

Валерій МАКАРЕНКО,

д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0001-6668-3957

Ігор ЖЕЛЕЗНЯК,

аспірант

ORCID: 0009-0008-0458-4943

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

РОЗРАХУНОК ЗВАРНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЇХ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

На сьогоднішній день актуальним питанням є розрахунок оболонкових конструкцій при небезпеці корозійного розтріскування, яке слід проводити по допустимому несучому навантаженні із розрахунку на міцність по величині критичних напружень, які спричиняють виникнення і розвиток корозійної тріщини по гранично допустимій глибині корозійної тріщини чи дефекту типу тріщини. Звичайний розрахунок по несучому навантаженню конструкцій із пластичних матеріалів, в тому числі із низьковуглецевих сталей, ведеться без урахування остаточних зварних напружень по допустимим напруженням. Як правило, фактично виявлені тріщини, при наявності яких апарати ще зберігають стійкість, перевищують розрахункові. Це пов'язано з появою, як правило, не одиничних тріщин, а серії тріщин, що приводить до де концентрації напружень і збільшенню критичних розмірів тріщин. Розрахунки з використанням механіки руйнування при наявності серії тріщин вимагають як наукового, так і експериментального обґрунтування. Однак, з наведеного прикладного розрахунку слідує, що остаточні напруження можуть різко знижати критичну величину корозійної тріщини. Наряду з розглянутим підходом з урахуванням переваг і обмежень, розглянутих раніше для прогнозування працездатності зварних конструкцій, з початковими не проварами і іншими дефектами, типу тріщин доцільно використання розрахунків за методами механіки руйнування. Для цього повинно бути відомі вираження для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень, характеристики матеріалу $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} , а також характеристики росту тріщини в конкретних умовах навантаження. При наявності цих даних, які отримують на основі пробних випробувань, можна вирішити наступні задачі: а) дати порівняльну оцінку матеріалів по критеріям $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} при інших рівних умовах більшим спротивом руйнуванню володіють матеріали з більшим значенням цих коефіцієнтів; б) по відомим для даного матеріалу і середовищу величинам $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} і величині діючих в конструкції напружень розраховують допустиму величину тріщини подібних дефектів, виходячи з умови нерозповсюдження тріщини (по K_{IC}); в) по відомим $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} і наявним в конструкції дефектам обмежити допустимі діючі напруження; г) розрахувати безаварійний термін служби виробів в конкретних умовах навантаження для даної пари метал-середовище по відомому критичному сполученню напруженості, величині дефекту і характеристиці швидкості.

Ключові слова: труба, деформація, тріщина, пластична зона, полігон.

Вступ. Для подальшого уточнення вищевикладених коефіцієнтів в розрахункових формулах потрібно було провести додаткові експериментальні дослідження в умовах, наближених до промислових навантажень і середовищ, в яких експлуатуються оболонкові конструкції, а також щоб розміри зразків відповідали, наприклад, товщині стінок оболонок чи товщині стінок трубопроводів. Для цього експериментальні дослідження проводили по методиці, рекомендованій іноземними Інститутами, зокрема Баттеля (США), Британською газовою корпорацією (БГА – Великобританія), сталевим концерном Маннесман (ФРН). У цих компаніях, концернах, Інститутах у всі рівняння, не дивлячись на їх різну структуру, входять: діаметр D і товщина стінки оболонки (чи труб) h , колові напруження σ_K в стінках труб чи оболонок, які визначаються по відомій котельній формулі, а тому у наших дослідженнях використовували повно товщинні зразки типу DWTT, які в значній мірі дозволяють, тим самим, підвищити об'єктивність оцінки спротиву сталі руйнуванню оболонкових конструкцій та трубопроводів. Проведені розрахунки надали можливість порівняння товщини стінки деком позера діаметром 9 м і висотою 34 м, що свідчить про наближеність наукового і експериментального обґрунтування.

Аналіз досліджень і публікацій. Із літератури [1-8] і багаторічних спостережень відомо, що значна частина зварних конструкцій оболонкового типу працює в умовах мало-циклової втомленості (число циклів до 10^5) при повторно-статичних і динамічних навантаженнях. Це пов'язано з періодичністю технологічного режиму з періодичними пусками і зупинками на очистку і ремонт, замінами процесу реакції, процесом регенерації.

Постановка завдання. Ціллю даної роботи є експериментальне дослідження і ріст тріщин в зварних з'єднаннях сталей, які використовуються для будівництва і експлуатації трубопровідних конструкцій в жорстких природньо-кліматичних і інженерних умовах.

Основна частина. Загальноприйнятних методів розрахунку зварних з'єднань, які працюють при повторно-статичному навантаженні, не існує. В основному використовують наступну методик: визначають умовну межу витривалості σ_N при заданій характеристиці циклу $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ на обмеженій базі випробувань N , відповідній тривалості експлуатації зварювальній конструкції. Число повторно-статичних навантажень приймають $N = 2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$.

За отриманими даними σ_N вводом коефіцієнта запасу n визначають допустиме напруження:

$$[\sigma_N] = \sigma_N / n.$$

Для зварного з'єднання:

$$[\sigma_N^3] = \sigma_N^3 / n \text{ чи } (\sigma_N^3 / n) / K_{\text{Еф}}.$$

На практиці звичайно приймають $n = 1.25 - 1.4$; $K_{\text{Еф}}$ – ефективний коефіцієнт концентрації при статичному навантаженні; $K_{\text{Еф}} = \sigma_B / \sigma_{BK}$ при вібраційному навантаженні; $K_{\text{Еф}} = \sigma_1 / \sigma_{1K}$ ($\sigma_B, \sigma_1, N, \sigma_{BK}, \sigma_{1K}$ – границі міцності і витривалості без концентратора і з концентратором відповідно); $[\sigma_N^3]$, $[\sigma_N^M]$ – допустимі напруження для зварного з'єднання і основного металу на заданій базі випробувань N .

У випадку заданого навантаження визначають число циклів до появи тріщини $N_{\text{ТР}}$ чи загальну довговічність N_P (число циклів до руйнування), а також живучість $N_{\text{Ж}} = N_P - N_{\text{ТР}}$ – число циклів, на протязі яких відбувається субкритичний ріст

тріщини. По цим величинам назначають допустиме число циклів напруження в період експлуатації конструкцій.

Величину допустимих значень граничних (порогових) напружень $[\sigma_{\text{ПОР}}^K]$ і умовної межі витривалості $[\sigma_N^K]$ в агресивному середовищі визначають за результатами пробних випробувань з урахуванням статистики відмов конструкцій. В загальному вигляді:

$$[\sigma_{\text{ПОР}}^K] = (\sigma_{\text{ПОР}} \cdot \eta) / n; \quad [\sigma_N^K] = (\sigma_N^K \cdot \eta) / n,$$

де η – коефіцієнт кореляції між прискореними випробуваннями в лабораторних середовищах і промисловими умовами.

Для подальшого уточнення вищевикладених коефіцієнтів в розрахункових формулах потрібно було провести додаткові експериментальні дослідження в умовах, наближених до промислових навантажень і середовищ, в яких експлуатуються оболонкові конструкції, а також щоб розміри зразків відповідали, наприклад, товщині стінок оболонок чи товщині стінок трубопроводів. Для цього експериментальні дослідження проводили по методі, рекомендованій іноземними Інститутами, зокрема Баттеля (США), Британською газовою корпорацією (БГА – Великобританія), сталевим концерном Маннесман (ФРН). У цих компаніях, концернах, Інститутах у всі рівняння, не дивлячись на їх різну структуру, входять: діаметр D і товщина стінки оболонки (чи труб) h , колові напруження σ_K в стінках труб чи оболонок, які визначаються по відомій котельній формулі [1-6], а тому у наших дослідженнях використовували повно товщинні зразки типу DWTT, які в значній мірі дозволяють, тим самим, підвищити об'єктивність оцінки спротиву сталі руйнуванню оболоноквих конструкцій та трубопроводів [7].

Значення допустимих напружень для зварних з'єднань $[\sigma_{\text{ПОР.З}}^K]$, $[\sigma_{N.З}^K]$ можна отримати декількома шляхами:

а) безпосередньо за результатами випробувань зразків, вузлів, макетів, відтворюючих напружений стан, конструктивні і технологічні особливості виробів, в середовищах, відповідним промисловим. В такому випадку:

$$[\sigma_{\text{ПОР.З}}^K] < \sigma_{\text{ПОР.З}}^K \cdot (\eta/n)$$

б) побічно за результатами корозійних випробувань основного металу з використанням коефіцієнтів, враховуючих особливості поведінки зварних з'єднань в даному середовищі в порівнянні з основним металом при відповідному виді навантаження:

$$[\sigma_{\text{ПОР.З}}^K] < \sigma_{\text{ПОР.М}}^K \{ (K_{3\text{М}}^K)_{\text{КР}} / K_{\text{ЕФ}}^K \cdot (\eta/n) \}; \quad [\sigma_{N.З}^K] < \{ \sigma_{N.М}^K (K_{3\text{М}}^K)_N / K_{\text{ЕФ}}^K \cdot (\eta/n) \}$$

де $(K_{3\text{М}}^K)_{\text{КР}}$, $(K_{3\text{М}}^K)_N$ – коефіцієнти враховуючі зміну чутливості металу зварювальних з'єднань до руйнування в порівнянні з основним металом в умовах статичного і повторно-статичного навантаження відповідно; $K_{\text{ЕФ}}^K$ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень в даному випадку;

в) побічно за результатами випробувань без середовища з вводом відповідних коефіцієнтів, такий підхід можливий для циклічних випробувань і обмежений при тривалому статичному навантаженні:

$$[\sigma_{N.З}^K] < \sigma_{N.З}^K \{ (K_3^K)_N / K_{\text{ЕФ}}^K \cdot (\eta/n) \} = \sigma_{N.М}^K \{ (K_{\text{М}}^K)_N \cdot (K_{3\text{М}}^K)_N \} / K_{\text{ЕФ}}^K \cdot (\eta/n)$$

де $(K_{\text{М}}^K)_N$, $(K_{3\text{М}}^K)_{\text{КР}}$ – коефіцієнти, які характеризують схильність металу до руйнування в даному середовищі в порівнянні із схильністю до руйнування без середовища; $K_{\text{ЕФ}}^K$ – коефіцієнт, визначений за результатами порівняльних випробувань напружених зразків з концентратором і без концентратора напружень

в дослідному середовищі і по відношенню руйнуючих напружень без середовища і в середовищі, $K_{\text{ЕФ}}^K = \sigma^K / \sigma$.

Величину ефективного коефіцієнта концентрації напруження при корозії $K_{\text{ЕФ}}^K$ можна також записати відповідно з відомим вираженням: $K_{\text{ЕФ}}^K = 1 + \beta(K_t - 1)$, як $K_{\text{ЕФ}}^K = 1 + \beta^K(K_t - 1)$ де β, β^K – чутливість до концентратора без середовища і з середовищем; K_t – теоретичний коефіцієнт концентрації, визначений розрахунковим шляхом по відомим методикам, номограмам, таблицям.

Визначення допустимих напружень побічним шляхом в теперішній час забруднено, так як статистичних даних по величинах коефіцієнтів для конкретних поєднань метал-середовище, які входять в розрахункові залежності, надзвичайно обмежені, а тому важливою задачею, наряду з уточненням методів розрахунку, є постановка досліджень з ціллю накопичення цих даних.

Приблизні значення коефіцієнтів для деяких сполучень метал-середовище визначені в роботі.

Важливе питання: яку теорію міцності використовувати при визначенні розрахункового спротиву. Як відомо, при розрахунках використовуються ряд теорій чи критеріїв руйнування – критерій найбільших нормальних напружень; критерій найбільших дотичних напружень; критерій найбільшої інтенсивності дотичних напружень (енергетична теорія); критерій Мора і др.

Наряду з розглянутим підходом з урахуванням переваг і обмежень, розглянутих раніше для прогнозування працездатності зварних конструкцій, з початковими не проварами і іншими дефектами, типу тріщин доцільно використання розрахунків за методами механіки руйнування. Для цього повинно бути відомі вираження для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень, характеристики матеріалу K_{ISSC} і K_{IC} , а також характеристики росту тріщини в конкретних умовах навантаження. При наявності цих даних, які отримують на основі пробних випробувань, можна вирішити наступні задачі:

а) дати порівняльну оцінку матеріалів по критеріям K_{ISSC} і K_{IC} при інших рівних умовах більшим спротивом руйнуванню володіють матеріали з більшим значенням цих коефіцієнтів;

б) по відомим для даного матеріалу і середовищу величинам K_{ISSC} і K_{IC} і величині діючих в конструкції напружень розраховують допустиму величину тріщино подібних дефектів, виходячи з умови нерозповсюдження тріщини (по K_{IC});

в) по відомим K_{ISSC} і K_{IC} і наявним в конструкції дефектам обмежити допустимі діючі напруження;

г) розрахувати безаварійний термін служби виробів в конкретних умовах навантаження для даної пари метал-середовище по відомому критичному сполученню напруженості, величині дефекту і характеристикі швидкості;

Граничні (порогові) коефіцієнти інтенсивності напруження для деяких пар метал-середовище наведені в роботі [6].

Критична величина навантаження $\sigma_{\text{кр}}$ при заданій величині дефекту ℓ визначається з вираження $\sigma_{\text{кр}} = K_{\text{ISSC}} / (\ell \cdot M)^{1/2}$; $\sigma_{\text{кр}}^P = K_{\text{IC}} / (\ell \cdot M)^{1/2}$.

Критичні величини тріщино подібних дефектів, при яких починають розвиватися корозійні тріщини $\ell_{\text{кр}}^B$ чи наступає руйнування $\ell_{\text{кр}}^P$ при заданому навантаженні σ визначаються з нерівностей:

$$\ell_{\text{кр}} = K_{\text{ISSC}}^2 / \sigma^2 \cdot M; \quad \ell_{\text{кр}}^P = K_{\text{IC}}^2 / \sigma^2 \cdot M.$$

Значення функцій M , які залежать від геометричної форми тіла, розміщення тріщини і виду напруженого стану, наведені в роботі.

Приклад розрахунку несучої здатності оболонкової конструкції (на прикладі декомпозера) – див. рис.1.



Рис. 1. Загальний вид декомпозерів при їх зведенні

Як показано в попередньому матеріалі, розрахунок конструкцій при небезпеці корозійного розтріскування слід проводити по допустимому несучому навантаженні із розрахунку на міцність по величині критичних напружень, які спричиняють виникнення і розвиток корозійної тріщини по гранично допустимій глибині корозійної тріщини чи дефекту типу тріщини. Звичайний розрахунок по несучому навантаженню конструкцій із пластичних матеріалів, в тому числі із низьковуглецевих сталей, ведеться без урахування остаточних зварних напружень по допустимим напруженням. З урахуванням впливу зварки і середовища:

$$[\sigma_3^K]_P < [\sigma_M]_P \cdot (K_{3M})_P \cdot (K_3^K)_P$$

Допустимі напруження $[\sigma_M]_P$ визначаємо із умови появи текучості по нормам прийнятим в будівельній промисловості

$$[\sigma_M]_P = 0.9 \sigma_T m/n.$$

Приймаємо $\sigma_T = 240 \text{ Нмм}^2 = 240 \text{ МПа}$ $n=1.1$ (для оболонок які знаходяться під гідрравлічному тиску) $m = 0.7$ (ближче до нижньої границі враховуючи наявність агресивного середовища) Тоді $[\sigma_M]_P = 0.9 \cdot 24 \cdot 0.7/1.1 = 14 \text{ кгс/мм}^2 = 140 \text{ МПа}$.

Значення коефіцієнтів $(K_{3M})_P$ і $(K_3^K)_P$ визначаються конструктивними формами з'єднань і закладено в проєкті технологією виготовлення конкретних конструкцій

Враховуючи що руйнування проходять переважно по монтажних швах приймаємо $(K_{3M})_P = 0.85$; $(K_3^K)_P = 1.0$, так як суттєвої зміни механічних властивостей зразків після витримки в агресивному середовищі не виявлено Таким чином:

$$[\sigma_3^K]_P = 0.85 [\sigma_M]_P = 0.85 \cdot 14 = 120 \text{ МПа}$$

Таблиця 1

Виконавча товщина стінок апарату - декомпозер

Рівень технологічного розчину h , м	Тиск розчину P , Н/мм ²	$PD/\{2 \cdot [K_3^K]_P\}$, мм	C_3^K мм	Виконавча товщина стінки декомпозера δ , мм
5	0.075	2.8	3	8
10	0.15	5.7	3	10
15	0.225	8.45	3	12
20	0.3	11.3	3	16

Прибавка на корозію встановлена на основі пробних випробувань. Швидкість корозії сталі за результатами випробувань в діючих апаратах на протязі 2000 год склала 0.1 мм/рік (4-й бал по ДБСТ18819-98) так як $(K_{3M}^K)_h \sim 1$, тоді з розрахунку 30-річної експлуатації апарату $C_C = 30 \cdot 0.1 = 3$ мм Додаткову прибавку c_1 враховуючи наявність підрізів і не проварів в монтажних швах приймаємо в межах 1-2 мм Товщина стінки пояса на відмітці $h=10$ м буде рівна наприклад:

$$\begin{aligned} \delta_{10} &= PD/\{2 \cdot [K_3^K]_P\} + C_C^K + c_1 = \\ &= (0.015 \cdot 9000)/(2 \cdot 12 - 0.015) + 3 + C_1 = 5.7 + 3 + c_1 = 10 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Не дивлячись на правильність розрахунку на міцність по допустимим напруженням має місце корозійне розтріскування апаратів тому необхідно додатково проводити розрахунок їх несучої здатності із умови запобігання розтріскуванню по допустимій величині граничних (порогових) напружень:

$$[\sigma_{ПОР}^K] < \sigma^K \cdot \eta/n.$$

З урахуванням виробничого досвіду і численних експериментальних випробувань в лужних розчинах $\sigma_{ПОР,3}^K \sim \sigma_T$, $\eta \sim 1$, і приймаючи запас $n=1.4$, маємо

$$[\sigma_{ПОР,3}^K] < 241/1.4 = 180 \text{ Н/мм}^2 = 180 \text{ МПа.}$$

В розглянутому випадку $[\sigma_3^K]_P < [\sigma_{ПОР,3}^K]$ тому міцнісний розрахунок по $[\sigma_3^K]_P$ буде основним але він повинен поєднуватися з певною допустимою величиною остаточних напружень:

$$[\sigma_{ОСТ}] < [\sigma_{ПОР,3}^K] - [\sigma_3^K]_P = 180 - 120 = 60 \text{ МПа}$$

Таким чином для запобігання корозійного розтріскування при заданому рівні навантаження необхідне зняття остаточних напружень до величини $\sigma_{ОСТ} < 0.25 \cdot \sigma_T$.

При експлуатації декомпозерів нерідко спостерігаються течі які пов'язані з появою наскрізних корозійних пор і тріщин Оцінимо критичну величину корозійної тріщини ℓ_{KP}^P по критерію K_{1C} коли виникає небезпека механічного лавинного руйнування.

Приймаючи схему пластини безкінечних розмірів з тріщиною на безкінечності напруженнями σ , маємо $\ell_{KP}^P = K_{1C}^2/\sigma^2 \pi$. Коли врахувати напруження тільки від

зовнішнього навантаження по $[\sigma_3^K]_P$, то $\ell_{KP}^P = 96^2/12^2 \pi = 21\text{мм}$ ($K_{IC}=96\text{ кгс/мм}^{3/2}$). Коли враховувати сумарні напруження, остаточні і від навантаження, приймаючи $\sigma = 40\text{кгс/мм}^2$ (з урахуванням ефектів релаксації остаточних напружень і зміцнювання матеріалу), то отримуємо: $\ell_{KP}^P = 96^2/40^2 \cdot \pi = 1.8\text{мм}$.

Як правило, фактично виявлені тріщини, при наявності яких апарати ще зберігають стійкість, перевищують розрахункові. Мабуть, це пов'язано з появою, як правило, не одиничних тріщин, а серії тріщин, що приводить до деконцентрації напружень і збільшенню критичних розмірів тріщин. Розрахунки з використанням механіки руйнування при наявності серії тріщин вимагають як наукового, так і експериментального обґрунтування. Однак, з наведеного прикладного розрахунку слідує, що остаточні напруження можуть різко знижати критичну величину корозійної тріщини.

Висновки. 1. Встановлено, що розрахунок оболонкових конструкцій при небезпеці корозійного розтріскування слід проводити по допустимому несучому навантаженні із розрахунку на міцність по величині критичних напружень, які спричиняють виникнення і розвиток корозійної тріщини по гранично допустимій глибині корозійної тріщини чи дефекту типу тріщини. Звичайний розрахунок по несучому навантаженню конструкцій із пластичних матеріалів, в тому числі із низьковуглецевих сталей, ведеться без урахування остаточних зварних напружень по допустимим напруженням.

2. Як правило, фактично виявлені тріщини, при наявності яких апарати ще зберігають стійкість, перевищують розрахункові. Мабуть, це пов'язано з появою, як правило, не одиничних тріщин, а серії тріщин, що приводить до де концентрації напружень і збільшенню критичних розмірів тріщин. Розрахунки з використанням механіки руйнування при наявності серії тріщин вимагають як наукового, так і експериментального обґрунтування. Однак, з наведеного прикладного розрахунку слідує, що остаточні напруження можуть різко знижати критичну величину корозійної тріщини.

3. Наряду з розглянутим підходом з урахуванням переваг і обмежень, розглянутих раніше для прогнозування працездатності зварних конструкцій, з початковими не проварами і іншими дефектами, типу тріщин доцільно використання розрахунків за методами механіки руйнування. Для цього повинно бути відомі вираження для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень, характеристики матеріалу $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} , а також характеристики росту тріщини в конкретних умовах навантаження. При наявності цих даних, які отримують на основі пробних випробувань, можна вирішити наступні задачі:

а) дати порівняльну оцінку матеріалів по критеріям $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} при інших рівних умовах більшим спротивом руйнуванню володіють матеріали з більшим значенням цих коефіцієнтів;

б) по відомим для даного матеріалу і середовищу величинам $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} і величині діючих в конструкції напружень розраховують допустиму величину тріщино подібних дефектів, виходячи з умови нерозповсюдження тріщини (по K_{IC});

в) по відомим $K_{I\text{SSC}}$ і K_{IC} і наявним в конструкції дефектам обмежити допустимі діючі напруження;

г) розрахувати безаварійний термін служби виробів в конкретних умовах навантаження для даної пари метал-середовище по відомому критичному сполученню напруженості, величині дефекту і характеристики швидкості;

4. Для подальшого уточнення вищевикладених коефіцієнтів в розрахункових формулах потрібно було провести додаткові експериментальні дослідження в умовах, наближених до промислових навантажень і середовищ, в яких експлуатуються оболонкові конструкції, а також щоб розміри зразків відповідали, наприклад, товщині стінок оболонок чи товщині стінок трубопроводів. Для цього експериментальні дослідження проводили по методі, рекомендованій іноземними Інститутами, зокрема Баттеля (США), Британською газовою корпорацією (БГА – Великобританія), сталевим концерном Маннесман (ФРН). У цих компаніях, концернах, Інститутах у всі рівняння, не дивлячись на їх різну структуру, входять: діаметр D і товщина стінки оболонки (чи труб) h , колові напруження σ_k в стінках труб чи оболонок, які визначаються по відомій котельній формулі, а тому у наших дослідженнях використовували повно товщинні зразки типу DWTТ, які в значній мірі дозволяють, тим самим, підвищити об'єктивність оцінки спротиву сталі руйнуванню оболонкових конструкцій та трубопроводів.

Список літератури:

1. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1988. 488 с.
2. Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубої сталі в сірководневому середовищі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2000. №3. С. 93-97.
3. Чапля О., Радкевич О., П'ясецький О., Спектор Я. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами. *Машинознавство*, 1999. №8. С. 52-56.
4. Василенко И. И., Мелехов Р. К. Коррозионное растрескивание сталей. Киев: Наукова думка, 1974. 265 с.
5. Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I. Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 1998. №12(12). Pp. 988-991.
6. Makarenko V.D., Shatilo S. P. Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 1999. №13(12). Pp. 991-995.
7. Самойленко М.І. Функціональна надійність трубопроводів них транспортних систем. Харків: ХНАМІІ. 2009. 184с.
8. Berdnyk O.Yu., Lastivka O.V., Maystrenko A.A., Amelina N.O.. Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 907, Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020) 21-22 May 2020, Kharkiv, Ukraine. 012036. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>.

References:

1. Panasyuk, V.V., Andreykiv, A.E., & Parton, V.Z. (1988). Fracture mechanics and strength of materials: A reference guide. Kyiv: Naukova Dumka.
2. Radkevich, O.I., P'yasetsky, O.S., & Vasilenko, I.I. (2000). Corrosion-mechanical corrosion of pipe steel in a hot-water medium. *Physicochemical mechanics of materials*, 3, 93-97.
3. Chaplya, O., Radkevich, O., Pyasetsky, O., & Spektor, Y. (1999). Rival analysis of corrosion-mechanical properties of 20YuCh laminated steel with foreign analogues. *Mashinoznavstvo*, 8, 52-56.

4. Vasilenko, I.I., & Melekhov, R.K. (1974). *Corrosion cracking of steels*. Kyiv: Naukova Dumka.
5. Makarenko, V.D., Shatilo, S.P., Astafev, V.I. (1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 12(12), 988-991. <https://doi.org/10.1080/09507119809448548>
6. Makarenko, V.D., Shatilo, S.P. (1999) Increasing desulphurization of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 13(12), 991-995. <https://doi.org/10.1080/09507119909452086>
7. Samoylenko, M.I. (2009). Funktional reliability of pipelines of transport systems. Harkiv: HNAMP.
8. Berdnyk, O.Yu., Lastivka, O.V., Maystrenko, A.A., Amelina, N.O. (2020). Processes of structure formation and neoformation of basalt fiber in an alkaline environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 907, 012036. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>.

Valeriy MAKARENKO, Igor JELEZNYAK

Calculation of welded shell structures under dynamic loading

Today, a topical issue is the calculation of shell structures at risk of corrosion cracking, which should be carried out according to the permissible bearing load based on the strength of the critical stresses that cause the appearance and development of a corrosion crack at the maximum permissible depth of a corrosion crack or crack type defect. The usual calculation of the bearing load of structures made of ductile materials, including low-carbon steels, is carried out without taking into account the final weld stresses according to the permissible stresses. As a rule, the actual cracks detected, in the presence of which the devices still remain stable, exceed the calculated ones. This is due to the appearance, as a rule, not of single cracks, but of a series of cracks, which leads to de-concentration of stresses and an increase in critical crack sizes. Calculations using fracture mechanics in the presence of a series of cracks require both scientific and experimental substantiation. However, from the above example calculation, it follows that residual stresses can dramatically reduce the critical size of a corrosion crack.

Along with the considered approach, taking into account the advantages and limitations discussed earlier for predicting the serviceability of welded structures with initial non-failures and other defects, it is advisable to use calculations based on the methods of fracture mechanics. For this purpose, the expressions for determining the stress intensity factor, material characteristics K_{1SSC} and K_{1C} , as well as the characteristics of crack growth under specific loading conditions should be known. With these data obtained from pilot tests, the following tasks can be solved a) to give a comparative assessment of materials according to the criteria of K_{1SSC} and K_{1C} , *ceteris paribus*, materials with a higher value of these coefficients have greater resistance to fracture; b) based on the values of K_{1SSC} and K_{1C} known for a given material and environment and the value of stresses acting in the structure, calculate the permissible size of crack-like defects, based on the condition of non-propagation of the crack (according to K_{1C}) c) limit the permissible acting stresses based on the known K_{1SSC} and K_{1C} and defects in the structure; d) calculate the failure-free service life of products under specific loading conditions for a given metal-medium pair based on the known critical combination of stresses, defect size and velocity characteristic.

Key words: pipe, deformation, crack, plastic zone, landfill.