

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Академік НАН України **В. В. ПАНАСЮК**

(Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна)

Розроблення методів розрахунку на міцність і довговічність зварних конструкцій є одним з актуальних напрямів науки про міцність матеріалів. Відомо, що стан матеріалів у зоні зварного шва відрізняється від стану матеріалу, який з'єднують відповідними зварювальними технологіями. В зоні зварного шва завжди є різні пошкодження — дефекти, залишкові напруження, які необхідно враховувати під час розрахунку на міцність і довговічність елементів зварних конструкцій. Наведено синтез деяких досліджень впливу зазначених вище факторів на міцність і довговічність зварних з'єднань, використовуючи концепції сучасної механіки деформованих твердих тіл з тріщинами (механіки руйнування).

Ключові слова: зварні з'єднання, міцність, довговічність, тріщина, тріщиностійкість, руйнування матеріалу, ресурс експлуатації

Для того, щоб охарактеризувати загальну сутність проблем і підходів теорії міцності та руйнування матеріалів на сучасному рівні науки про їх фізико-механічні властивості, розглянемо базові (класичні та некласичні) засади (постулати) механіки матеріалів для оцінювання їх міцності [1].

В рамках класичних уявлень про матеріали, як деякі тверді тіла-континууми, вважають, що елемент деформованого твердого тіла під дією зовнішніх сил перебуває в одному із таких станів: суцільному (*C*) або зруйнованому — розірваному (*P*) стані. При цьому перехід матеріалу із стану *C* у стан *P* — процес руйнування (рис. 1, *a*) проходить миттєво, якщо характеристики напружено-деформованого стану, підраховані на основі вибраної реологічної моделі твердого тіла (наприклад, пружного континууму) досягають критичних (граничних) значень для цього тіла. Наприклад, якщо максимальне розтягувальне напруження досягне межі міцності σ_b матеріалу, то матеріал зруйнується — розділиться на дві частини (*C* → *P* перехід, рис. 1, *a*) і це відбудеться миттєво. Якщо максимальні напруження σ_{max} менші за σ_b , то руйнування не відбудеться і елемент конструкції буде зберігати свою цілісність (міцність). Це класичний постулат механіки матеріалів, використовуючи який оцінювання міцності матеріалів і елементів конструкцій (у тому числі і зварних) зводять до побудови (на основі теоретичних і експериментальних даних) деяких функціоналів, які називають класичними критеріями міцності:

$$F_s(I_1, I_2, I_3, C_1, C_2, C_3 \dots) \leq 0, \quad (1)$$

де $I_1 \dots I_3$ — інваріанти тензора напружень (або деформацій), а $C_1 \dots C_3 \dots$ — сталі, які визначають із експериментів.

Важливо підкреслити, що в рамках класичного підходу неможливо здійснити технічну діагностику руйнування чи неруйнування матеріалів в конструкції за екстремальних умов їх експлуатації. Наприклад, дати оцінку міцності матеріалу за наявності у ньому гострих концентраторів напружень — тріщин. Крім цього, аналіз експериментальних даних процесів руйнування показує, що процес руйнування матеріалу не є миттєвим по всьому перерізу тіла, а проходить поступово (в часі) шляхом поширення тріщини і цього класичні підходи не враховують.

Основну ідею (концепцію) некласичних підходів, тобто підходів сучасної механіки руйнування та міцності матеріалів, можна сформулювати так (рис. 1, *b*): перехід елемента деформованого матеріалу із *C* в *P*-стан супроводжується ще деяким проміжковим (*П*) станом матеріалу, який необхідно враховувати під час оцінювання міцності матеріалу, особливо коли в матеріалі елементи конструкції можуть бути дефекти типу тріщин (гострокінцеві концентратори напружень). Біля гострокінцевих концентраторів напружень проміжкові *П*-стани матеріалу є особливо характерними (рис. 1, *в*).

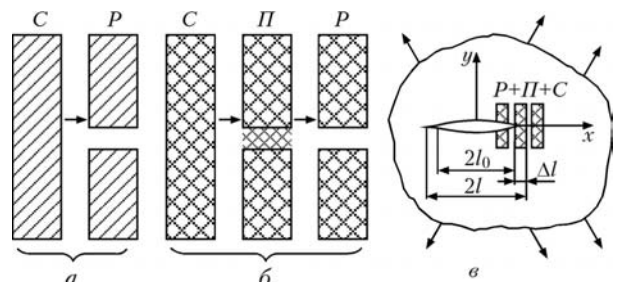


Рис. 1. Схеми руйнування матеріалу: *a* — класична; *b* — некласична; *в* — некласична біля вершини тріщини

Отже, локальне руйнування матеріалу проходить за схемою $C \rightarrow P \rightarrow R$ переходів. Це базова концепція сучасної механіки руйнування та міцності матеріалів, у тому числі і зварних з'єднань.

Характерними особливостями областей деформованого матеріалу, де виникають його P -стани (області передруйнування) є те, що матеріал у цих областях деформований за межою його пружності і розміри цих областей є малі (це мезооб'єми), у цих областях інтенсивно відбуваються процеси дифузії, локальних пластичних деформацій, взаємодія з оточуючим середовищем тощо.

Фізико-механічні властивості мезооб'ємів матеріалу (зон передруйнування) відрізняються від фізико-механічних властивостей основного матеріалу. Базовою фізико-механічною характеристикою цього об'єму матеріалу вважають [2] мінімальну енергію, яку необхідно нагромадити (вкласти) в одиницю цього об'єму, щоб забезпечити реалізацію утворення двох нових одиниць поверхні. Цю характеристику розглядають як здатність матеріалу чинити опір руйнуванню (поширенню у ньому тріщини) і називають тріщиностійкістю (або в'язкістю руйнування у вищезгаданому сенсі) визначають експериментально. Вже розроблені методи та необхідні зразки матеріалів із спеціально утвореними тріщинами для реалізації таких експериментів [2, 3]. За даними про тріщиностійкість матеріалів можна робити висновок про надійність і роботоздатність матеріалу як елемента конструкції. Є очевидним, що коли вища тріщиностійкість матеріалу, то вища надійність його під час експлуатації. Піднімаючи тріщиностійкість матеріалу (роблячи матеріал більш пластичним), ми зменшуємо його загальну

(макроскопічну) технічну міцність на відрив (σ_B) або на циклічну довговічність (σ_{-1}). Важливішою задачею металургії та науки про матеріали стає задача оптимізації фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів за цими двома параметрами: технічною міцністю (σ_B) або межою утоми (σ_{-1}), та величиною тріщиностійкості матеріалів (K_{IC}).

На даний час найбільш поширеними характеристиками тріщиностійкості матеріалу є максимальний коефіцієнт інтенсивності напружень біля вершини тріщини K_{IC} або величина розкриття тріщини біля її вершини δ_{IC} в момент її старту за умов дії квазістатичного (монотонно зростаючого) зовнішнього навантаження. За умов тривалого сталого або циклічно змінного навантаження тріщиностійкість матеріалу характеризують діаграмою циклічної тріщиностійкості (рис. 2), яка являє собою залежність швидкості росту тріщини $v(K_I)$ від коефіцієнта інтенсивності напружень (K_I) біля вершини тріщини. При цьому встановлюють порогову величину $K_{I_{max}} = K_{I_{th}}$, яка характеризує такий напружений стан матеріалу в зоні передруйнування P , коли для всіх $K_I < K_{I_{th}}$ тріщина не буде стартувати (поширюватися).

Застосування характеристик тріщиностійкості для оцінювання міцності зварних з'єднань. Сучасна інженерна практика у машинобудуванні, у будівництві різних технічних об'єктів: мости, тунелі, греблі, трубопроводи, об'єкти атомної та теплової енергетики, авіаційної та космічної техніки, залізничного транспорту тощо широко використовує технології з'єднання різних елементів конструкцій шляхом їх зварювання. У цьому плані необхідно відзначити, що Інститут електрозварювання ім. О. Є. Патона НАН України (ІЕЗ) зробив особливо вагомий внесок у створення та впровадження у практику нових, сучасних технологій з'єднання конструкційних матеріалів. У цьому величезна заслуга і колективу інституту, і його наукового лідера — ученого із світовим ім'ям Б. Є. Патона [4]. Науковцями ІЕЗ, зокрема В. І. Труфяковим, І. К. Походнею, В. І. Махненком, Л. М. Лобановим, В. І. Кир'яном та іншими [5–7] розроблено ряд сучасних методів оцінювання міцності та ресурсу зварних конструкцій. У цьому плані методи механіки руйнування набувають, як відомо, ефективного використання. На рис. 3 наведено результати [8] оцінювання деградації фізико-механічних характеристик сталі 15ХІМФ паропроводу та металу зварного шва після його експлуатації впродовж 190 тис. год за стандартними характеристиками та характеристиками тріщиностійкості. Встановлено [8], що з усіх показників механічного стану стосовно основного металу чутливими до його деградації виявилися лише характеристики тріщиностійкості — корот-

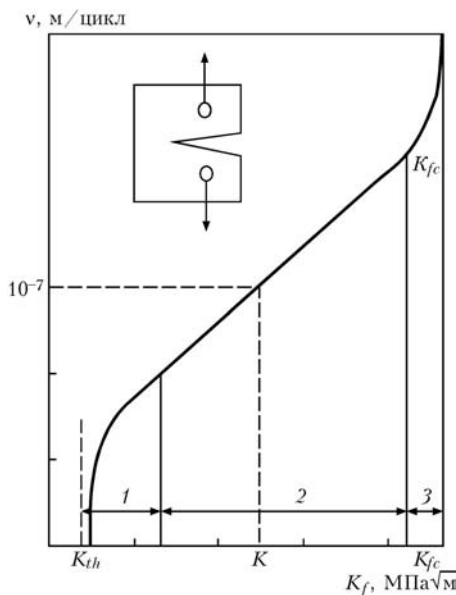


Рис. 2. Діаграма циклічної тріщиностійкості матеріалу (v - K -діаграма): 1 — ділянка, близька до порогу $K_{I_{th}}$; 2 — практично прямолінійна ділянка; 3 — ділянка швидкого росту тріщини і повного руйнування за умов $K_{I_{max}} = K_{I_{fc}}$

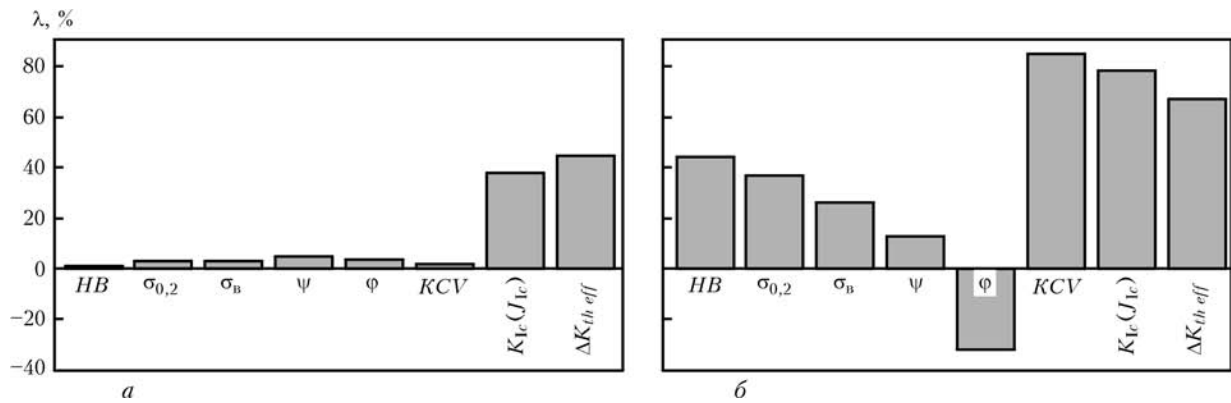


Рис. 3. Зниження λ механічних характеристик сталі 15X1M1Φ паропроводу (а) та металу зварного шва (б) після 190 тис. год експлуатації на Ладжинській ТЕС ($\lambda = (\sigma^{(0)} - \sigma^{(g)}) / \sigma^{(0)} \cdot 100\%$)

кочасна тріщиностійкість K_{IC} і ефективний поріг циклічної тріщиностійкості K_{th} . Водночас встановлено, що в процесі тривалої експлуатації найбільш інтенсивно деградує метал зварного шва, що робить його з усіх зон зварного з'єднання найбільш уразливим до руйнування після тривалої експлуатації. В цьому випадку поряд з характеристиками тріщиностійкості чутливою стає і ударна в'язкість, якщо випробовувати зразки з достатньо гострим надрізом. Виявлено також, що зміна зазначених характеристик корелює з фактографічно встановленим зниженням енергоємності руйнування. При цьому виявлене підвищення стандартного видовження ϕ (на противагу зниженню стандартного звуження ψ) не свідчить про підвищення пластичності матеріалу, а є наслідком мікропошкоджуваності експлуатованого металу зварного шва, яка під час розтягування зразка призводить до розкриття мікродфектів і це сумарно проявляється формально як збільшення видовження матеріалу.

Типова структура зварного шва та його біляшовна зона завжди має характерні неоднорідності, які зумовлені технологіями та матеріалами зварювання, а також властивостями матеріалів, що з'єднуються [7]. У багатьох випадках це непровари, тріщини, різна структура матеріалу біляшовної зони, вплив робочого середовища тощо. І коли виникає необхідність оцінити міцність або довговічність зварної конструкції, то методи механіки руйнування або характеристики тріщиностійкості матеріалу зварного шва та біляшовної зони набувають особливо важливого значення (рис. 3). Тому в теоретичному та прикладному плані важливим є розроблення ефективних методів експериментального визначення цих характеристик. Розглянемо їх визначення на прикладі пластины, звареної із високоміцної сталі RQN601 [9] (рис. 4). Застосовуємо для цього випадку методи механіки руйнування з метою оцінити тріщиностійкість зон зварного шва. Схема звареної плити та зразків для визначення тріщиностійкості показана на рис. 4, а результати визначення тріщи-

ностійкості δ_{IC} — на рис. 5. Наведені експериментальні дані (рис. 5) про тріщиностійкість матеріалу різних зон зварного шва за величинами критичного розкриття тріщини (COD), тобто за величинами δ_{IC} , від технології зварювання показують, що за цією характеристикою найменшу опірність до руйнування (до поширення тріщини) має ЗТВ зварного з'єднання, а також показують значне розсіювання експериментальних даних. Необхідно відзначити, що сама процедура визначення величини δ_{IC} для зварного шва є достатньо складною.

Зазначені обставини спричинили до того, що ряд дослідників, зокрема у ФМІ НАН України, почали розробляти нові та більш ефективні методи вимірювання характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів, у тому числі і зварних з'єднань. Одним із таких методів є комп'ютерна фіксація спекл-зображень [10] точок поверхні матеріалу біля вершини тріщини в зоні

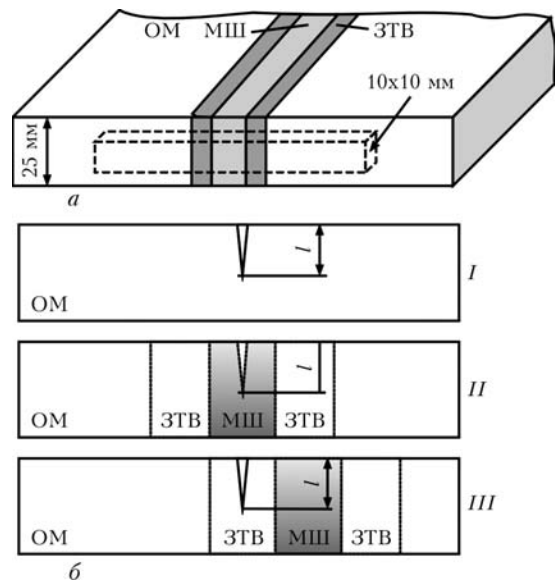


Рис. 4. Схема зварного з'єднання з високоміцної сталі RQT601 та вирізки балкових зразків (а) і балкові зразки для випробовувань на тріщиностійкість компонентів зварного з'єднання (б); I — основний метал (ОМ); II — метал шва (МШ); III — ЗТВ

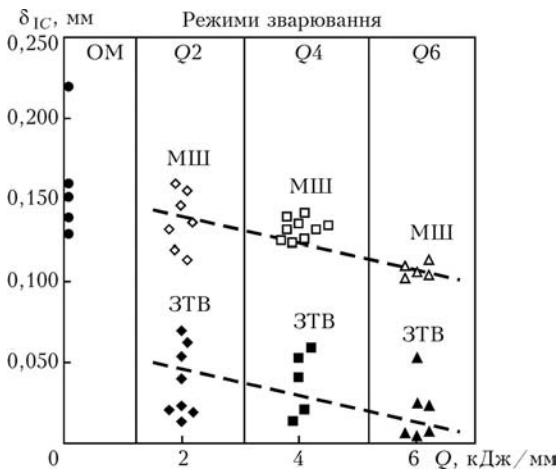


Рис. 5. Критичне розкриття тріщини δ_{IC} для компонентів зварного з'єднання з високоміцної сталі RQT 601, виготовленого при різних режимах теплової потужності зварної дуги Q [9]

передруйнування (схема на рис. 6). В роботі [10] було здійснено прецизійний аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу в зоні передруйнування в розтягувальній пластині з тріщиною. Дослідження здійснювали на зразках із сплаву Д16АТ. При цьому величину переміщень $\delta_y(x)$ у зоні передруйнування вимірювали за різної величини бази вимірювання $b(b_1, b_2, b_3)$, тобто $\delta_{yi} = b_i + e_{yi}(x)$, $i = 1...3$. Установлений цим методом розподіл переміщень в зоні передруйнування d_p наведено на рис. 6, де криві 1–3 відносяться до різних баз b_i вимірювання, коли навантаження $p = \text{const}$, а криві 1', 2', 3' — відповідно після розвантаження пластини. Одержані результати свідчать про те, що експериментальне встановлення критичного розкриття δ_{IC} між берегами тріщини біля її вершини, коли вихідна макротріщина нормального відриву починає поширюватися, може бути різне в залежності від бази

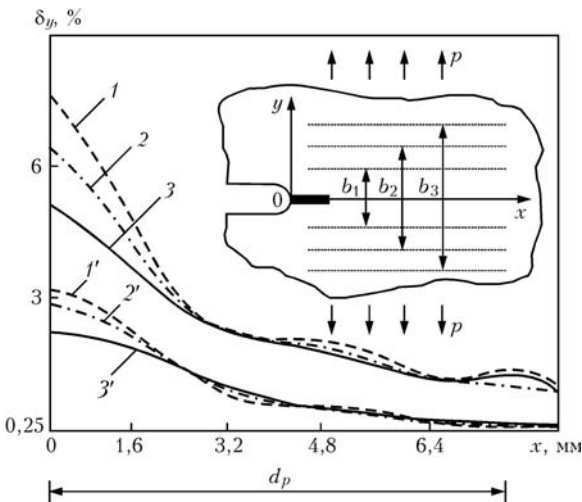


Рис. 6. Розподіл переміщень $\delta_y(x)$ біля вершини тріщини за різних баз вимірювання b у навантаженому (1–3) ($b_1 = 1,28$; $b_2 = 2,56$; $b_3 = 3,08$ мм) і розвантаженому (1'–3') зразку із сплаву Д16АТ

вимірювання b_i . Водночас на рис. 6 наведені експериментальні дані показують, що величина (протяжність) зони передруйнування d_p не залежить від бази вимірювання розкриття модельної тріщини. Вона залишається сталою для даного матеріалу. Цей експериментальний факт можна використати для певної модифікації відомої δ_c -моделі [1], а також певної модифікації методики визначення характеристики тріщиностійкості δ_{IC} конструкційного матеріалу (зокрема зварних швів), поклавши в основу вимірювання величину зони передруйнування d_p .

Згідно з δ_c -моделлю [1] величина d_p для розтягнутої пластини з центральною тріщиною довжиною $2l_0$ зв'язана з прикладеним навантаженням інтенсивності p і усередненими напруженнями σ_0 в зоні передруйнування залежністю:

$$d_p = l_0 \left(\sec \frac{\pi p}{2\sigma_0} - 1 \right), \quad (2)$$

де σ_0 — усереднене значення напружень у зоні передруйнування.

Величину σ_0 для матеріалів, що зміцнюються, визначають за формулою $\sigma_0 = \frac{1}{2}(\sigma_{0,2} + \sigma_b)$.

Якщо тіло з макротріщиною ($2l_0, d_p \ll l_0$) навантажують зусиллям p до розриву ($p = p_*$), то в такому разі величина $d_{p*} = d_*$ стане певною характеристикою властивостей матеріалу. Використовуючи ці результати та концепцію δ_c -моделі, одержимо таку формулу для визначення усередненого значення $\delta_{IC} = \tilde{\delta}_{IC}$ як деформаційної характеристики тріщиностійкості конструкційного матеріалу, або зварного з'єднання:

$$\tilde{\delta}_{IC} = 8\sigma_0 d_* / (\pi E), \quad d_* < l_0. \quad (3)$$

Якщо $d_* \sim l_0$, ця формула має більш складну структуру. Використання формули (3) для визначення деформаційної тріщиностійкості матеріалів $\tilde{\delta}_{IC}$, у тому числі і зварних швів, дає змогу обійти труднощі, які виникають за умов її прямого експериментального визначення. Крім цього, використання формули (3) дає змогу встановити величину $\tilde{\delta}_{IC}$ на підставі даних про d_* , які можна одержати в результаті металографічного аналізу поверхонь макрозломів (руйнування) різних зон зварного з'єднання.

Застосування J -інтеграла для оцінювання тріщиностійкості зварних швів конструкційних матеріалів. В інженерній практиці, зокрема у випадках оцінювання тріщиностійкості пластичних конструкційних матеріалів, часто використовують таку величину, як J -інтеграл. Ця характеристика опору конструкційного матеріалу крихкому руйнуванню (поширенню тріщини) у фізичному розумінні є величиною такої мінімальної

кількості енергії, яку необхідно нагромадити (вкласти) в одиницю об'єму матеріалу з урахуванням його пластичного деформування, яка є необхідною для утворення двох одиниць вільної поверхні цього одиничного об'єму. Встановлені відповідні формули Черепанова-Райса [1, 11] для обчислення цієї енергії. Але реалізація обчислень за цією формулою вимагає введення ще додатково певної реологічної моделі пластично деформованого об'єму матеріалу в зоні передруйнування. Тому в кінцевому рахунку отримуємо певне наближене значення цієї характеристики. Враховуючи складність (навіть наближеного) обчислення J -інтеграла, можна використати концепцію δ_c -моделі [1] квазікрихкого руйнування матеріалу для оцінювання величини J -інтеграла. В δ_c -моделі базовою рівністю, яка зв'язує характеристику тріщиностійкості матеріалу δ_{Ic} і характеристику напружено-деформованого матеріалу в зоні передруйнування, тобто в області II-станів, є така рівність: $2\gamma = \sigma_0 \delta_{Ic}$, де γ — густина поверхневої енергії матеріалу; $\sigma_0 = \frac{1}{2}(\sigma_{0,2} + \sigma_B)$ — середнє напруження матеріалу в зоні передруйнування.

На підставі наведеного вище одержимо

$$J_{Ic} = 2\gamma = \frac{1}{2}(\sigma_{0,2} + \sigma_B)\delta_{Ic}, \quad (4)$$

де δ_{Ic} підраховуємо за формулою (3).

Таким чином, масмо просту інженерну формулу для оцінювання величини J -інтеграла.

Застосування методів механіки деформованих тіл з тріщинами для оцінювання тріщиностійкості зварних конструкцій в робочих середовищах. У першій половині 1980-х років в роботах І. М. Дмитраха, В. В. Панасюка і Л. В. Ратича [12] була сформульована нова концепція щодо фізико-хімічної ситуації, яка виникає біля вершини тріщини в деформованому твердому тілі в заданому робочому середовищі. Ця концепція полягає в наступному. Швидкість росту тріщини під час його навантаження в робочому поверхнево-активному середовищі залежить не тільки від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I , але і від фізико-хімічних характеристик системи «середовище-метал» біля вершини тріщини (а не на поверхні тіла). Було показано [12], що такі фізико-хімічні характеристики системи «середовище-метал» як водневий показник рН і електродний потенціал E на поверхні металу $(pH)_s$ і E_s та біля вершини тріщини $(pH)_t$ і E_t є різними. Розроблені методи вимірювання характеристик $(pH)_t$ і E_t [12, 13].

Враховуючи особливості фізико-хімічної ситуації біля вершини тріщини у поверхневоактивному середовищі, було запропоновано [12, 13] діаграму циклічної тріщиностійкості конструкційного матеріалу у такому вигляді:

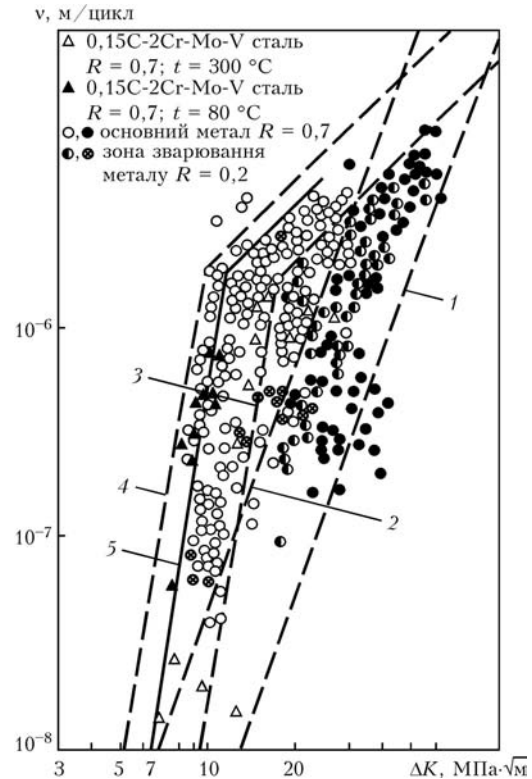


Рис. 7. Діаграми циклічної тріщиностійкості (v - K -діаграми) для металів посудин тиску: 1, 2 — згідно з методом ASME; 3, 4 — за даними Бамфорда [15] (узагальнення експериментальних даних); 5 — базова діаграма, побудована в рамках запропонованої концепції

$$v = f(K_I, (pH)_t, E_t), \quad (5)$$

де K_I — коефіцієнт інтенсивності напружень для тіла з тріщиною; $(pH)_t$ і E_t — відповідно водневий показник та електродний потенціал в околі вершини тріщини в системі «середовище-метал».

З формули (5) випливає, що для одержання інваріантної діаграми (v - K_I) необхідно забезпечити такі умови:

$$(pH)_t = \text{const}, E_t = \text{const}. \quad (6)$$

Було показано [12], що максимальна швидкість (v_{\max}) росту тріщини в системі «середовище-метал» буде тоді, коли параметри $(pH)_t$ і E_t досягнуть мінімального значення для даної системи, тобто

$$v_{\max} = f(K_I, (pH)_t^{\min}, E_t^{\min}). \quad (7)$$

Для реалізації цієї концепції були створені [13] оригінальні методи щодо експериментального визначення характеристик $(pH)_t$ і E_t для заданої системи «середовище-метал», а також у випадку необхідності для регулювання величиною цих характеристик.

Такий підхід став принципово новим інструментарієм вивчення та оцінювання впливу поверхнево-активних і корозійно-агресивних середовищ на міцність і довговічність конструкційних матеріалів і зварних з'єднань для атомної, суд-

нобудівної та авіаційної промисловостей. Зауважимо, що користуючись запропонованою концепцією, можна побудувати діаграму циклічної тріщиностійкості, яка відповідає екстремальним умовам впливу поверхнево-активного або корозійно-агресивного середовища на процеси руйнування матеріалу або зварного з'єднання в експлуатаційних умовах, тобто встановити базову діаграму тріщиностійкості матеріалу в конструкції [14]. Такі діаграми є необхідними для оцінювання довговічності елементів конструкцій. На рис. 7 наведено масиви експериментальних даних [15] для різних матеріалів і елементів зварних з'єднань, які використовують для конструювання посудин високого тиску, а також базові (розрахункові) діаграми тріщиностійкості матеріалів елементів конструкцій, де діаграма 4 є огинаючою всіх експериментальних даних, а 5 побудована згідно з формулою (7). Зіставлення цих діаграм свідчить про їх хорошу кореляцію.

Застосування концепцій циклічної тріщиностійкості за екстремальних умов фізико-хімічної ситуації у вершині тріщини може бути корисним і для оцінювання зварних з'єднань в системах «протикорозійна наплавка–реакторна сталь». Такі дослідження виконані працівниками Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів) та НДІ «Прометей» (С.-Петербург, Росія) [16, 17]. Виконання таких досліджень було зумовлене вимогою фінських наглядових органів під час поставки устаткування для АЕС у Фінляндію.

Висновки

1. Показано, що характеристики тріщиностійкості конструкційних матеріалів і зварних з'єднань є більш чутливими до змін фізико-механічних властивостей матеріалів в конструкціях під час їх тривалої експлуатації у порівнянні з традиційними (класичними) характеристиками.

2. Запропоновано нові підходи щодо визначення характеристик δ_{1c} та J_{1c} -інтеграла, а також побудови базових діаграм циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів і зварних з'єднань, які можна використовувати в інженерній практиці для оцінювання роботоздатності елементів конструкцій тривалої експлуатації в заданому середовищі, а також для визначення їх залишкового ресурсу.

The development of the methods of welds strength and durability assessment are the most actual trends in the science about materials strength. It is known that the state of material in the zone of joint weld differs from the state of the material that is joined by certain welding technologies. There are always different damages in the zone of the joint weld-defects, residual stresses that should be taken into consideration while calculating strength and durability of welded structures. The synthesis of some investigations on the influence of mentioned factors on strength and durability of welds using the concepts of up-to-date fracture mechanics of cracked solids (fracture mechanics) are given below.

Надійшла в редакцію 13.05.2008

1. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. — Киев: Наук. думка, 1991. — 412 с.
2. Panasyuk V. V. Strength and fracture of solids with cracks. — Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2002. — 464 p.
3. Панасюк В. В., Андрейкив І, Ковчич С. Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. — Киев: Наук. думка, 1977. — 277 с.
4. Патон Б. Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2000. — № 9–10. — С. 3–9.
5. Лобанов Л. М., Махненко В. И., Труфяков В. И. Развитие численных и технологических методов повышения прочности, долговечности и надежности изготавливаемых сварных конструкций // Тр. междунар. конф. «Сварка и родственные технологии для XXI столетия». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 1988. — 396 с.
6. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 617 с.
7. Походня И. К. Металлургия дуговой сварки. — Киев: Наук. думка, 2005. — 441 с.
8. Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д. Аномальный прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання оцаднолегованої сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2007. — № 1. — С. 73–79.
9. Neves J., Loureiro A. Fracture toughness of welds — effect of brittle zones and strength mismatch // J. Mat. Proc. Processing Technology. — 2004. — № 153–154. — P. 537–543.
10. Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2004. — № 5. — С. 63.
11. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
12. Panasyuk V. V., Ratrych L. V., Dmytrakh I. M. Fatigue crack growth in corrosive environments // Fatigue Fract. Eng. Mater. and Struct. — 1984. — 7, № 1. — P. 1–11.
13. Дмытрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. — Львів: ФМІ НАН України, 1999. — 341 с.
14. Панасюк В. В., Ратыч Л. В., Дмытрах И. Н. Определение базовых диаграмм циклической трещиностойкости сталей с учетом экстремальных электрохимических условий в трещине // Докл. АН СССР. — 1986. — 266, № 5. — С. 1128–1131.
15. Bamford W. H. Application of corrosion fatigue growth rate data to integrity analyses of nuclear vessels // J. Eng. Mater. and Technol. — 1979. — 101, № 3. — 182–190.
16. Определение циклической коррозионной трещиностойкости металла сварного шва корпуса атомного реактора с учетом электрохимических условий в трещине / В. В. Панасюк, И. Н. Дмытрах, Б. Т. Тимофеев, В. А. Игнатов // Тр. 9-го Междунар. colloквиума «Механическая усталость металлов». — Братислава, 1987. — С. 89–93.
17. Оценка коррозионной повреждаемости и коррозионной трещиностойкости сварного соединения «антикоррозионная наплавка-реакторная сталь» / В. В. Панасюк, И. Н. Дмытрах, В. А. Федорова, Б. Т. Тимофеев // Вопр. материаловедения. Сер. Сварка. — 2007. — 51, № 3. — С. 218–226.