зміни стану зони передруйнування в описаних вище випадках.

Розгляд значної кількості систем "матеріал-середовище" виявив наступні характерні закономірності в часі τ параметрів ρH та φ_0 у вершині статично навантаженої ($K_T \leq K_{TSCC}$) тріщини, яка не розвивається. Для корозійно-активних систем спостерігається зростання значень ρH_0 до деякої характерної величини ρH_0^{max} з наступним їх зменшенням і стабілізацією на рівні ρH_0^c . В цей же час електродний потенціал φ_0 монотонно понижується (зміщується у від'ємну сторону), досягаючи деякого стабілізованого значення φ_0^c . Для корозійно-пасивних систем має місце пониження параметра ρH_0 до деякого мінімального значення ρH_0^{min} , за яким наступає його незначне підвищення і стабілізація (ρH_0^c), а значення параметра φ_0 монотонно підвищується (зміщується в додатно сторону) і стабілізуються на рівні φ_0^c . При цьому характерно, що стабільні значення

параметрів ρH_0^c і φ_0^c завжди відмінні від відповідних заданих значень на поверхні зразка ρH_n і φ_n .

При досягненні значень ρH_0^c та φ_0^c , в зоні передруйнування в околі вершини тріщини встановлюються характерні стаціонарні електрохімічні умови. В цьому випадку значення електрохімічних параметрів ρH і φ в будь-якій розглядуваній точці порожнини тріщини з координатою x описуються наступними експотенціальними залежностями:

$$\begin{aligned} \rho H(x) &= \rho H_n [1 - (x/l)^{n_1} \cdot \exp(m_1(x/l))], \\ \varphi(x) &= \varphi_n [1 + (x/l)^{n_2} \cdot \exp(m_2(x/l))], \end{aligned} \quad (4)$$

де ρH_n і φ_n значення електрохімічних параметрів на поверхні зразка ($x = 0$); l - довжина тріщини; n_1, n_2, m_1, m_2 - константи, які залежать від системи "матеріал-середовище". Слід відмітити, що характер зміни значень $\rho H(x)$ по довжині тріщини не залежить від її абсолютної величини, тобто значення $\rho H(x)$ одержані на тріщинах різної довжини і представлені як функція відносної довжини тріщини (x/l) лягають на одну криву (рис.3).

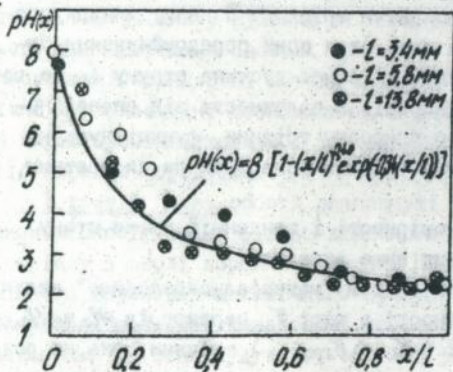


Рис.3. Зміна значень ρH по довжині тріщини, одержана для тріщин різної довжини (система: сталь 40Х13 - 1% розчин H_2SO_4 + КОН до $\rho H = 8$).

Розглядуваний випадок стаціонарних електрохімічних умов в вершині тріщини є виключно важливим для оцінки локальних процесів корозійного руйнування матеріалу, оскільки характеризує початкові умови в околі вершини вихідної тріщини, які в кінцевому рахунку і визначають початок її розвитку (старту), а також особливості подальшого нестационарного поширення. В роботі на основі багатьох прикладів доведено, що основними факторами, які впливають на формування в зоні передруйнування характеристичних стабільних значень ρH_0^c та φ_0^c є фізико-хімічні особливості системи "матеріал-середовище".

вище", а також заданий рівень напружено-деформованого стану в вершині тріщини.

Для різних систем "матеріал-середовище" спостерігається різна ступінь відхилення характеристичних значень ρH_0^C та ζ_0^C від заданих величин ρH_0 та ζ_0 на поверхні зразка. Так для малолегованих вуглецевих сталей в лужних розчинах значення ρH_0^C значно менше, ніж ρH_0 , а зміна водневого показника середовища носить монотонноспадаючий характер аж до окола вершини тріщини, де має місце невелика ділянка (порядку 0,1 від довжини тріщини), на якій значення $\rho H(x)$ близькі до ρH_0^C . Для цих же сталей, але в кислих розчинах, значення ρH_0^C відрізняються від ρH_0 всього на величину порядку одиниці, а по глибині тріщини напротязі $\sim 0,7l$ значення $\rho H(x)$ близькі до ρH_0 . Для нержавіючої сталі має місце протилежна тенденція: по довжині тріщини спостерігається різке падіння величини $\rho H(x)$ напротязі $(0,3... 0,4)l$, а потім слідує стабільна ділянка, де значення $\rho H(x)$ і ρH_0^C приблизно однакові.

Слід відмітити, що стаціонарний електрохімічний стан в корозійній тріщині при зміні фізико-хімічних умов випробувань може бути описаний з допомогою залежностей (4). При цьому, як показано в роботі, всі властиві їм особливості відображаються зміною значень констант, що входять в ці залежності. Як приклад до сказаного, в таблиці I приведені дані для опису з допомогою залежностей (4) стаціонарного електрохімічного стану в корозійних тріщинах в сталях 20 та 08Х18Н12Т при зростанні температури корозійного середовища.

Таблиця I

Чисельні дані для опису рівняннями (4) стаціонарних електрохімічних умов в корозійних тріщинах в сталях 20 та 08Х18Н12Т при різних температурах корозійного середовища

T, °C	Сталь 20								Сталь 08Х18Н12Т							
	ρH_0^C	n_1	m_1	ρH_0^C	$\zeta_0, мВ$	n_2	m_2	$\zeta_0^C, мВ$	ρH_0	n_1	m_1	ρH_0^C	$\zeta_0, мВ$	n_2	m_2	$\zeta_0^C, мВ$
25	90	3,63	-1,73	74	-570	3,62	-2,85	-603	80	1,28	-1,90	6,8	-186	1,21	-1,37	-233
40	90	1,82	-1,17	6,2	-551	3,43	-2,72	-587	80	1,07	-1,74	6,6	-163	1,07	-1,14	-215
60	90	1,92	-1,03	5,8	-553	3,34	-2,57	-591	80	0,99	-1,49	6,2	-140	0,97	-0,93	-195
80	90	1,51	-0,97	5,6	-520	3,33	-2,65	-563	80	0,69	-1,39	6,0	-112	0,87	-0,71	-167

Суттєвим фактором, який визначає стаціонарні електрохімічні умови в корозійно-механічній тріщині є рівень напружено-деформа-

ного стану в її вершині. Встановлено, що вплив коефіцієнта інтенсивності напружень на величину електрохімічних параметрів pH_0^c та φ_0^c має свої особливості для різних систем "матеріал-середовище", що пов'язано з протіканням двох конкуруючих процесів. З однієї сторони із зростанням K_T зростає електрохімічна активація металу в вершині тріщини, яка приводить до підвищення інтенсивності корозійних процесів і викликає тим самим більш значні зміни параметрів pH_0^c та φ_0^c . З другої сторони зростання K_T пов'язано із збільшенням розкриття тріщини δ_T , що приводить до інтенсифікації дифузійних процесів в корозійному середовищі, яке заповняє порожнину тріщини та поступленням в неї нового середовища із об'єму. Це сприяє зміні складу середовища в тріщині і підсиленню процесів, які протікають з кисневою деполаризацією, що в кінцевому рахунку приводить до зміни тенденцій електрохімічних процесів в зоні передруйнування. В зв'язку з цим, як встановлено в роботі, функціональні залежності $pH_0^c(K_T)$ можуть мати неоднозначний характер, тобто можливо існування на них деякого екстремуму з характерним мінімальним значенням pH . Значення φ_0^c із зростанням K_T можуть або змінюватись у від'ємну сторону, що свідчить про переважаючу роль деформаційної активації металу, або параметр φ_0^c може зростати з ростом K_T , що обумовлено ефектом зростання розкриття тріщини і переважаючим впливом дифузійних процесів із об'єму розчину в тріщину.

В цілому, для кожної із розглядуваних систем "матеріал-середовище" оцінку стаціонарного електрохімічного стану в зоні передруйнування в околі вершини тріщини пропонується здійснювати на основі попередньо побудованих просторових діаграм, які враховують зміну параметрів pH_0^c та φ_0^c від коефіцієнта інтенсивності напружень K_T та температури корозійного середовища T (рис.4). Такі діаграми дають можливість прогнозувати характеристичні значення pH_0^c та φ_0^c для заданої системи "матеріал-середовище" в залежності від будь-якої комбінації параметрів K_T та T , а також одержувати вихідну інформацію для аналізу причин локального корозійно-механічного руйнування матеріалу.

З наступленням стаціонарного електрохімічного стану в зоні передруйнування для корозійно-пасивних систем є характерним протікання нового анодного процесу, який по хімічній суті є процесом утворення окисної плівки. В роботі на основі відомих підходів розглянуто і проаналізовано термодинамічні умови реалізації цього процесу в залежності від електродного потенціалу металу та pH середовища.

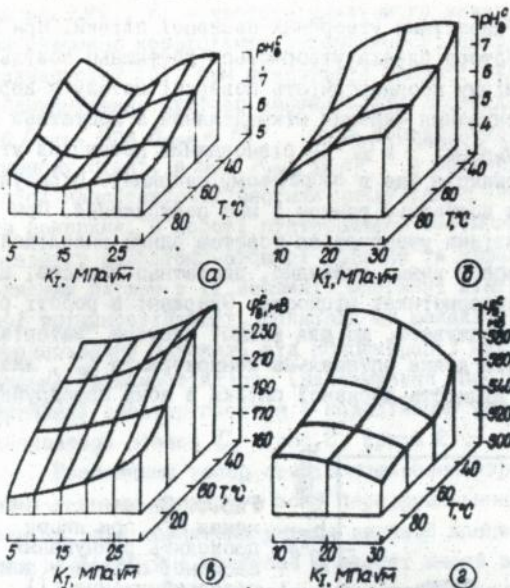


Рис.4. Просторова діаграма впливу коефіцієнта інтенсивності напружень та температури корозійного середовища на характеристичні значення електрохімічних параметрів $\rho_H\%$ (а, б) та $g\%$ (в, г) в зоні передруйнування в околі вершини тріщини: а, в - сталь 08X18H12T - 1% розчин N_2O_3 + КОН до рН = 8; б, г - сталь 12X1МФ - дистильована вода + NH_3 до рН = 9.

Сам факт утворення окисної плівки має принципове значення, оскільки призводить до пасивного, в електрохімічному сенсі, стану зони передруйнування. Однак при руйнуванні окисної плівки, внаслідок прикладення механічного навантаження, в вершині тріщини утворюється нова, деформаційно активована поверхня, і характер протікання корозійних процесів суттєво змінюється. В зв'язку з цим характеристики міцності окисної плівки, наприклад, коефіцієнт інтенсивності напружень K_I^* , при якому відбувається її руйнування в вершині тріщини, є принципово важливим параметром, який визначає перехід зони передруйнування з одного фізико-хімічного стану в другий.

В роботі, на основі оригінальної методики, досліджено кінетику процесу утворення пасивної плівки в вершині тріщини для деяких систем "матеріал-середовище", а також визначено значення параметра K_I^* в залежності від концентрації C пасивуючих домішок у вихідному корозійному середовищі.

Встановлено, що залежність параметра K_I^* від концентрації пасиватора C має характерну особливість (рис.5, крива I): вона неоднозначна, і існує екстремум при деякій концентрації C_0 , коли значення K_I^* максимальне. Як показано, наявність екстремума пов'яз-

зано з кінетичними особливостями утворення пасивної плівки. При малих концентраціях пасиватора плівка утворюється достатньо повільно і враховуючи електрохімічну неоднорідність поверхні металу в верхині тріщини можливе існування окремих мікроділянок з достатньо від'ємним потенціалом $\varphi_B < \varphi_P^{MeO}$ (φ_P^{MeO} - рівноважний потенціал утворення окислу), коли реакція йде в зворотньому напрямку. В результаті плівка утворюється достатньо тонкою і має пошкодження. При високих концентраціях плівка утворюється товстою, однак внаслідок швидкого протікання процесу вона, очевидно, достатньо пориста, що відбивається на її характеристиках міцності. Одержані в роботі результати дозволяють стверджувати, що для кожної системи "матеріал-середовище" буде існувати деяка оптимальна концентрація C_0 , яка забезпечує максимальну міцність пасивної плівки в зоні передруйнування.

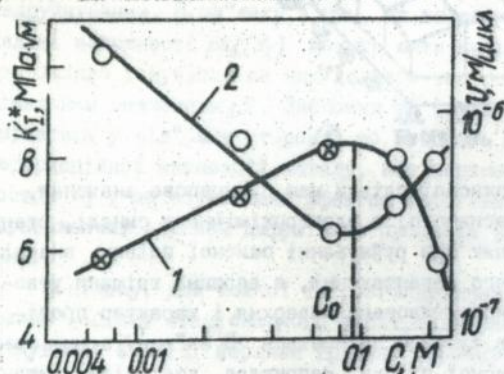


Рис.5. Залежність значення K_T^* , при якому проходить руйнування пасивної плівки в зоні передруйнування (1), та швидкості росту корозійно-втомної тріщини v (2) від концентрації пасиватора C (система "сталь 20 - 3%-ний розчин NaCl з домішками $NaNO_2$ ").

Параметр K_T^* має важливе значення при розгляді локальних процесів корозійного руйнування, особливо в умовах корозійної втоми. Якщо розглянути навантажуючу частину, наприклад, віднульового синусоїдального циклу втомного навантаження, яка, як відомо, є визначальною, як для протікання в верхині тріщини локальних електрохімічних процесів, так і для розвитку корозійно-втомної тріщини в цілому, то її тривалість $\tau_n = \tau^* + \tau_c$. Тут τ^* - час досягнення $K_T = K_T^*$ і руйнування пасивної плівки, а τ_c - час, напрутязі якого в зоні передруйнування існує новоутворена поверхня. Параметри τ^* і τ_c визначаються із наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} \tau^* &= \frac{1}{\omega} \left[\pi/2 - \arcsin \left(1 - \frac{2K_T^*}{K_{max}} \right) \right]; \\ \tau_c &= \frac{1}{\omega} \left[\pi/2 + \arcsin \left(1 - \frac{2K_T^*}{K_{max}} \right) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

де $\omega = 2\pi\nu$, ν - частота циклічного навантаження, K_{max} - максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень циклу. Як видно із залежностей (5), при фіксованій частоті навантаження стан зони передруйнування суттєво залежить від співвідношення параметрів K_I^* та K_{max} . При $K_{max} \leq K_I^*$ зона передруйнування знаходиться в пасивному стані, а при $K_{max} \gg K_I^*$ в вершині тріщини напротязі всієї навантажуючої частини циклу існує електрохімічно активна нова поверхня. В роботі підтверджено взаємозв'язок між швидкістю розвитку корозійно-втомної тріщини та характеристиками міцності окисних плівок в її вершині. Одержані діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості, показали що швидкість росту тріщини ν також неоднозначно залежить від концентрації пасиватора, причому максимальна тріщиностійкість (максимальне сповільнення швидкості росту тріщини) спостерігається в корозійному середовищі з концентрацією пасиватора рівною C_0 (рис.5, крива 2).

Розглянемо тепер стадію поширення корозійної тріщини. Як відомо в цьому випадку в зоні передруйнування утворюється нова поверхня, яка характеризується високою концентрацією пружнопластичних деформацій і виступає в якості аноду по відношенню до прилеглих поверхонь стінок тріщини. Внаслідок виникнення локальної гальванопари принципово змінюється характер електрохімічних процесів в вершині тріщини, що в свою чергу відображається відповідною зміною параметрів pH_a та φ_a . Проведені нами багаточисельні дослідження дозволили встановити наступні основні закономірності зміни електрохімічних умов в зоні передруйнування в околі вершини тріщини, що розвивається.

Характер зміни електрохімічних умов в вершині тріщини суттєво залежить від кінетичних особливостей її розвитку, тобто від кінетики утворення в зоні передруйнування нової поверхні. Так, при корозійному розтріскуванні в умовах довготривалого статичного навантаження розвиток тріщини в основному має чітко дискретний характер. Такий же характер мають закономірності зміни параметрів pH_a та φ_a . Така ж аналогія зберігається і при монотонному розвитку корозійної тріщини. При корозійній втомі зміна електрохімічних параметрів проходить напротязі кожного циклу навантаження і існують їх максимальні (pH_a^{max} , φ_a^{max}), мінімальні (pH_a^{min} , φ_a^{min}) та амплітудні значення (ΔpH_a , $\Delta \varphi_a$). Причому максимальні значення залежать від початкових умов в зоні передруйнування, що передували поширенню тріщини і від часу дії середовища, а амплітудні - від швидкості поширення тріщини.

Встановлено безпосередній взаємозв'язок між швидкістю росту корозійної тріщини і електрохімічними умовами в її вершині, який полягає в тому, що кожному значенню швидкості росту тріщини в досліджуваному матеріалі на діаграмі його статичної або циклічної тріщиностійкості відповідають вповні визначені значення електрохімічних параметрів ρH_0 та φ_0 .

Для кожної розглядуваної системи "матеріал-середовище" після певного проміжку часу, що залежить від початкових умов початку поширення тріщини, рівня прикладеного навантаження та фізико-хімічних особливостей електрохімічних процесів, у вершині ростучої тріщини встановлюються певні стабілізовані значення параметрів ρH_0 та φ_0 , які можна вважати характеристичними величинами зони передруйнування для випадку поширення тріщини.

Поряд з вивченням зміни електрохімічних умов в зоні передруйнування, що характеризуються параметрами ρH_0 та φ_0 , в главі розглянута локальна гальванопара, що виникає в вершині ростучої тріщини і по оригінальній методиці в модельних умовах визначено її основні параметри (густина корозійного струму i_c , час пасивації τ_p та значення компромісних електродних потенціалів φ_c та φ_p , що відповідають її активному і пасивному стану) в залежності від рівня прикладених розтягуючих напружень σ та ρH корозійного середовища. На основі значного масиву експериментальних даних, одержаних для вуглецевої та нержавіючої сталей, алюмінієвого та титанового сплавів в широкому діапазоні зміни ρH корозійного середовища ($\rho H = 2 \dots 11$), показано, що ці параметри в залежності від величини розтягуючих напружень σ можуть бути описані наступними експотенціальними залежностями

$$\begin{aligned} i_c &= i_{c0} \cdot \exp(a_1 \xi)^{k_1}; & \tau_p &= \tau_{p0} / \exp(a_2 \xi)^{k_2}; \\ \varphi_c &= \varphi_{c0} \cdot \exp(a_3 \xi)^{k_3}; & \varphi_p &= \varphi_{p0} \cdot \exp(a_4 \xi)^{k_4}, \end{aligned} \quad (6)$$

де i_{c0} , τ_{p0} , φ_{c0} , φ_{p0} - значення параметрів i_c , τ_p , φ_c , φ_p для ненавантаженої модельної тріщини; $\xi = \sigma / \sigma_T$; σ_T - границя текучості матеріалу; a_1, \dots, a_4 ; k_1, \dots, k_4 - відповідні безрозмірні коефіцієнти, які залежать від системи "матеріал-середовище". Одержані результати послужили основою для побудови просторових діаграм впливу розтягуючих напружень та ρH корозійного середовища на параметри локальних корозійних процесів, з допомогою яких можна визначати а прогнозувати стан зони передруйнування в околі вершини тріщини в будь-яких заданих умовах випробовувань. Такі діаграми

для найбільш важливого параметра - густини струму локальної гальванопари i_c приведені на рис.6.

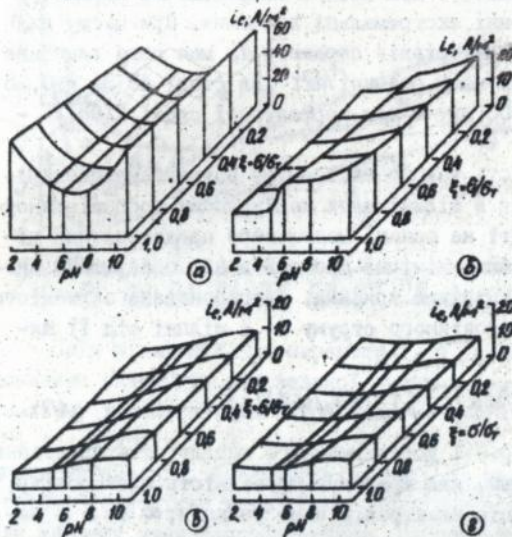


Рис.6. Просторові діаграми впливу розтягуючих напружень та pH корозійного середовища на густину струму i_c локальної гальванопари, що виникає в зоні передруйнування: а - сплав Д16Т; б - сталь 45; в - сталь X18H12T; г - сплав ПТ-3В.

Слід відмітити, що зафіксовано значний вплив параметра b на електрохімічні характеристики локальної гальванопари. Так при зростанні напружень від нуля до границі текучості матеріалу густина струму i_c може зростати в 1,2...3,5 рази; τ_p - зменшується в 1,5...3,5 рази, а зміщення електродних потенціалів може складати 30...100 мВ в залежності від pH середовища. Одержані залежності, а також чисельні дані були використані в подальшому в модельних розрахункових схемах для визначення характеристик локального корозійно-механічного руйнування металів.

Четверта глава дисертації присвячена встановленню взаємозв'язку між корозійною тріщиною і корозійною щілиною, як геометричними об'єктами, з точки зору протікання в них електрохімічних процесів, відповідальних за початок зародження процесу корозійно-механічного руйнування матеріалу. Виходячи з відомих з літератури характерних особливостей протікання корозійних процесів у вузьких металічних щілинах, основну увагу було приділено вивченню впливу ширини щілини на електрохімічні умови в її порожнині.

Комплекс досліджень проведений для ряду конструкційних матеріалів (сталь 45, алюмінієвий сплав Д16Т, нержавіюча сталь X18H12T) в широкому діапазоні зміни ширини щілини та pH корозійного середо-

вища ($\Delta = 0,01 \dots 1,0$ мм, $pH = 2 \dots 11$), показав існування деякої характерної ширини щілини Δ_* , при якій електрохімічні параметри pH та φ приймають в щілині екстремальні значення. При цьому для кожного із досліджуваних матеріалів параметр Δ_* має своє властиве значення (наприклад, в 3%-ному розчині $NaCl$ для сталі 45 $\Delta_* = 0,15$ мм, для сплаву ДІБТ - $0,08$ мм, а для нержавіючої сталі ХІ8НІ2Т - $0,30$ мм).

Вважаючи, що наявність такого екстремуму обумовлена специфікою локального протікання в щілині двох конкуруючих процесів анодного і катодного, в роботі на основі модельного представлення щілини та допущення, що електрохімічні процеси в ній описуються анодною та катодною поляризаційними кривими, запропонована залежність для визначення густини корозійного струму i в щілині від її ширини Δ :

$$i = i_0 \left\{ [1 + (\Delta \cdot i_0 / w \cdot \alpha)]^{-1} - [1 + (\Delta \cdot i_0 / w \cdot \beta)]^{-1} \right\}, \quad (7)$$

де i_0 - густина струму корозії досліджуваного металу; w - приведена питома провідність системи, яка враховує провідність електроліту, а також поляризаційний опір електрохімічних реакцій; α та β - параметри Тафеля відповідно для анодного та катодного процесів.

Залежність (7) геометрично являє собою різницю двох гіпербол і має екстремум в точці $\Delta = \Delta_*$, яка визначається формулою:

$$\Delta_* = (w/i_0) \cdot \sqrt{\alpha \beta}, \quad (8)$$

при цьому максимальне значення густини корозійного струму в щілині рівне:

$$i_{max} = i_0 \left[\frac{\alpha - \beta}{(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2} \right]. \quad (9)$$

В роботі приведено приклади, що підтверджують застосовність залежності (7) для опису, одержаних для різних систем "матеріал-середовище", експериментальних даних з точністю до деякої константи. Крім цього показана можливість її використання для прогнозування зміни pH середовища в залежності від ширини щілини. Для цього прийнято допущення, що зміна значення pH середовища в щілині відображає інтенсивність протікання в ній корозійних процесів, тобто

$$pH(\Delta) = B/i(\Delta), \quad (10)$$

де B - деяка константа; $i(\Delta)$ - залежність густини корозійного струму і ширини щілини, що визначається формулою (7). Результати співставлення розрахункових та експериментальних даних показують

їх задовільне узгодження (рис.7).

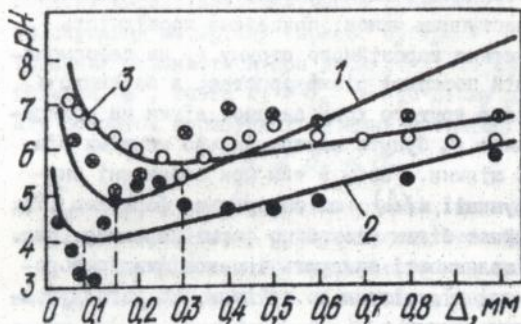


Рис.7. Залежність pH в плоскій щілині від її ширини Δ : 1 - сталь 45; 2 - алюмінієвий сплав Д16Т; 3 - сталь X16H12T (точки - експериментальні дані, суцільні лінії - розрахунок по формулі (10)).

Слід відмітити, що параметр Δ_* є характеристичним, оскільки дозволяє визначити для заданої системи "матеріал-середовище" екстремальну інтенсивність корозійних процесів. Так як, в залежності (8) для підрахунку Δ_* відомі фізичний зміст та методологія визначення параметрів, що входять до неї, то можливе прогнозування корозійної поведінки металів та сплавів в щілиноподібних об'єктах для заданих умов випробовування. Це принципово важливо для передбачення початку локальних процесів корозійно-механічного руйнування матеріалів. В роботі приведено приклади такої оцінки для різних систем "матеріал-середовище" в залежності від зміни умов випробовування (зміни pH та складу вихідного середовища, прикладення механічних навантажень та ін.).

На основі одержаних вище залежностей в роботі була проведена аналогія між корозійною щілиною та корозійною тріщиною шляхом використання модельного представлення остаточної, яке приведене в главі 2. Виходячи з цього вважається, що і для корозійно-механічної тріщини існує певна характерна ширина (розкриття) її тупикової частини, при якій в околі зони передруйнування буде мати місце екстремальна інтенсивність корозійних процесів. Позначаючи цю величину, як δ_* і враховуючи, що в даному випадку параметри ϵ та α будуть функціями прикладеного напруження і електрохімічної активності поверхні металу S в околі вершини тріщини, по аналогії з формулою (8) маємо:

$$\delta_* = \frac{2\sigma}{i_o(\sigma, S)} \sqrt{\alpha(\sigma, S) \cdot \beta} \quad (11)$$

Визначення параметрів $i_o(\sigma, S)$ та $\alpha(\sigma, S)$ здійснюється на основі корозійних вимірювань і поляризаційних досліджень в модельних трі-

шинах-щілина, згідно розроблених методичних підходів (глава 2).

Оскільки відомо, що тенденції зміни параметрів в залежності (II) будуть змінюватись наступним чином: приведена провідність системи w зменшується, густина корозійного струму i_0 на деформованій електрохімічно активній поверхні різко зростає, а параметр α зменшується, внаслідок ільш крутого ходу анодної вітки на поляризаційній кривій, то значення δ_* будуть завжди значно меншими від значень Δ_* для корозійної щілини. Разом з тим при зменшенні значень Δ_* (δ_*), екстремум функції $i(\Delta)$, що описується формулою (7) зростає по величині і приймає більш різкий по формі характер (рис. 8). Таким чином одержані залежності описують інтенсифікацію корозійних процесів при переході від щілини до тріщини, що узгоджується з відомими літературними даними.

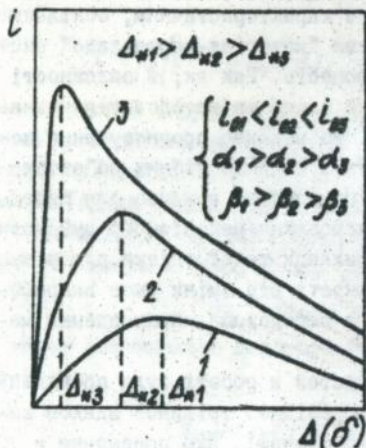


Рис.8. Схематичне представлення тенденцій зміни густини корозійного струму і від параметра $\Delta(\delta)$ при переході від корозійної щілини до корозійно-механічної тріщини.

Здійснена в роботі оцінка чисельних значень параметра δ_* на основі формули (II) показала, що вони знаходяться в діапазоні, який відповідає реальним розкриттям δ_T корозійно-механічних тріщин в металічних конструкційних матеріалах. Тут необхідно також відмітити суттєво важливий момент, який полягає в тому, що визначення параметрів, які входять в залежність (II) носить незалежний характер і не пов'язане з будь-якими прямими вимірюваннями в досліджуваних корозійно-механічних тріщинах.

Одержані результати послужили основою для припущення, що початок процесу локального корозійного руйнування матеріалу буде проходити в першу чергу в щілинах та тріщинах з розкриттям поряд-

ку $\Delta_n(\delta_n)$. На основі цього був сформульований наступний критерій початку корозійно-механічного руйнування: процес корозійного розтріскування матеріалу (процес субкритичного розвитку корозійної тріщини) починається при досягненні характерної величини розкриття тріщини δ_n , тобто $\delta_I > \delta_n$. При цьому для розглядуваного матеріалу розвиток корозійної тріщини має місце в діапазоні:

$$\delta_n < \delta_I < \delta_{II}, \quad (12)$$

де δ_{II} - критичне розкриття тріщини, що відповідає початку спонтанного катастрофічного руйнування матеріалу.

Виходячи з даного критерію, можна давати оцінку схильності матеріалів до корозійного розтріскування: матеріали для яких в заданих умовах випробовувань $\delta_n < \delta_{II}$ - схильні до корозійного розтріскування, і навпаки, коли $\delta_n > \delta_{II}$ - субкритичний ріст корозійної тріщини відсутній.

Значення δ_n можна трактувати, як прямий аналог порогового коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Isc} . Приймаючи до уваги відому залежність між параметрами K_I та δ_I і враховуючи, залежність (II) одержимо наступну формулу для визначення параметра K_{Isc} :

$$K_{Isc} = k \cdot \sqrt{\frac{w \cdot E \cdot \sigma_T}{L_0(\sigma, S)} [\alpha(\sigma, S) \cdot \beta]^{1/2}}, \quad (13)$$

де k - деяка безрозмірна константа; E - модуль Юнга.

В роботі приведені дані про апробацію та експериментальну перевірку одержаних залежностей, які показали задовільне співпадання розрахункових значень K_{Isc} з відомими в літературі експериментальними даними для високоміцних вуглецевих сталей в широкому діапазоні зміни pH корозійного середовища (рис.9).

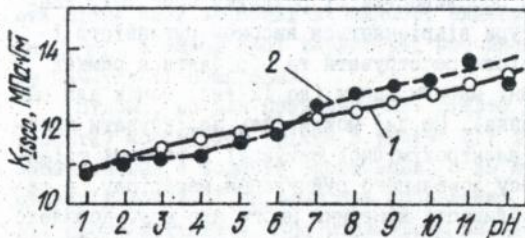


Рис.9. Залежність параметра K_{Isc} від pH корозійного середовища: 1-експериментальні дані з літератури; 2 - розрахункові дані на основі залежності (13).

Основна перевага і відмінність запропонованих модельних підходів є та, що вони дають змогу прогнозувати схильність матеріалів до корозійно-механічного руйнування на основі розрахункових даних без використання інформації, одержаної при випробуванні зразків з ре-

альними корозійними тріщинами. Крім цього, вони пов'язують на спільній основі корозійні процеси та процеси локального корозійно-механічного руйнування в щілиноподібних дефектах та тріщинах.

В главі також приведені дані про використання запропонованих підходів для вирішення практичних задач, пов'язаних із визначенням критичних величин щілин в конструктивних елементах та деталях машин, що експлуатуються в корозійних середовищах.

В п'ятій главі роботи досліджено умови і сформульовано відповідні критерії початку поширення корозійних тріщин, на основі яких запропоновано новий метод визначення порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Isc} та ΔK_{th} при корозійному розтріскуванні та корозійній втомі металів.

В основу вирішення даної проблеми була покладено запропонована модельна схема деформованого тіла з тріщиною (глава I), виходячи з якої вважається, що старт корозійної тріщини (початок її поширення) настає в деякий момент часу $\tau = \tau_*$, коли функція $F[K_I, \rho H_0(\tau), \varphi_0(\tau)]$, що описує стан зони передруйнування, приймає деяке характерне значення F_* , тобто

$$F[K_I, \rho H_0(\tau_*), \varphi_0(\tau_*)] = F_* \quad (14)$$

Визначення функціоналу (14) базується на даних експериментального дослідження закономірностей зміни в часі τ електрохімічних параметрів ρH_0 та φ_0 з моменту поступлення корозійного середовища в тріщину до моменту $\tau = \tau_*$ при різному напружено-деформованому стані в її вершині. Дані дослідження були виконані з використанням спеціально розробленого комплексу апаратури, що управляється комп'ютером по заданій програмі і забезпечує в автоматичному режимі безперервну реєстрацію електрохімічних умов в околі вершини тріщини в залежності від особливостей її розвитку (рис.10). Розроблений комплекс апаратури відрізняється високою чутливістю і точністю, а також можливістю реєструвати та обробляти в рамках одного експерименту значні масиви даних (до 12 тис. точок для одного випробовуваного зразка). Це дає можливість зафіксувати практично безперервно зміну електрохімічної ситуації в вершині тріщини на всіх стадіях процесу локального руйнування матеріалу, а також спостерігати всі особливості кінетики цього процесу. Комплекс володіє широкими функціональними можливостями і має самостійне значення, як новий інструментарій для визначення фізико-хімічних процесів локального руйнування матеріалів в корозійних середовищах, на базі якого можна планувати проведення принципово нових дослід-

жонь в даній галузі науки.

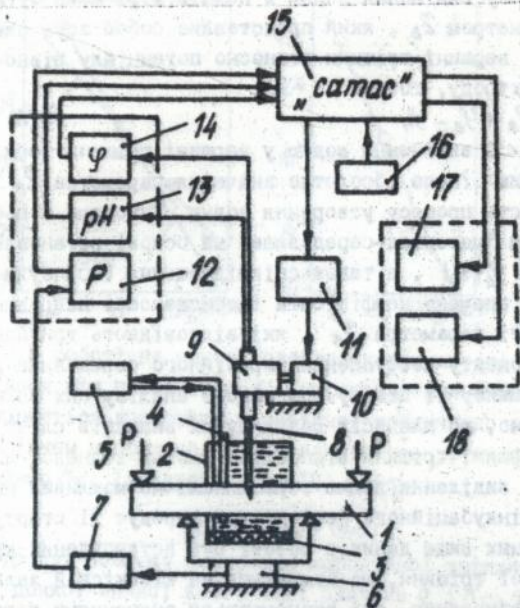


Рис.10. Принципова схема автоматичного комплексу для фізико-хімічних досліджень в вершині корозійної тріщини: 1 - зразок; 2 - камера з корозійним середовищем; 3, 4, 5 - система підтримання заданої температури середовища; 6 - механізм навантаження зразка; 7 - тензометричний блок; 8 - датчики-мініелектроди для електрохімічних вимірювань в тріщині; 9, - механізм їх переміщення; 10 - спеціальний кроковий двигун; 11 - блок його управління; 12, 13, 14 - блоки для рестрації вимірюваних параметрів; 15 - комп'ютерний комплекс "САМАС"; 16 - пульт управління (клавіатура); 17 - монітор; 18 - друкувальний пристрій.

Для встановлення особливостей зміни електрохімічних умов в корозійній тріщині, що передують її старту (початку поширення) був проведений комплекс експериментальних досліджень для ряду високоміцних сталей з мартенситною структурою. В результаті даних досліджень було незаперечно доведено, що для кожного початкового значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I в вершині тріщини мають місце свої властиві залежності електрохімічних параметрів $pH_0(\tau)$ та $\varphi_0(\tau)$, а також свої характерні значення, що відповідають моменту початку її поширення.

Відомо, що для розглядуваних сталей домінуючим механізмом розвитку корозійних тріщин в умовах дії довготривалого статичного навантаження є водневе окрихнення. В зв'язку з цим аналіз умов старту корозійної тріщини був проведений, виходячи з імовірності дії цього механізму. Про можливість виділення водню у вершині тріщини судили порівнюючи електрохімічні умови, що характеризуються параметрами pH_0 та φ_0 , з діаграмою термодинамічної стійкості води, на якій область її стабільності обмежена лінією, яка описується рівнянням рівноважного водневого електроду: $\varphi_H = -(\psi_1 + \psi_2 \cdot pH_0)$, де φ_H - потенціал рівноважного водневого електроду у в'ятах; ψ_1 -

$= 0,014В, u_2 = 0,059В$ - константи. При цьому прийнято припущення, що інтенсивність процесу виділення водню в певній мірі може бути охарактеризована параметром Z_0 , який представляє собою зсув електродного потенціалу в вершині тріщини відносно потенціалу рівноважного водневого електроду, тобто:

$$Z_0 = \varphi_0 - \varphi_H \quad (15)$$

При всіх значеннях $Z_0 < 0$ виділення водню у вершині тріщини термодинамічно можливо і чим більше абсолютне значення параметра Z_0 , тим більша інтенсивність процесу утворення водню. Виходячи з цього, для досліджених систем "матеріал-середовище" на основі встановлених залежностей $\rho H_0(\tau)$ та $\varphi_0(\tau)$, а також співвідношення (15) були побудовані для різних значень коефіцієнта інтенсивності напружень K_T , часові залежності параметра Z_0 , які відповідають тривалості часу (періоду) з моменту поступлення корозійного середовища в вершину тріщини до моменту її старту. На основі аналізу цих залежностей було встановлено, що для всіх розглянутих випадків електрохімічна ситуація в вершині тріщини відповідає умовам водневої деполаризації, і початок виділення водню термодинамічно можливий на протязі майже всього інкубаційного періоду, що передує її старту.

На основі одержаних вище даних в роботі був встановлений критерій старту корозійної тріщини, що базується на кількісній залежності між умовами наводнювання, які визначаються значеннями параметрів ρH_0 та φ_0 через параметр Z_0 та напружено-деформованим станом, що характеризується величиною K_T . Оцінку сумарної кількості водню q_0 , що утворився в вершині тріщини за інкубаційний період, який передує її старту, було здійснено з допомогою параметру q на основі наступних співвідношень:

$$q_0 = A \cdot q; \quad q = \int_{\tau_0}^{\tau_*} Z_0(\tau) d\tau = \int_{\tau_0}^{\tau_*} [\varphi_0(\tau) + u_1 + u_2 \cdot \rho H_0(\tau)] d\tau \quad (16)$$

де A - деяка константа; τ_0 - час початку виділення водню; τ_* - час старту тріщини.

Встановлено, що в логарифмічній системі координат параметр q практично лінійно зв'язаний з параметром K_T (рис.11). При цьому лінія регресії описується наступним рівнянням:

$$q = A_0 / K_T^m \quad (17)$$

де A_0 і m - коефіцієнти, що залежать від системи "матеріал-середовище".

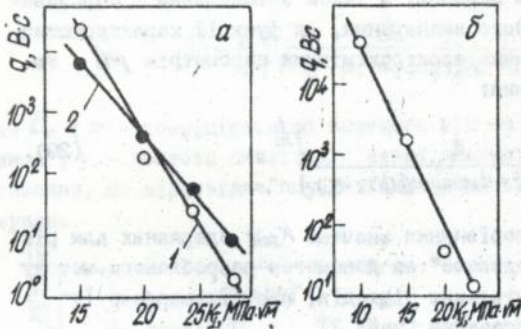


Рис.11. Залежність параметра q від коефіцієнта інтенсивності на зружень K_I : а - для сталі 40X в дистильованій воді (1) і в 0,5%-ному розчині NaCl (2); б - для сталі 40X13 в 3%-ному розчині NaCl.

В роботі на основі одержаних результатів підтверджено взаємозв'язок між параметром q , пропорційним кількості водню, що утворюється в вершині корозійної тріщини до початку її поширення та рівнем напружено-деформованого стану, що характеризується величиною K_I . Із залежності (18) слідує:

$$q \cdot K_I^m = A_0 = \text{const}, \quad (18)$$

тобто для початку поширення корозійної тріщини необхідна реалізація деякої певної комбінації значень q і K_I . Співвідношення (18) можна розглядати, як один із можливих критеріїв старту корозійної тріщини на випадок домінуючої дії механізму водневого окрихчення.

Слід відмітити, що формально критерій (18) по математичній структурі є подібним до відомих феноменологічних критеріїв з літератури. Однак він володіє принциповими відмінностями: по-перше, тут пов'язуються між собою параметри напружено-деформованого і електрохімічного стану в зоні передруйнування в околі вершини корозійної тріщини, а по-друге, він одержаний прямим експериментальним шляхом на основі безпосередніх фізико-хімічних досліджень в її вершині.

Одержаний критерій послужив основою для нового методу прискореного визначення та прогнозування порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Isc} , при яких в матеріалі в заданих умовах випробовувань не відбувається розвитку корозійної тріщини. На основі залежності (18) з врахуванням співвідношень (16) можна записати наступний вираз для визначення значення K_{Isc} на заданій базі випробовувань τ_0 :

$$K_{Isc} \leq \left[A_0 / \int_{\tau_0}^{\tau_0} \tau_0^{-m}(\tau) d\tau \right]^{1/m}. \quad (19)$$

В роботі приведена методика та обґрунтування визначення параметра K_{Isc} запропонованим методом, а також встановлена і апробована наближена залежність його визначення, як функції характеристичних (стабілізованих) значень електрохімічних параметрів ρH_0^c та φ_0^c в зоні передруйнування:

$$K_{Isc} \leq \left\{ \frac{A_0}{(1\varphi_0^c + u_1 + u_2 \cdot \rho H_0^c)(\chi_{TS} - \tau_0)} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (20)$$

В роботі приведено порівняння значень K_{Isc} одержаних для різних систем "матеріал-середовище" за допомогою розробленого методу та традиційних експериментальних підходів, яке підтвердило їх практично задовільне співпадання (табл.2).

Таблиця 2

Порівняння значень параметра K_{Isc} , одержаних експериментальним та розрахунковим методом на основі формули (20)

№р пп	Система "матеріал-середовище"	K_{Isc} , МПа·√м	
		експеримент	формула (20)
1	Сталь 40ХН - дистильована вода	13,0	13,9
2	Сталь 40ХН - 0,5%-ний розчин NaCl	11,5	11,6
3	Сталь 40ХІЗ - 3%-ний розчин NaCl	8,5	9,8
4	Сталь 40Х - дистильована вода	11,5	10,8
5	Сталь 40Х - 3%-ний розчин NaCl	11,5	10,4
6	Сталь 40Х - 1%-ний розчин $H_2BO_3 + KOH$ до рН = 8	12,4	13,1
7	Сталь 20ХІЗ - 3%-ний розчин NaCl	19,0	20,2
8	Сталь 50Х - дистильована вода	9,6 ^к	11,9
9	Сталь 45ХН2МФА - дистильована вода	9,0 ^к	11,9
10	Сталь 45ХН2МФА - 3%-ний розчин NaCl	8,7 ^к	10,5
11	Сталь 60ХС - дистильована вода	18,8 ^к	17,1
12	Сталь 50 - 3%-ний розчин NaCl	9,0	10,4

к - експериментальні дані з літератури.

Даний підхід був також трансформований для випадку корозійної втоми з метою визначення відповідних значень порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень ΔK_{th} . В роботі встановлена наступна залежність для підрахунку параметра ΔK_{th} , яка представляє собою функцію характеристичних (стабілізованих) значень електрохімічних

параметрів ρH_0^c та φ_0^c в вершині корозійно-втомної тріщини:

$$\Delta K_{th} \leq \left\{ \frac{\nu \cdot B_0}{(1 + \varphi_0^c + u_1 + u_2 \cdot \rho H_0^c)(N_5 - N_0)} \right\}^{\frac{1}{m'}} \quad (21)$$

де B_0 і m' - коефіцієнти, що залежать від системи "матеріал-середовище"; ν - частота циклічного навантаження; N_0 - число циклів навантаження, що відповідає початку виділення водню; N_5 - база випробовувань.

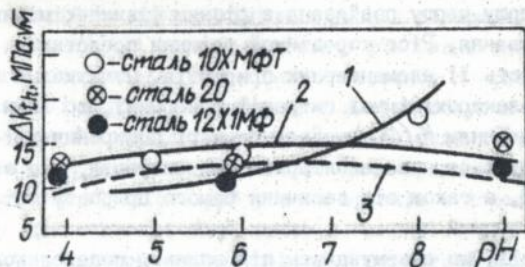


Рис.12. Залежність порогового коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} від pH вихідного корозійного середовища для сталі 10ХМФТ (1); сталі 20 (2) та сталі 12Х1МФ (3): точки - експериментальні дані, суцільні лінії - розрахунок на основі формули (21).

В роботі приведені дані про експериментальну перевірку одержаних залежностей і підтверджена їх застосовність при оцінці процесів локального корозійно-втомного руйнування металів. При цьому встановлено важливий висновок: запропонований критерій старту корозійно-втомної тріщини є універсальним для ідентичних по складу корозійних середовищ, що дає змогу прогнозувати значення ΔK_{th} в широкому діапазоні зміни pH корозійного середовища (рис.12). Підсумовуючи матеріали даної глави слід відмітити, що запропоновані підходи не тільки значно скорочують час випробовувань, але й володіють значно більшою інформативністю, оскільки забезпечують прогнозування параметрів $K_{Isc}(\Delta K_{th})$ на основі даних про електрохімічний стан зони локального передруйнування, а також дозволяють визначати час $T_*(N_*)$ початку росту корозійної тріщини при будь-якому заданому значенні $K_I(\Delta K_I)$.

В шостій главі розглянуто методологічні аспекти визначення і обґрунтування базових характеристик опору металів локальному корозійно-механічному руйнуванню. При цьому основну увагу приділено діаграмам статичної і циклічної корозійної тріщиностійкості, як основним характеристикам, що визначають опір матеріалу розвитку в ньому тріщини. Як відомо, при визначенні таких діаграм, що представляють собою залежності швидкості росту тріщини \dot{a} (швидкості

локального корозійного руйнування) від коефіцієнта інтенсивності напружень $K_I(\Delta K_I)$, в літературі, в тому числі і нами, виявлено вплив початкового значення $K_I(\Delta K_I)$ на характер самої діаграми, а також величину швидкості руйнування. Іншими словами, для деякої заданої системи "матеріал-середовище" може існувати замість однієї декілька функціональних залежностей $v(K_I)$ або $v(\Delta K_I)$, що вказує на неоднозначний зв'язок параметрів v та $K_I(\Delta K_I)$.

В роботі детально досліджено це явище, і на основі багатьох прикладів доведено, що неоднозначність діаграм корозійної тріщиностійкості металів в першу чергу пов'язана з різним фізико-хімічним станом зони передруйнування. Ріст корозійної тріщини представляє собою деяку послідовність її елементарних приростів. Початковий приріст залежить від електрохімічної ситуації в вершині, що визначається початковим значенням $K_I(\Delta K_I)$. Далі по мірі поширення тріщини в її вершині формується нова електрохімічна ситуація, яка залежить від попередньої, а також від величини самого приросту тріщини. Тобто кожний наступний приріст тріщини буде залежати від електрохімічної ситуації, що сформувалась під впливом попереднього. Це в результаті і приводить до неоднозначності діаграм корозійної тріщиностійкості, оскільки кожна фіксована швидкість росту тріщини визначається не тільки рівнем $K_I(\Delta K_I)$, але і електрохімічною ситуацією, що залежить від передісторії розвитку тріщини. Остання, в свою чергу, визначається електрохімічною ситуацією, що передувє старту тріщини: залежить від початкового значення $K_I(\Delta K_I)$. Тому для одержання інваріантних (однозначних) діаграм корозійної тріщиностійкості необхідно, щоб кожен елементарний приріст тріщини проходив при деякій постійній електрохімічній ситуації, яка не залежала б від передісторії розвитку тріщини. В цьому випадку зміна швидкості росту корозійної тріщини буде залежати тільки від величини $K_I(\Delta K_I)$, що обумовить однозначність діаграм корозійної тріщиностійкості, як функцій $v(K_I)$ або $v(\Delta K_I)$. Звідси слідує наступна умова однозначності таких діаграм:

$$pH_B = \text{const}; \varphi_B = \text{const}. \quad (22)$$

При цьому відмітимо, що реалізація умови (22) здійснюється за допомогою розроблених методичних підходів і відповідних технічних засобів, а її правомірність показана в роботі на основі прикладів, як у випадку корозійного розтріскування, так і у випадку корозійної втоми.

В главі також розглянута проблема врахування геометрії корозійної тріщини в околі зони передруйнування при визначенні харак-

теристик корозійної тріщиностійкості матеріалів. При цьому базуючись на відомих підходах, зокрема на понятті ефективного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{eff} , була здійснена відповідна корекція діаграм статичної корозійної тріщиностійкості для ряду систем "матеріал-середовище", а також одержано деякі нові результати, направлені на вирішення даної проблеми. Зокрема досліджено питання однозначності морфології корозійної тріщини (при заданому значенні K_I) по відношенні до швидкості її поширення та передісторії розвитку і показано експериментально, що при постійному значенні v та постійних електрохімічних умовах в вершині тріщини, геометрія її вершини має вповні визначене фіксоване значення, що не залежить від передісторії. Крім цього показано, що схематизуючи геометрію реальної корозійної тріщини і використовуючи експериментальні дані про траєкторію її розвитку, можна в деяких випадках визначати значення K_{eff} аналітично, не проводячи традиційні порівняльні випробування на в'язкість руйнування зразків з корозійною і гострою втомною тріщиною. В роботі одержані аналітичні вирази для визначення K_{eff} у випадку зигзагоподібної геометрії корозійної тріщини та підтверджена їх застосовність для випадку корозійного розтріскування високоміцних сталей з мартенситною структурою.

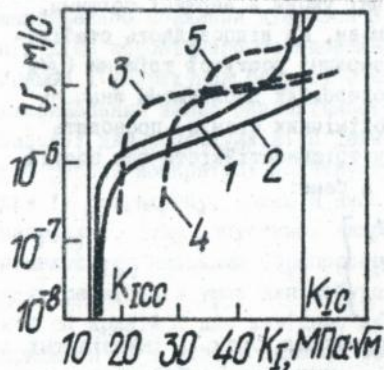


Рис.13. Діаграми статичної корозійної тріщиностійкості сталі 40XN в дистильованій воді: 1 - при постійних електрохімічних умовах у вершині тріщини і з врахуванням геометрії тріщини (тобто $K_I - K_{\text{eff}}$); 2 - тільки при постійних електрохімічних умовах в тріщині; 3-5 - неоднозначні діаграми, одержані без врахування вищевказаних факторів.

В якості прикладу що демонструє важливість і принциповість розглянутих вище факторів, на рис.13 приведено порівняння діаграм статичної корозійної тріщиностійкості для сталі 40XN, одержаних із врахуванням (криві 1 і 2) та без врахування (криві 3-5) електрохімічних умов і геометрії корозійної тріщини в околі зони передруйнування. При цьому відмітимо, що крива 1 є інваріантною і однозначно визначає опір матеріалу локальному корозійно-механічному

руйнуванню. Така крива і приймається в якості характеристики системи "матеріал-середовище".

В реальних умовах експлуатації розвиток корозійної тріщини в елементі конструкції супроводжується безперервною зміною електрохімічної ситуації в її вершині. Ця зміна, як показано раніше, залежить від багатьох факторів (початкових умов старту тріщини, часу дії середовища, швидкості утворення нової поверхні в зоні передруйнування та ін.) і, крім цього, носить імовірнісний характер, внаслідок випадкової зміни експлуатаційних факторів (коливань температури, навантаження, пауз в роботі). Тому в даному випадку може існувати цілий спектр кривих $v = f_1(K_I)$ або $v = f_2(\Delta K_I)$ і в залежності від конкретних умов може реалізуватись будь-яка крива із цього спектру. В зв'язку з цим в розрахунках на довговічність існує проблема вибору та обґрунтування базової діаграми корозійної тріщиностійкості. В главі викладено запропонований підхід до вирішення цієї проблеми, який базується на інваріантних (однозначних) діаграмах корозійної тріщиностійкості, які відповідають граничним електрохімічним станам, що реалізуються для заданої системи "матеріал-середовище" в вершині корозійної тріщини. За такі граничні стани прийнято: задані електрохімічні умови на поверхні зразка ($\rho H_n, \varphi_n$); стаціонарні електрохімічні умови в вершині тріщини, яка не розвивається ($\rho H_0^c, \varphi_0^c$) та умови, що відповідають стабілізації електрохімічних параметрів у вершині ростучої тріщини ($\rho H_0^p, \varphi_0^p$). Після визначення на основі попередніх досліджень значень ρH_0 та φ_0 для цих граничних електрохімічних станів, проводять три серії випробувань на корозійну тріщиностійкість при постійних умовах в околі вершини тріщини, а саме:

$$\left. \begin{array}{l} \text{I. } \rho H_0 = \rho H_n = \text{const}; \quad \varphi_0 = \varphi_n = \text{const}; \\ \text{II. } \rho H_0 = \rho H_0^c = \text{const}; \quad \varphi_0 = \varphi_0^c = \text{const}; \\ \text{III. } \rho H_0 = \rho H_0^p = \text{const}; \quad \varphi_0 = \varphi_0^p = \text{const}. \end{array} \right\} \quad (23)$$

Після цього по результатах таких випробувань будуть інваріантні діаграми корозійної тріщиностійкості, включаючи необхідну для порівняння, і діаграму для даного матеріалу на повітрі. Як показові, розглянемо результати таких досліджень для системи "сталь ІОХМТ-І%-ний розчин $H_2BO_3 + KOH$ до $pH = 8$ " (рис.14). Аналіз областей, що закладені між окремими діаграмами дозволяє дати кількісну оцінку впливу тих чи інших граничних електрохімічних станів на швидкість розвитку корозійно-втомної тріщини. Так, область А визначає вплив робочого середовища порівняно з повітрям; область В - вплив

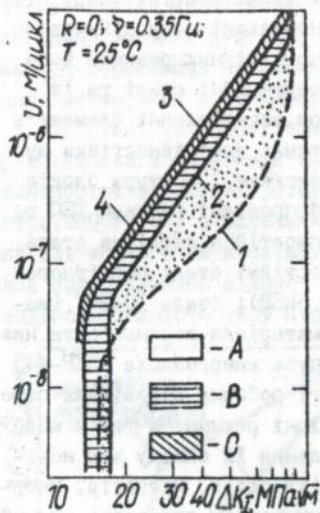


Рис.14. Базові діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості сталі IOXMET:

- 1 - випробовування на повітрі;
- 2 - $\rho_{H_2} = \rho_{H_2} = 8; \varphi_{H_2} = \varphi_{H_2} = -515$ мВ;
- 3 - $\rho_{H_2} = \rho_{H_2} = 6; \varphi_{H_2} = \varphi_{H_2} = -590$ мВ;
- 4 - $\rho_{H_2} = \rho_{H_2} = 5; \varphi_{H_2} = \varphi_{H_2} = -630$ мВ.

зміни початкових електрохімічних умов в вершині вихідної тріщини; область C - вплив зміни електрохімічних умов в процесі розвитку корозійно-втомної тріщини. Область між кривими 1 та 4 характеризує максимально можливий діапазон зростання швидкості росту тріщини під дією корозійного середовища. При цьому крива 4 є граничною діаграмою і розрахунок ресурсу елемента конструкції по ній гарантує максимальний запас довговічності. Ця крива і вибирається в якості базової для розрахунків. В деяких випадках виходячи із особливостей роботи конкретної конструкції, а також вимог, які ставляться для її розрахунку, можна в якості базової вибирати криву 3. Це, наприклад, буде допустимо, якщо розвиток тріщини в конструкції обмежується низькими (припороговими) швидкостями її росту, при яких реалізація умов для побудови кривої 4 малоімовірна. Розрахунок по кривій 2 дає завідомо завищені дані про довговічність і приймати її в якості базової без додаткових обґрунтувань не рекомендується. Слід відмітити, що пропонувані під і до побудови базових кривих відрізняються підвищеною точністю і надійністю, оскільки базуються на інваріантних (однозначних) діаграмах корозійної тріщиностійкості і дозволяє дати диференційовану оцінку вкладу електрохімічних умов в вершині тріщини у прискорення її розвитку в експлуатаційних умовах.

Сьома глава роботи присвячена практичному використанню роз-

роблених підходів для визначення базових характеристик опору ста-лей енергообладнання локальному корозійно-механічному руйнуванню з врахуванням можливих змін типових водно-хімічних режимів його роботи. Об'єктом досліджень служили конструкційні сталі та їх зварні з'єднання, що використовуються при виготовленні елементів конструкцій систем енергетичного обладнання: корозійностійка аус-тенітна сталь 08X18H12T (трубопровідні системи I контура блоків ВВЕР-440); вуглецева сталь типу 20 (трубопровідні системи ТЕС та трубопроводи II контура блоків ВВЕР); теплостійка перлітна сталь 12Х1МФ (паропроводи ТЕС); леговані теплостійкі сталі перлітного класу 15Х2МФА; 15Х2НМФА (корпуси блоків ВВЕР); сталь 10ХМТ (ма-теріал зварного шва енергоблоків ВВЕР; матеріали верхнього та ниж-нього шарів антико-розійної наплавки корпусу енергоблока ВВЕР-440 (сталі 04Х20Н10Г2Б та 07Х25Н13). В якості робочих корозійних сере-довищ були використані типові водно-хімічні режими, а також модель-ні режими, які враховують можливі відхилення їх складу від номі-нального і наявності шкідливих домішок (хлоридів, нітратів, неор-ганічних та органічних кислот). При цьому основу складали: водний режим борного регулювання (1%-ний розчин $H_2BO_3 + KOH$ до $pH = 8$); аміачний режим (дистильована вода + NH_3 до $pH = 9$); гідразинно-аміачний режим (дистильована вода + NH_3 до $pH = 9 + 100$ мг/кг H_2N_2), а також нейтральний режим - дистильована вода (конденсат).

На основі комплексу попередніх досліджень визначено вплив ек-сплуатаційних факторів на опір розвитку корозійно-втомної тріщини в досліджуваних сталях: частоти ($\nu = 0,01 + 10$ Гц) та коефіцієнта асиметрії ($R = 0 + 0,7$) циклу навантаження, а також температури середовища ($T = 25 + 80^\circ C$). При цьому особливу увагу приділено встановленню впливу можливої зміни складу типових водно-хімічних режимів. Одержані результати дали змогу встановити найбільш не-сприятливе поєднання даних факторів, що призводить до найбільшого зростання швидкості росту тріщини (швидкості локального процесу корозійно-втомного руйнування). Ці експлуатаційні умови були виб-рані при проведенні електрохімічних досліджень в тріщині з метою встановлення відповідних характеристичних значень параметрів R_p та ϕ_p . Тобто, згідно з викладеним в попередній главі підходом до побудови базових діаграм корозійної тріщиностійкості матеріалів, були визначені граничні електрохімічні ситуації, що можуть реалі-зуватись в вершині тріщини для розглядуваних систем "матеріал-се-редовище" в експлуатаційних умовах. На основі цих даних були змо-дельовані робочі корозійні середовища для випробувань досліджува-

них матеріалів на циклічну корозійну тріщиностійкість з метою одержання базових діаграм, які відображають максимальний вплив фактора середовища на локальні процеси корозійно-втомного руйнування матеріалів в експлуатаційних умовах.

Одержані на основі такої схеми досліджень базові діаграми представляли в подвійній логарифмічній системі координат у вигляді залежностей швидкості росту корозійно-втомної тріщини v від параметра $(\Delta K_I/\sqrt{1-R})$. Одержаний при цьому масив експериментальних даних для кожного із досліджуваних матеріалів зображали у вигляді двох прямолінійних ділянок (рис.15), кожна з яких описували степеневою залежністю типу Періса:



Рис.15. Схематичне представлення базових діаграм циклічної тріщиностійкості сталей енергообладнання.

$$v = C (\Delta K_I / \sqrt{1-R})^n, \quad (24)$$

де C і n - константи, що залежать від системи "матеріал-середовище". Для порівняння були також визначені і побудовані базові діаграми циклічної тріщиностійкості досліджуваних сталей на повітрі. Підсумкові дані одержаних в главі результатів представлені в табл.3. Вони покладені в основу розрахунків на довговічність елементів обладнання та трубопроводів енергоустановок з врахуванням кінетики тріщиноподібних дефектів в умовах експлуатації.

Таблиця 3

Підсумкові дані для опису базових діаграм циклічної тріщино-
стійкості матеріалів енергообладнання залежності (24)

Матеріал	Середовище	I ділянка		II ділянка			
		C	n	діапазон зміни ($\Delta K_I/\sqrt{r}$), МПа·√м	C	n	діапазон змін. ($\Delta K_I/\sqrt{r}$), МПа·√м
Сталь 08X18H12T	корозійне середовище	$7,25 \cdot 10^{-53}$	43,35	11,6...12,9	$3,81 \cdot 10^{-12}$	3,78	12,9...50,0
	повітря	$1,15 \cdot 10^{-44}$	32,87	13,3...15,1	$1,20 \cdot 10^{-12}$	3,77	15,1...50,0
Сталь 12X1МФ	корозійне середовище	$7,35 \cdot 10^{-53}$	36,24	16,5...17,6	$2,19 \cdot 10^{-12}$	3,75	17,6...50,0
	повітря	$2,40 \cdot 10^{-66}$	50,09	13,5...14,1	$4,90 \cdot 10^{-13}$	3,93	14,1...50,0
Сталь 20	корозійне середовище	$1,76 \cdot 10^{-21}$	11,05	11,6...21,9	$2,24 \cdot 10^{-9}$	1,98	21,9...70,0
	повітря	$3,89 \cdot 10^{-29}$	16,71	14,5...17,8	$8,00 \cdot 10^{-12}$	2,98	17,8...70,0
матеріал зварного шва (сталь 10ХМЛ)	корозійне середовище	$1,58 \cdot 10^{-39}$	27,90	11,7...13,6	$4,08 \cdot 10^{-11}$	2,81	13,6...83,0
	повітря	$2,69 \cdot 10^{-46}$	32,64	13,2...14,5	$1,38 \cdot 10^{-11}$	2,70	14,5...57,0
корпусні сталі 15X2М2А 15X2НМ2А	корозійне середовище	$3,31 \cdot 10^{-21}$	10,64	12,0...20,7	$5,13 \cdot 10^{-10}$	2,27	20,7...77,6
	повітря	$1,45 \cdot 10^{-69}$	59,84	10,0...10,8	$1,32 \cdot 10^{-11}$	3,08	10,8...81,0
зварне з'єднання антикорозійна наплавка - корпусна сталь"	корозійне середовище	$8,10 \cdot 10^{-27}$	19,80	7,3...10,1	$1,29 \cdot 10^{-8}$	1,49	10,1...50,0
	повітря	$6,91 \cdot 10^{-26}$	19,84	6,5...7,1	$3,72 \cdot 10^{-11}$	2,66	7,1...50,0

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

1. На основі літературного огляду існуючих підходів та аналізу одержуваних результатів показано, що для коректного і універсального вирішення проблеми визначення та прогнозування процесів корозійного руйнування матеріалів в екстремальних умовах (тріщина і середовище) необхідна розробка нових підходів, які б враховували специфіку фізико-хімічної взаємодії корозійного середовища і деформованого металу безпосередньо (локально) в зоні передруйнування.
2. Запропонований та розвинутий новий підхід до визначення локальних процесів корозійно-механічного руйнування, згідно з яким зона передруйнування матеріалу в околі верхньої тріщини описується певним функціоналом, що містить параметри напружено-деформованого стану в матеріалі та параметри фізико-хімічних процесів, що протікають між деформованим матеріалом та корозійним середовищем. Детально проаналізовані найбільш поширені на практиці випадки, а саме: прискорене руйнування конструкційних металів у водних корозійних середовищах, коли є характерним домінуюче значення електрохімічних процесів в зоні передруйнування.
3. Розроблено комплекс оригінальних методик і відповідні технічні засоби (стаціональні датчики-імітатори для локальних електрохімічних вимірювань, зразки, випробувальні камери та устаткування різних модифікацій) для локальних фізико-хімічних досліджень процесів корозійно-механічного руйнування, що протікають в тріщинах та інших концентраторах напружень тріщиноподібного типу.
4. Розроблений і створений автоматичний (керується з допомогою комп'ютера) комплекс апаратури, що має самостійне значення як новий інструментарій для визначення корозійно-механічних характеристик локального руйнування матеріалів, і на базі якого можна здійснювати принципово нові дослідження в даній галузі науки.
5. Встановлені основні характеристики та одержані узагальнюючі дані про закономірності зміни фізико-хімічного стану зони передруйнування на різних стадіях процесу локального корозійно-механічного руйнування матеріалу. В тому числі:
 - показано встановлення з часом у верхній корозійній тріщині, яка не розвивається, стаціонарних електрохімічних умов, які описуються характеристичними значеннями водневого показника

середовища ρH_a^c та електродного потенціалу металу φ_B^c , а також показано визначальну роль цих параметрів для початку поширення та подальшого нестационарного розвитку тріщини;

- для стаціонарних електрохімічних умов запропоновані аналітичні вирізи для визначення значень параметрів ρH та φ по глибині тріщини (від поверхні зразка до її вершини), а також побудовані такі залежності для різних систем "матеріал-середовище";
- доведено, що основними факторами, які призводять до формування в зоні передруйнування характеристичних стабільних значень ρH_a^c та φ_B^c є фізико-хімічні особливості системи "матеріал-середовище", а також заданий рівень напружено-деформованого стану;
- для ряду систем "матеріал-середовище" побудовані просторові діаграми, які дозволяють прогнозувати характеристичні значення ρH_a^c та φ_B^c в залежності від будь-якої комбінації коефіцієнта інтенсивності напружень K_T та температури корозійного середовища T ;
- для корозійно-пасивних систем досліджено термодинамічні умови утворення пасивної плівки в околі вершини тріщини і визначено значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_T^* , при якому відбувається її механічне руйнування; при цьому показано принципову важливість параметра K_T^* , який визначає перехід зони передруйнування з одного фізико-хімічного стану в інший, а також його кореляцію із швидкістю росту корозійно-атомної тріщини;
- досліджено зміну електрохімічних умов у вершині тріщини при її поширенні і показано, що на певному етапі її розвитку встановлюються стабілізовані значення параметрів ρH_a^c та φ_B^c , які можна вважати характеристичними величинами зони передруйнування для даного випадку;
- в модельних умовах проведені багаточисельні дослідження впливу розтягуючих напружень та ρH середовища на параметри локальної гальванопари, що реалізується в зоні передруйнування в околі вершини тріщини на певних етапах її розвитку; при цьому побудовані відповідні просторові діаграми для прогнозування їх значень в широкому діапазоні зміни ρH .

б. Запропонована модельна схема корозійної тріщини, на основі якої показана геометрична аналогія між корозійною тріщиною та корозійною циліндром з точки зору протікання в них електрохімічних

процесів, відповідальних за початок зародження процесу корозійно-механічного руйнування матеріалу. Доведено існування деякої характеристичної ширини щілини Δ_* і розкриття тріщини δ_* , при яких буде мати місце екстремальна інтенсивність корозійних процесів. Значення цих параметрів прийнято в якості граничних (критеріальних), при досягненні яких наступає початок процесу локального корозійно-механічного руйнування матеріалу.

7. На основі аналізу електрохімічної ситуації, що виникає в зоні передруйнування при різних рівнях напружено-деформованого стану, встановлений критерій старту (початку поширення) корозійної тріщини, а також запропоновано аналітичний вираз для його опису, що містить параметри K_T , ρH_b та φ_b .
8. Розроблений метод прискореного визначення та прогнозування порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Tsc} при корозійному розтріскуванні та ΔK_{th} при корозійній втомі і запропоновані аналітичні залежності для їх підрахунку, як функцій характеристичних значень електрохімічних параметрів ρH та φ в зоні передруйнування.
9. Запропоновано метод визначення базових характеристик опору металів локальному корозійно-механічному руйнуванню (базових характеристик корозійної тріщиностійкості), який забезпечує відображення максимального впливу фактора корозійного середовища на швидкість росту тріщини, шляхом врахування граничних електрохімічних умов, що можуть реалізуватись в зоні передруйнування для розглядуваної системи "матеріал-середовище".
10. На основі комплексу широких цілеспрямованих досліджень побудовані базові діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості для ряду конструкційних сталей, що використовуються при виготовленні енергообладнання. Одержані дані враховують широкий спектр зміни експлуатаційних умов, включаючи можливі зміни типових водно-хімічних режимів, а також електрохімічних умов в вершині тріщини.
11. Розроблені в роботі методологічні підходи разом із відповідними технічними засобами впроваджені в інженерну практику в ряді організацій енергетичної, авіабудівної та суднобудівної галузей, а також увійшли до нормативного документу "Р54-292-90. Рекомендації. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении в жидких коррозионных средах. - М.: ВНИИМАШ, 1990". Крім цього одержані базові характеристики

опору сталеї енергообладнання локальному корозійно-механічному руйнуванню використані в регламентуючих документах по розрахунках на довговічність елементів обладнання та трубопроводів енергоустановок (ВТІ. Москва).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДБРАЖЕНІ В ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Дмитрах І.Н., Панасюк В.В., Ратич Л.В. Методика стабілізації напружено-деформованого стання около вершини усталостной трещины в образцах при чистом изгибе // Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов. Сб. научн. трудов. - Киев: Наук. думка, 1981. - С. 220-226.
2. Дмитрах І.Н., Панасюк В.В., Ратич Л.В. Установка для исследования кинетики усталостной трещины в образцах при чистом изгибе в жидких средах // Там же. - С. 275-278.
3. Дмитрах І.Н. О механизме ускоряющего воздействия водной среды на рост усталостной трещины в стали 40Х13 // Физ.-хим. механика материалов. - 1982. - № 2. - С. 118-119.
4. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмитрах І.Н. К вопросу определения электрохимического состояния в развивающейся трещине при исследовании трещиностойкости материала в коррозионной среде // Там же. - 1982. - № 3. - С. 42-49.
5. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмитрах І.Н. О некоторых задачах исследования циклической трещиностойкости материалов в жидких средах // Там же. - 1982. - № 3. - С. 42-49.
6. А.с. 911241 СССР, МКИ³ G01N 17/00. Устройство для испытания образцов на трещиностойкость в коррозионной среде // И.Н. Дмитрах, Л.В. Ратич, В.В. Панасюк. - Опубл. 07.03.82, Бол. № 9.
7. А.с. 911242 СССР, МКИ³ G01N 17/00. Способ испытания образцов с трещиной на вязкость разрушения в коррозионной среде // В.В. Панасюк, Л.В. Ратич, И.Н. Дмитрах. - Опубл. 07.03.82, Бол. № 9.
8. А.с. 926561 СССР, МКИ³ G01N 3/00. Образец для испытания материалов на вязкость разрушения. - В.В. Панасюк, Л.В. Ратич, И.Н. Дмитрах. - Опубл. 07.03.82, Бол. № 17.
9. А.с. 934345 СССР, МКИ³ G01K 27/52. Электролитический капилляр для электрохимических исследований трещиностойкости материалов // И.Н. Дмитрах, Л.В. Ратич, В.В. Панасюк. - Опубл. 07.03.82, Бол. № 21.
10. Дмитрах І.Н., Тимофеев В.Т., Федорова Б.А. Сопротивление развитию трещин металла антикоррозионной наплавки при циклическом нагружении в коррозионной среде // Вопросы судостроения, Сер. Сварка. - 1982. - Вып. 34. - С. 3-11.
11. Дмитрах І.Н. Определение циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионной среде с учетом электрохимических условий в вершине трещины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Львов, 1982. - 27 с.
12. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмитрах І.Н. Определение циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионной среде // Доклады АН СССР. - 1983. - 269. № 1. - С. 109-112.
13. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмитрах І.Н. К теории циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионной среде // Publ. Techn. Univ. Heavy Industry, Ser. C. Machinery (Singapore). - 1983. - 38, № 4. - P. 123-138.
14. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмитрах І.Н. Зависимость скорости роста усталостной трещины в водной коррозионной среде от электрохимических условий в вершине трещины // Физ.-хим. механика материалов. - 1983. - № 4. - С. 33-37.
15. Дмитрах І.Н., Слободян З.В. Ингибирование роста усталостной

- трещины в стали 40Х в нейтральных средах // Теория и практика ингибирования коррозии металлов. Сб. науч. трудов. - Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 1983. - С. 109-113.
16. Paltsevuk V. F., Ratush L. V., Dmytrakh I. N. Fatigue crack growth in corrosive environments // Fatigue Engng. Mater. Struct. - 1984. - 7, N 1. - P. 1-11.
 17. А.с. 1100539 СССР, МКИ³ G01N 27/00. Устойчивость для испытания образцов на трещиностойкость в коррозионной среде // Л.В. Ратич, И.Н. Дмытрах. - Опубл. 30.06.84, Бол. № 24.
 18. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмытрах И.Н. Циклическая трещиностойкость металлов в коррозионных средах // Успехи механики (Advances in Mechanics). - Варшава: Гос. науч. изд-во, 1984. - 7, № 3. - С. 37-50.
 19. Ратич Л.В., Дмытрах И.Н., Тимофеев Б.Т., Пусяк С.А., Седорова В.А. Об электрохимических условиях в вершине трещины при испытаниях на коррозионную трещиностойкость Залочных образцов из стали 15Х2ММА в водной среде // Физ.-хим. механика материалов. - 1984. - № 3. - С. 69-76.
 20. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмытрах И.Н. Методика определения электрохимического состояния в вершине трещины при испытаниях конструкционных материалов на трещиностойкость в коррозионных средах // Заводская лаборатория. - 1984. - 50, № 7. - С. 56-59.
 21. Дмытрах И.Н., Грабовский Р.С. Экспериментальная К_т-характеристика Залочного образца с краевой трещиной и гидродинамическим отверстием в плоскости ее распространения // Физ.-хим. механика материалов. - 1985. - № 2. - С. 114-116.
 22. Панасюк В.В., Дмытрах И.Н., Грабовский Р.С. С некоторыми методологических аспектах определения статической коррозионной трещиностойкости конструкционных материалов // Там же. - 1985. - № 3. - С. 21-28.
 23. Дмытрах И.Н., Грабовский Р.С. Влияние pH среды на водородопроницаемость пассивирующих пленок и скорость роста коррозионной трещины в стали 40Х // Там же. - 1985. - № 4. - С. 22-25.
 24. Дмытрах И.Н., Ратич Л.В., Тимофеев Б.Т., Черненко Т.А. Трещиностойкость металла шва в коррозионной среде при циклическом нагружении // Вопросы судостроения, Сер. Сварка. - 1985. - Вып. 39. - С. 43-49.
 25. Дмытрах И.Н., Грабовский Р.С. Статическая коррозионная трещиностойкость высокопрочных сталей и факторы, влияющие на нее // Трещиностойкость материалов и элементов конструкций. Тез. докл. II Всес. симпозиума по механике разрушений. - Киев, 1985. - Т. 2. - С. 7-77.
 26. Панасюк В.В., Дмытрах И.Н., Грабовский Р.С. Об условиях старта коррозионной трещины // Физ.-хим. механика материалов. - 1985. - № 2. - С. 3-7.
 27. Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмытрах И.Н. Определение базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости сталей с учетом экстремальных электрохимических условий в трещине // Доклады АН СССР. - 1986. - 266, № 5. - С. 1126-1131.
 28. А.с. 1245963 СССР, МКИ⁴ G01N 17/00. Образец для испытания материалов на коррозионное растрескивание / Л.В. Ратич, И.Н. Дмытрах. - Опубл. 23.07.86, Бол. № 27.
 29. Ратич Л.В., Дмытрах И.Н., Тимофеев Б.Т., Бовк Р.И. Циклическая коррозионная трещиностойкость сварного соединения "антикоррозионная наплавка - корпусная сталь" // Физ.-хим. механика материалов. - 1987. - № 5. - С. 46-49.
 30. Панасюк В.В., Дмытрах И.Н., Тимофеев Б.Т., Игнатюк В.А. Определение циклической коррозионной трещиностойкости металла сварного шва корпуса атомного реактора с учетом электрохимических условий в трещине // Механическая усталость металлов.

- Десятый международный коллоквиум. - Чехо-Словакия: Братислава, 1987. - С. 89-93.
31. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дытрак И.Н. Особенности прогнозирования долговечности конструкций с учетом циклической коррозионной трещиностойкости материалов // Там же. - С. 110-114.
 32. Panasyuk V.V., Ratyuch L.V., Dmytrakh I.N. The role of electrochemical situation of the crack tip in corrosion cracking and corrosion fatigue of metals // Corrosion Sci. and Engng, Vol. Electrochem (India). - 1987. - 3, № 6. - P. 553-557.
 33. А.с. 1375991 СССР, МКИ⁴ G01N 3/32. Устройство для испытания металлических образцов на усталость / В.М.Зайдель, В.В.Панасюк, И.Н.Дытрак. - Опубл. 23.02.88, Бол. № 7.
 34. А.с. 1469325 СССР, МКИ⁴ G01N 17/00. Способ определения электрохимических параметров металла при щелочной коррозии / В.В.Панасюк, И.Н.Дытрак, В.М.Зайдель. - Опубл. 30.03.89, Бол. № 12.
 35. А.с. 1478099 СССР, МКИ⁴ G01N 17/00. Способ определения оптимальной концентрации ингибитора пассиватора / И.Н.Дытрак, В.М.Зайдель. - Опубл. 07.05.89, Бол. № 17.
 36. Дытрак И.Н. Влияние напряженного состояния металла на параметры электрохимических процессов в коррозионной трещине-щели // Коррозия металлов под напряжением. Тез. докл. У Республ. конф. - Львов, 1989. - С. 148.
 37. Дытрак И.Н., Зайдель В.М. Методика коррозионных исследований в узких металлических щелях // Физ.-хим. механика материалов. - 1989. - № 5. - С. 106-108.
 38. Дытрак И.Н. Об электрохимических условиях в коррозионных щелях // Там же. - 1989. - № 6. - С. 106-107.
 39. Panasyuk V.V., Ratyuch L.V., Dmytrakh I.N. A new approach to determination of corrosion crack resistance of nuclear reactor steels and their welds // Proc. Third Int. Atom Energy Specialists Meeting on Subcritical Crack Growth, Moscow, May 14... 17, 1990. - Washington: Nat. Engng. Associates, 1990. - Vol. 1. - P. 133-140.
 40. Дытрак И.М. Влияние растягивающих напряжений на параметры коррозионных процессов в модельных трещинах-щелях // Физ.-хим. механика материалов. - 1990. - № 4. - С. 22-25.
 41. Р 54-292-90. Рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении в жидких коррозионных средах / В.В.Панасюк, С.Н.Романов (науч.рук.), Г.Н.Никифорова, И.Н.Дытрак (отв.исп.) и др. - М.: БНТИМАШ, 1990. - 38 с.
 42. Дытрак И.М., Райнхард В. Влияние складу середовища на ріст корозійно-втомних тріщин в сталі X6CrNiTi18.10 // Физ.-хим. механика материалов. - 1991. - № 2. - С. 19-23.
 43. Гринь Е.А., Дытрак И.Н. Закономерности развития трещин в сталях трубопроводов электростанций при переменном нагружении в условиях воздействия теплоносителя // Электрические станции. - М.: Атомэнергоиздат, 1991. - № 6. - С. 73-76.
 44. Panasyuk V.V., Dmytrakh I.N. Brittle fracture mechanics of materials in corrosive environments // Vorträge zur 17. Metalltagung "Umgebungsabhängiges Bruchverhalten". - Dresden: Informationsgesellschaft Verlag, 1991. - P. 43-70.
 45. Дытрак И.М. До питання визначення процесів локального корозійного руйнування конструкційних матеріалів // Физ.-хим. механика материалов. - 1991. - № 6. - С. 33-39.
 46. Панасюк В.В., Дытрак И.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных металлов // Конгресс "Защита-92". Расширенные тез. докл. - Москва, 1992. - С. 9-10.

Підписано до друку 20.01.93. Формат 60x84/16 Друк офсет. Папір офсе..
Умов.друк.арк 2,8 Умов.фарбо-відб. 3,04. Обл.-вид.арк. 3,0 Тираж
100 прим. Зам. 2063.

Обласна книжкова друкарня, 290000, Львів, вул. Стефанича, II.

470718

AG 28.858

430718

AB 26.847

AB 26.847