

ПІДВИЩЕННЯ СПРОТИВУ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОМУ РУЙНУВАННЮ ЗВАРНИХ ОБОЛОНКОВИХ ЄМНОСТЕЙ ВОДОНАПІРНИХ БАШТ

Валерій Макаренко¹, Сергій Білик², Тетяна Хомуцька³,
Тетяна Аргатенко⁴, Юлія Макаренко⁵, Олена Панченко⁶

^{1,2,3,4,6} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037

⁵Медичний університет Манітобо, м.Вінніпег, Канада

¹докт. техн. наук, професор, green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9178-9657

²докт. техн. наук, професор, bilyk.si@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-8783-5892

³докт. техн. наук, khomutetska.tp@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-0153-4920

⁴ канд. техн. наук, argatenko.tv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-2516-2906

⁵ бакалавр, green555tree@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1252-4231

⁶ panchenko@nikti.org.ua, orcid.org/0000-0003-3680-7036

DOI: 10.32347/2524-0021.2022.39.33-43

Анотація. В роботі розглянуто стандартні методи визначення корозійно-механічних характеристик працездатності труб і їх зварних з'єднань, сталевих оболонкових конструкцій з постачання води споживачам. Встановлено, що різкі коливання значень мікротвердості в зоні термічного впливу зварного з'єднання перевищують базові значення як в середній частині зварювального шва, так і основного металу труби. Отримані результати можуть бути використані для перевірки службових характеристик корпусних вуглецевих сталей, призначених для будівництва водонапірних башт тривалого терміну експлуатації в корозійно-агресивних середовищах. Під дією градієнту температури на зовнішніх поверхнях стінок водонапірного баку виникають розтягувальні напруження, а на внутрішніх поверхнях – стискувальні, що виявляється сприятливим чинником, який зменшує небезпеку корозійного руйнування. Температурні напруження, які виникають у випадку неоднорідності температури по контуру циліндричного баку, несприятливі. Напруження від вагового навантаження малі і не здійснюють помітного впливу на руйнування сталевих баку, оскільки є стискувальними. Величину технологічних остаточних напружень визначали експериментально механічним тензометруванням згідно класичної методики, а також за допомогою електричних тензодатчиків і ультразвуковим методом по методиці Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ. Встановлено експериментальним шляхом, що найбільш небезпечні остаточні зварювальні напруження в монтажних швах, величина яких для поздовжнього компонента напружень близька чи перевищує межу текучості $\sigma_{xy} \geq \sigma_T$, а для поперечного – близька до межі текучості $\sigma_{xy} \leq \sigma_T$, в той час як на пластинах із сталі ВСт3 цієї ж товщини $\sigma_{xy} \approx 0,3\sigma_T$. Ймовірно, зварювання при монтажі в умовах жорсткого стиснення металу спричиняє підвищений рівень остаточних напружень. Величина і знак залишкових напружень $\sigma_{зал}$ суттєво залежить від методу монтажу. Навіть при блочному монтажу, коли водонапірна башта монтується з декількох попередньо відпалених блоків, з'єднанням між собою монтажними кільцевими швами на окремих ділянках основного металу поблизу цих швів при підгонці виникають значні напруження (до 17,6 кгс/мм²), на окремих ділянках – до 6 кгс/мм². При по листовому складанні напруження можуть досягти рівня близького до межі текучості.

Ключові слова: сталь, міцність, тріщиностійкість, водонапірні башти

© Макаренко В., Білик С., Макаренко Ю.,
Хомуцька Т., Аргатенко Т., Панченко О., 2022

ВСТУП

Трубопровідний транспорт, призначений для доставки холодної води промисловим і побутовим споживачам, є важливою галуззю народного господарства [1-4], бурхливий розвиток якої вимагав високонадійних труб і відповідного розвитку металургійної промисловості як в кількісному, так і в якісному відношенні. Слід відзначити, що вимоги, які стояли перед металургійною промисловістю сприяли суттєвому удосконаленню технології випуску сталі, методів її легування, очистки від шкідливих домішок, розробці нового процесу прокату. Застосування контрольованої прокату в поєднанні з технологією прискореного охолодження забезпечило широкі можливості управління структурно-фазовим станом і корозійно-механічними властивостями сталей [5,6].

На рис.1-5 представлені приклади корозійно-механічних ушкоджень і руйнувань окремих фрагментів сталевих конструкцій водонапірних башт тривалого терміну експлуатації, а також мікроструктура і фрактограми руйнувань зварювальних з'єднань (рис.6 і 7).



Рис. 1. Корозія опорної сталеві конструкції водонапірної башти

Fig. 1. Corrosion of the supporting steel structure of the water tower



Рис. 2. Загальний вид корозійного ураження поверхні пішохідного проходу по мостовій конструкції на ділянці зруйнованої ізоляції

Fig. 2. General view of corrosion damage to the surface of the pedestrian passage on the bridge structure in the area of destroyed insulation



Рис. 3. Корозія металоконструкцій водонапірних башт (термін експлуатації 30-40 років)

Fig. 3. Corrosion of metal structures of water towers (service life 30-40 years)



Рис. 4. Магістральна мікротріщина в тілі корпусної конструкції водонапірної башти. Корпусна сталь марки ВСт3 (термін експлуатації 40 років)

Fig. 4. The main microcrack in the body of the hull structure of the water tower. Housing steel grade VSt3 (service life 40 years)

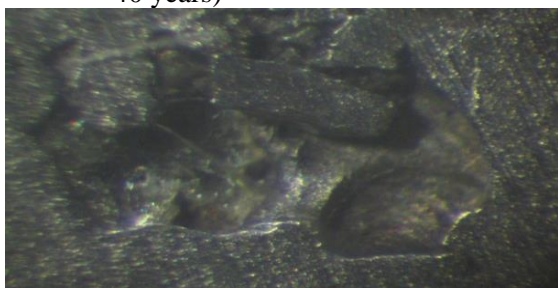


Рис. 5. Виразкове ураження внутрішньої стінки сталевій водонапірної башти

Fig. 5. Ulcerative lesion of the inner wall of the steel water tower

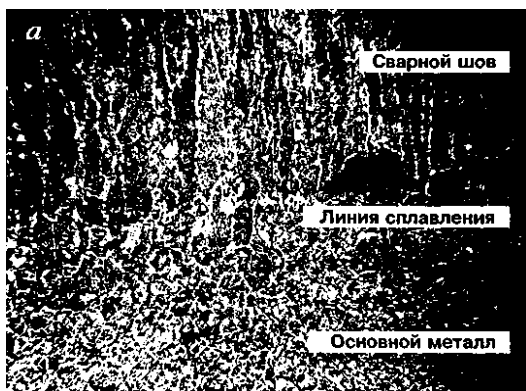
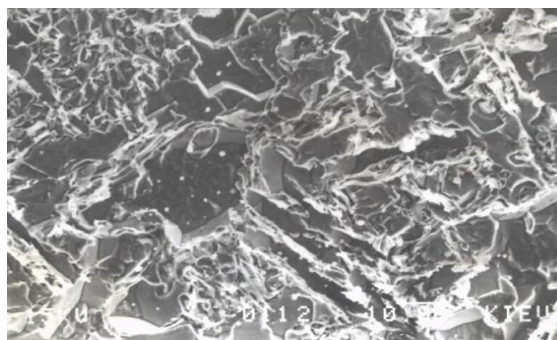
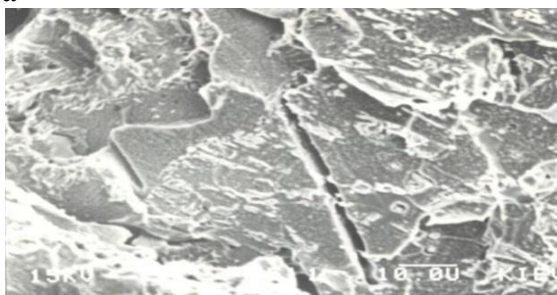


Рис. 6. Мікроструктура зварних з'єднань сталевих корпусних конструкцій водонапірних башт із сталі ВСт3

Fig. 6. Microstructure of welded joints of steel hull structures of water-pressure towers from VSt3 steel



a



b

Рис. 7. Мікроструктура фасеток руйнувань сталевих оболонкових конструкцій водонапірних башт (сталь ВСт3; x2000) з різними термінами експлуатації: **a** – в'язке руйнування на зернах фериту; **b** – крихке руйнування на зернах перліту. Терміни експлуатації: **a** – 10...15 років, **b** – 40...50 років

Fig. 7. Microstructure of facets of destruction of steel shell constructions of water towers (steel VSt3; x2000) with different terms of operation: **a** – viscous fracture on ferrite grains; **b** – brittle fracture on perlite grains. Service life: **a** – 10...15 years, **b** – 40...50 years

Відомо [7,8], що працездатність труб і їх зварювальних з'єднань характеризується міцністю та спротивом зародженню та розповсюдженню руйнувань при діючих навантаженнях і температурі згідно [ДСТУ ГОСТ 617:2007], прийнята методика розрахунку оболонкових сталевих конструкцій на міцність по граничному стану, досягненню металом таких конструкцій межі міцності σ_B . Товщина стінки сталевих оболонкових споруд визначається за формулою [9]:

$$h = \frac{n \cdot p \cdot D}{2 \cdot (\sigma_D + n \cdot p)}, \quad (1)$$

де n – коефіцієнт перевантаження робочого тиску в сталевій конструкції; p –

робочий тиск в конструкції; D – зовнішній діаметр циліндричної ємності; σ_D – розрахунковий спротив:

$$\sigma_D = (m \cdot R_1^H) \cdot (K_1 \cdot K_H), \quad (2)$$

де m – коефіцієнт умови роботи конструкції водокачки; R_1^H – нормативний спротив розтягу (стиску) металу оболонок і зварювальних з'єднань, який приймають рівним мінімальному значенню тимчасового спротиву по технічним нормам на оболонковій конструкції водонапірних башт (σ_B); K_1 – коефіцієнт безпеки по матеріалу, значення якого залежить від типу сталі, виду термообробки, технології зварювання і рівня контролю; K_H – коефіцієнт надійності.

В розрахунковій формулі враховані характер робочих навантажень і зовнішніх впливів (коефіцієнт n) технологія зварювання і рівень контролю якості зварювальних швів (коефіцієнт K_1). Одночасно в формулу закладені вимоги статичної рівномірності зварювального з'єднання з основним металом:

$$R_1^H = \sigma_B = \sigma_{ЗВ}. \quad (3)$$

де $\sigma_{ЗВ}$ – тимчасовий спротив розриву зварювальних з'єднань [10,11].

Міцність зварювального з'єднання контролюється випробуванням стандартних поперечних зразків типу XII або XIII по ДСТУ EN 1708-2:2019 на статичний розтяг. Результати випробувань характеризують агрегатну міцність зварювального з'єднання, а не окремої слабкої зони. Тимчасовий спротив зварювального з'єднання не повинен бути нижче, чим для основного металу $\sigma_{ЗВ} \geq \sigma_B$.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянемо шляхи підвищення стійкості оболонкових ємностей як характерних конструкцій, що експлуатуються під внутрішнім тиском технологічного середовища.

Водонапірна башта являє собою циліндричну ємність із сферичною нижньою частиною об'ємом більше і стінками

змінної товщини (4...16 мм) діаметром 5 м і висотою до 24 м із сталі ВСт3 (рис.8).



Рис. 8. Водонапірна сталева башта: ємність запасу води $V = 50 \text{ м}^3$; висота опорної труби $H = 24 \text{ м}$; висота заливної ємності $h = 9 \text{ м}$; діаметр заливного баку $D = 4 \text{ м}$

Fig. 8. Water pressure steel tower: water supply capacity $V = 50 \text{ м}^3$; height of the support pipe $H = 24 \text{ м}$; the height of the filling tank $h = 9 \text{ м}$; diameter of the filling tank $D = 4 \text{ м}$

В результаті контакту корпусу та ємності башти відбувається корозійне ушкодження стінок, що в результаті тривалої експлуатації призводить до окремих поривів і суттєвих аварій. Причому технічні огляди таких конструкцій свідчать, що переважна більшість руйнувань (95,5%) відбувається в кільцевих зварювальних швах (68,5%). З використанням результатів технічної діагностики було встановлено, що розподілення терміну безвідмовної роботи близько до нормального закону. Математичне очікування безвідмовної роботи (необхідний час до першого капітального ремонту) склав всього 3,5...5 років при середньому квадратичному відхиленні 24,5 місяців. Після ремонту час до наступного корозійно-механічного руйнування скоротився і склав 2...3 роки після першого і другого ремонту.

Напружений стан I роду зварних з'єднань сталевих ємностей водонапірних башт визначається експлуатаційними і технологічними напруженнями і відповідною потенціальною енергією (табл. 1):

Таблиця 1. Напружений стан в конструкції при блоковому монтажу
Table 1. Stress in the structure during block installation

Навантаження	Кругові напруження, кгс/мм ²	Осьові напруження, кгс/мм ²	Питома потенційна енергія, кгс·мм/мм ³	Ступінь концентрації навантаження
1.Експлуатаційні напруження: $\sigma_{\text{навант.}} = \sigma_{\text{води}} + \sigma_{\text{ван}}$ $\sigma_{\text{темп.}}$ (при $\Delta T = 70^{\circ}\text{C}$)	+12,8 ±3,5	+3,25 ±3,5	$2,15 \cdot 10^{-3}$ $1,2 \cdot 10^{-3}$	Рівномірна -//-
2.Технологічні напруження: Зварювальні $\sigma_{\text{звар}}$: кільцеві шви поздовжні шви Складальні $\sigma_{\text{склад}}$ місцеві	$\geq \sigma_T$ +31,5 до $+\sigma_T$ до $+\sigma_T$	до σ_T +25,6 до $+\sigma_T$ до $+\sigma_T$	$(1,8 \dots 2,5) \cdot 10^{-2}$ $(1,5 \dots 2,8) \cdot 10^{-2}$ $(1,8 \dots 2,5) \cdot 10^{-2}$	Зосереджена так же так же

$$\sigma = \sigma_{\text{експл}} + \sigma_{\text{технол}}; \quad (4)$$

$$W = W_{\text{експл}} + W_{\text{технол}}. \quad (5)$$

Експлуатаційні напруження складаються із зовнішніх навантажень $\sigma_{\text{навант.}}$, до яких входять тиск води $\sigma_{\text{води}}$, вагові навантаження (вантаж від покриття сталевий конструкції, власної ваги водонапірної башти) і температури $\sigma_{\text{темп.}}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{експл}} &= \sigma_{\text{навант.}} + \sigma_{\text{темп.}} = \\ &= \sigma_{\text{води}} + \sigma_{\text{ван}} + \sigma_{\text{темп.}} \end{aligned} \quad (6)$$

Технологічні напруження складаються із остаточних зварювальних напружень $\sigma_{\text{звар}}$ і складально-монтажних напружень $\sigma_{\text{склад}}$, величина і розподілення яких залежить від технології монтажу

$$\sigma_{\text{монтаж}} = \sigma_{\text{звар.}} + \sigma_{\text{монтаж}}. \quad (7)$$

В свою чергу відповідно до класифікації напружень в корпусі водонапірної башти потенціальна енергія пружних деформацій визначається як

$$W_{\text{експл}} = W_{\text{навант}} + W_{\text{технол}}; \quad (8)$$

$$W_{\text{технол}} = W_{\text{зв}} + W_{\text{монтаж}}. \quad (9)$$

Визначаючими складовими експлуатаційних напружень є колові σ_{B1} і поздовжні (осьові) σ_{B2} напруження від ваги води (рис.1):

$$\sigma_{B1} = \frac{P \cdot R}{\delta}; \quad \sigma_{B2} = \frac{P \cdot R}{2\delta}; \quad P = \gamma \cdot h, \quad (10)$$

де γ – маса одиниці об’єму; h – висота стовпа води; $\gamma = 1,0 \text{ т/м}^3$.

Питома потенційна енергія деформованого металу спричинена тиском води визначається за формулами викладеними в роботах [12,13]. Вирішальний вплив на процес аварійного руйнування здійснює загальний запас потенційної енергії самої води. Потенційна енергія шару води Δh розміщеного на певній висоті h визначається вираженням

$$W_{\Delta h} = \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \Delta h \cdot h. \quad (11)$$

Для всього об’єму при $R = 3,0 \text{ м}$; $h = 20 \text{ м}$; $\gamma = 1,0 \text{ т/м}^3$:

$$\begin{aligned} W_{\text{води}} &= \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \int_0^h h dh = \\ &= \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{h^2}{2} = \frac{1,0 \cdot \pi \cdot 3,0^2 \cdot 20^2}{2} = 12717 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Під дією градієнту температури на зовнішніх поверхнях стінок башти виникають розтягувальні напруження, а на внутрішніх поверхнях стискувальні, що виступає сприятливим чинником, який зменшує небезпеку корозійного руйнування. Температурні напруження, що виникають у випадку неоднорідності температури по контуру циліндричного бака, є несприятливими. Напруження від вагового навантаження малі і не здійснюють

вплив на руйнування сталевих баків, оскільки є стискувальними.

Величину технологічних остаточних напружень визначали на водонапірній башті експериментальним шляхом – механічним тензометруванням згідно класичної методики, а також за допомогою електричних тензодатчиків і ультразвуковим за методикою Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ (див. табл. 1).

Експериментальним шляхом встановлено, що найбільш небезпечні остаточні зварювальні напруження в монтажних швах, величина яких для поздовжнього компонента напружень близька чи перевищує межу текучості $\sigma_{xy} \geq \sigma_T$, а для поперечного – близька до межі текучості $\sigma_{xy} \leq \sigma_T$, в той час як на пластинах із сталі ВСтЗ цієї ж товщини $\sigma_{xy} \approx 0,3\sigma_T$. Ймовірно, зварювання при монтажі в умовах жорсткого стиснення метал спричиняє і підвищений рівень остаточних напружень.

Величина і знак остаточних напружень $\sigma_{ост}$ суттєво залежить від методу монтажу. Навіть при блочному монтажу коли водокачка монтується з декількох попередньо відпалених блоків з'єднання між собою монтажними кільцевими швами на окремих ділянках основного металу поблизу цих швів при підгонці виникають значні напруження (до 17,6 кгс/мм²), на окремих ділянках – до 6 кгс/мм². При листовому складанні напруження можуть досягти рівня близького до межі текучості. Таким чином, коли не використовують методи зняття остаточних напружень, то їх величина досягає, а в деяких випадках й перевищує граничні напруження, близьких для агресивних середовищ до межі текучості:

$$\sigma_{технол} \geq \sigma_{гранич} \approx \sigma_T; \quad (12)$$

$$\sigma_{експл} \leq 0,5 \cdot \sigma_T < \sigma_{гранич}. \quad (13)$$

Загальний запас технологічної потенціальної енергії $W_{технол}$ значно менше

експлуатаційної $W_{експл}$, оскільки зосереджена в обмеженому об'ємі, однак цей вид енергії характеризується високою концентрацією $W_{технол}$ в зоні максимальних остаточних напружень [14,15]. Таким чином, $W_{технол}^i \gg W_{експл}^i$ при $W_{технол} < W_{експл}$.

Означена обставина визначає різний вплив технологічної і експлуатаційної частки потенціальної енергії на корозійно-механічне руйнування сталевих конструкцій водонапірних башт. Ймовірно $W_{технол}^i$, в першу чергу, $W_{зв}$ відповідальна за початковий етап розвитку тріщин. Витік цієї енергії відбувається внаслідок утворення серій тріщин в зварювальних з'єднаннях конструкцій башти, $\sigma_{експл}$ відповідальна за розвиток довгих тріщин, які приводять до аварійного руйнування.

В кільцевих швах виникають переважно поперечні тріщини. Їх траєкторії визначаються круговими напруженнями $(\sigma_{xy} + \sigma_1) > \sigma_T$. В цьому випадку $(\sigma_{xy} + \sigma_1) > (\sigma_{yy} + \sigma_2)$ так як $\sigma_1 > \sigma_2$ $\sigma_{xy} > \sigma_{yy}$, де σ_{xy} і σ_{yy} – відповідно, поздовжні і поперечні (відносно шва) остаточні зварювальні напруження σ_1 і σ_2 – відповідно, кругові і осьові напруження від зовнішнього навантаження. В поздовжніх зварювальних з'єднаннях тріщини виникають переважно в навколошовній зоні паралельно шву, а також в зонах концентрації напружень, не проварах, підрізах, місцях різкого переходу від шва до основного металу (рис.9).

В цьому випадку сумарні напруження $(\sigma_{yy} + 1) \approx (\sigma_{xy} + 2)$, тому фактором, що визначає траєкторію тріщини, в даному випадку є характер розташування зон, які найбільше схильні до руйнування, тобто зони з високою початковою концентрацією напружень, зон між основним металом, які не піддаються структурним перетворенням, і зоною термічного впливу, яка піддається термодинамічним циклам зварювання.

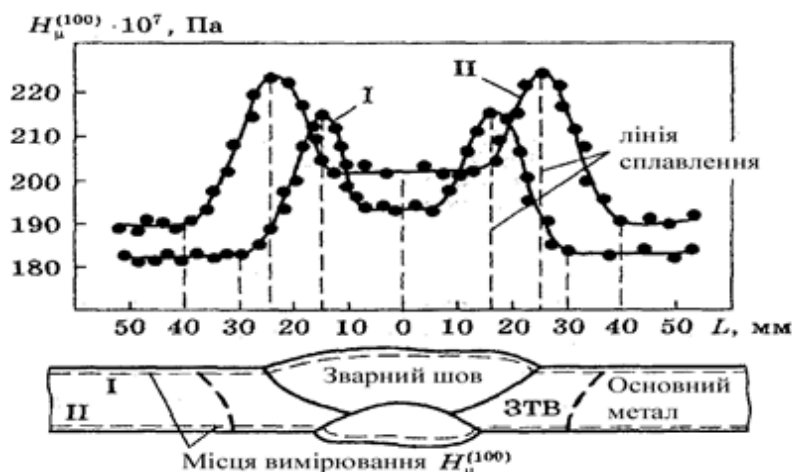


Рис.9. Характер розподілу мікротвердості в зварному з'єднанні сталей підземних водоводів діаметром 720 мм

Fig.9. The nature of the distribution of microhardness in the welded joint of steels of underground water pipes with a diameter of 720 mm

Визначені стандартними методами механічні характеристики труб і їх зварних з'єднань є середніми. Випробування на статичний розтяг і статичний згин зразків із знятими підсиленнями не дозволяють встановити ступінь впливу природніх концентраторів напружень (конфігурації швів і труби радіусу сполуки металу шва з основним металом наявності подрізів) на міцність і пластичність. Тому характеристики, які визначають стандартними методами випробувань, використовують, як правило, для порівняльної оцінки властивостей металу шва в різних зонах зварного з'єднання при виборі раціональної технології зварювання, а також як норми для встановлення відповідності труб технічним умовам [16,17].

Приблизний розрахунок несучої здатності водонапірної башти

Як показано вище, розрахунок конструкцій при небезпечному корозійному руйнуванні слід проводити по допустимому несучому навантаженню із розрахунку на міцність по величині критичних напружень, що 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 з низьковуглецевих

сталей, ведеться без урахування остаточних зварювальних напружень по допустимим напруженням. З урахуванням впливу зварювання і середовища:

$$[\sigma^k_c]_p < [\sigma_M]_p \cdot (k_{cm})_p \cdot (k^k_c)_p. \quad (14)$$

Допустимі напруження $[\sigma_M]_p$ визначимо із умови появи текучості по нормам які прийняті в будівельній промисловості:

$$[\sigma_M]_p = 0,9 \cdot \sigma_T \cdot \frac{m}{n}. \quad (15)$$

Приймаємо $\sigma_T = 24$ кгс/мм²; $n = 1,1$ (для оболонки, які знаходяться під гідравлічним тиском); $m = 0,7$ (ближче до нижньої межі з урахуванням агресивності середовища). Тоді

$$[\sigma_M]_p = 0,9 \cdot 24 \cdot \frac{0,7}{1,1} = 14 \text{ кгс/мм}^2.$$

Значення коефіцієнтів $(k_{cm})_p$ і $(k^k_c)_p$ визначаються конструктивними формами з'єднання і проектною технологією виготовлення. Враховуючи, що руйнування відбувається переважно по монтажним швам, приймаємо $(k_{cm})_p = 0,85$; $(k^k_c)_p = 1$, так як суттєвої зміни механічних властивостей зразків після витримки в середовищі не виявлено. Таким чином

$$[\sigma^k_c]_p = 14 \cdot 0,85 \cdot 1 = 12 \text{ кгс/мм}^2.$$

Експлуатаційну товщину стінок сталевго корпусу водокачки розраховуємо за формулою:

$$\delta = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma^k_c]_p - P} + c^k_c = \frac{0,015 \cdot 9000}{2 \cdot 12 - 0,015} + 3 + c_1 = 10 \text{ мм.}$$

Не зважаючи на правильність розрахунку на міцність по допустимим напруженням має місце корозійне руйнування сталевго корпусу бака, тому необхідно проводити розрахунок по несучій здатності виходячи з умови попередження руйнування по допустимим граничним напруженням:

$$[\sigma^k_{\text{гранич}}] \leq \sigma^k \cdot \frac{\eta}{n}. \quad (16)$$

З урахуванням виробничого досвіду в результаті випробувань в корозійно-

активних середовищах $\sigma^k_{\text{гранич},c} \approx \sigma_T \cdot \eta \approx 1$ і, приймаючи запас $n = 1,4$, маємо: $[\sigma^k_{\text{гранич}}] \leq \frac{24 \cdot 1}{1,4} = 18 \text{ кгс/мм}^2$. В розглянутому випадку $[\sigma^k_c]_p < [\sigma^k_{\text{гранич},c}]$, тому розрахунок міцності по $[\sigma^k_c]_p$ буде основним, але він повинен поєднуватися з певною допустимою величиною остаточних напружень:

$$[\sigma_{\text{ост}}] \leq [\sigma^k_{\text{гранич},c}] - [\sigma^k_c]_p = 18 - 12 = 6 \text{ кгс/мм}^2.$$

Таким чином, для попередження корозійного руйнування при заданому рівні навантаження необхідне зняття остаточних напружень до величини

$$\sigma_{\text{ост}} < 0,25 \cdot \sigma_T.$$

Таблиця 2. Експлуатаційна товщина стінок сталевгої конструкції водонапірної башти

Table 2. Operational thickness of the walls of the steel structure of the water tower

Рівень технологічної води, м	Тиск води P, кгс/мм ²	$\frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma^k_c]_p - P}$, мм	c^k_c , мм	Експлуатаційна товщина стінки, мм
5	0,0075	2,8	3	8
10	0,0115	5,7	-//-	10
15	0,0225	8,45	-//-	12
20	0,03	11,3	-//-	16

Примітка: c^k_c – надбавка на корозію зварювального з'єднання; $[\sigma^k_c]_p$ – допустимі напруження основного і зварювального металу при дії корозії

При експлуатації сталевих корпусів водонапірних башт часто спостерігаються течі, пов'язані з появою наскрізних корозійних тріщин. Оцінимо критичну величину корозійної тріщини $l^P_{\text{кор}}$ за критерієм K_{1C} , коли виникає небезпека механічного напівкрихкого руйнування.

Приймаючи схему пластини без кінцевих розмірів з тріщиною, розтягнутою нескінченним напруженням σ маємо

$$l^P_{\text{кор}} = \frac{K_{1C}^2}{\sigma^2 \cdot \pi}. \quad (17)$$

Якщо враховувати напруження тільки від зовнішнього навантаження по $[\sigma^k_c]_p$, то

$$l^P_{\text{кор}} = \frac{96^2}{12^2 \cdot \pi} = 12 \text{ мм,}$$

($K_{1C} = 96 \text{ кгс/мм}^2$ [7]). Якщо ж враховувати сумарні остаточні напруження і прийняти $\sigma = 40 \text{ кгс/мм}^2$ (за рахунок ефектів релаксації остаточних напружень і зміцнення матеріалу), то отримуємо

$$l^P_{\text{кор}} = \frac{96^2}{40^2 \cdot \pi} = 1,8 \text{ мм.}$$

При допустимому рівні остаточних напружень $\sigma_{\text{ост}} = 0,25 \text{ кгс/мм}^2$

$$l^P_{\text{кор}} = \frac{K_{1C}^2}{\{[\sigma^k_c] + [\sigma_{\text{ост}}]\}^2 \cdot \pi} = \frac{96^2}{18^2 \cdot \pi} = 7 \text{ мм.}$$

Тріщини, що фактично спостерігаються за умови збереження стійкості

конструкції, перевищують розрахункові. Ймовірно це пов'язано з появою не одиноких тріщин, а серії, що приводить до деконцентрації напружень і збільшенню критичних розмірів тріщин. Розрахунки з використанням механіки руйнувань при наявності серії тріщин вимагають як наукового, так і експериментального обґрунтування. Однак, із наведеного прикладного розрахунку видно, що остаточні напруження можуть різко знижувати критичні величини корозійних тріщин.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто стандартні методи визначення нормативних характеристик працездатності корпусних сталей і їх зварних з'єднань водонапірної башти системи водопостачання.
2. Встановлено, що різкі коливання значень мікротвердості в зоні термічного впливу зварного з'єднання перевищують базові значення як в середній частині зварювального шва, так і основного металу труби.
3. Отримані результати можуть бути використані для перевірки службових характеристик корпусних вуглецевих сталей, призначених для будівництва водонапірних башт тривалого терміну експлуатації в корозійно-агресивних середовищах.
4. Проведені порівняльні експериментальні дослідження дозволять конструкторам більш кваліфіковано вибирати корпусні сталі для будівництва водонапірних башт тривалого терміну експлуатації в корозійно-агресивних середовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Макаренко В. Д., Палий Р. В., Прохоров Н. Н.** Критерии оценки эксплуатационных свойств трубных сталей промышленных нефтепроводов // Приобье: Нижневартовск, 2001. 90 с.
2. **Типовой проект 901-5-9/70.** Водонапорные бесшатровые кирпичные башни со стальным баком емкостью 150 м³ высотой до дна бака 18 и 24 м. Альбом №1 // М.: Центральный Институт типовых проектов, 2019.
3. **Типовой проект 901-5 -55-95.** Унифицированные водонапорные стальные башни.

Альбом №2 // М.: Центральный Институт типовых проектов, 2019.

4. **Бедов А. И., Габитов А. И.** Инженерные сооружения башенного типа технологические эстакады. Учебное пособие // М.: Московский гос. строительный университет, 2017. 219 с.
5. **Комягин Л.Ф.** Бесшатровые неотапливаемые водонапорные сооружения // Л.: Ленинградский Институт железнодорожного транспорта имени академика Образцова, 1980. 256 с.
6. **Коррозия:** справочник / под ред. Л. Л. Шрайера; пер. с англ. М.: Металлургия, 1981. 632 с.
7. **ISO 12944-2:2017** Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. URL: <https://www.iso.org/standard/64834.html>
8. **Mezenov V.** Tough call for coating / V.Mezenov, M. Golovnenkova // Bridge: design and engineering, 2009, 55(15). 64 p.
9. **Бабік К. М., Гах Н. Д., Шалінський В. В.** Технічний стан конструкцій та елементів земляної вставки автодорожнього переїзду спорудами Дніпровської ГЕС // Промислове будівництво та інженерні споруди, 2020. 4. С.7-15.
10. **Макаренко В. Д., Максимов С. Ю., Білик С. І. і ін.** Корозійні руйнування каналізаційних систем України // Київ: Науково-видавничий відділ НУБіП України, 2021. 272 с.
11. **Москвин В. М.** Коррозия бетона и железобетона; методы их защиты // М.: Стройиздат, 1980. 538 с.
12. **TM0177-2016-SG**, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments. URL: <https://store.amp.org/tm0177-2016>
13. **Makarenko V. D., Muravjev K. A., Kalyanov A. I.** Special features of manual and welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia.-Welding International, 2006. 20(5). P. 410-413.
14. **Макаренко В. Д., Грачев С. И., Прохоров Н. Н. и др.** Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири. К.: Наукова думка, 1996. 549 с.
15. **Макаренко В. Д., Ковенский И. М., Прохоров Н. Н. и др.** Коррозионная стойкость сварных металлоконструкций нефтегазовых объектов // М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. 500 с.

16. Вайнман А. Б., Мартынов О. И., Смиян О. Д. О хрупких повреждениях трубопроводов подачи воды в парохладители котлов блоков СКД // Сб. матер. III Межд. Конф. "Коррозия-96". Львов, 28-30 мая 1996. 53-55.

17. Анучкин М. П., Горицкий В. Н., Мирошниченко Б. И. Трубы для магистральных трубопроводов // М.: Недра. 1986. 231 с.

REFERENCES

1. Makarenko, V. D., Paliy, R. V., & Prokhorov, N. N. (2001). *Kriterii otsenki ekspluatatsionnykh svoystv trubnykh staley promyslovykh nefteprovodov*. Priob'ye: Nizhnevartovsk. [in Russian]

2. Central Institute of Standard Projects (2019) Water-pressure tentless brick towers with a steel tank with a capacity of 150 m³ with a height of 18 and 24 m to the bottom of the tank. Album No. 1. *Standard project 901-5-9/70*. Moscow. [in Russian]

3. Central Institute of Standard Projects (2019) Unified water steel towers. Album No. 2. *Standard project 901-5 -55-95*. Moscow. [in Russian]

4. Bedov, A. I., & Gabitov, A. I. (2017). *Inzhenernyye sooruzheniya bashennogo tipa tekhnolo-gicheskiye estakady*. Moskva: Moskovskiy gos. stroitel'nyy universitet. [in Russian]

5. Komyagin, L. F. (1980). *Besshatrovyye neotap-livayemye vodonapornyye sooruzheniya*. Leningrad: Leningradskiy Institut zhelezodorozhnogo transporta imeni akademika Obratsova. [in Russian]

6. Schreier, L. L. (Ed.) (1981) *Corrosion: a handbook*. Moscow: Metallurgy. [in Russian]

7. ISO 12944-2: 2017 *Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/64834.html>

8. Mezenov, V. & Golovnenkova, M. (2009) Tough call for coating. *Bridge: design and engineering*, 55(15). [in Russian]

9. Babik, K. M, Gakh, N. D, & Shalinsky, V. V. (2020) *Tekhnichnyy stan konstruktsiy ta elementiv zemlyanoyi vstavky avtodorozhnoho pereyizdu sporudamy Dniprovs'koyi HES* [Technical condition of structures and elements of the

earthen insert of the road crossing structures of the Dnieper HPP]. *Industrial Construction and Engineering Structures*, 4. 7-15. [in Ukrainian]

10. Makarenko, V. D., Kuz'menko, O. H., Kuskov, Yu. M., Bilyk, S. I., Vynnykov, Yu. L., & Makarenko, Yu. V. (2021) *Korozivni runyvannya kanalizatsiynikh system Ukrayiny* [Corrosion destruction of sewage systems of Ukraine]: monograph. Kyiv: Scientific and Publishing Department of NULES of Ukraine. [in Ukrainiane]

11. Moskvina, V. M. (1980) *Korroziya betona i zhelezobetona; metody ikh zashchity* [Corrosion of concrete and reinforced concrete; methods of their protection]. Moscow: Stroyizdat. [in Russian]

12. NACE TM0177-SG (2016) *Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments*. Retrieved from

<https://store.ampp.org/tm0177-2016>

13. Makarenko, V. D., Muravjev, K. A., & Kalyanov, A. I. (2006) *Special features of manual and welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia*. *Welding International*, 20 (5). 410-413. <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3640>

14. Makarenko, V. D. (Ed.) (1996) *Svarka i korroziya neftegazoprovodov Zapadnoy Sibiri* [Welding and corrosion of oil and gas pipelines in Western Siberia]. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

15. Makarenko, V. D. (Ed.) (2000) *Korroziynaya stoykost' svarynykh metallokonstruktsiy neftegazovykh ob'yektov* [Corrosion resistance of welded metal structures of oil and gas facilities]. Moscow: LLC "Nedra-Business Center". [in Russian]

16. Vaynman, A. B., Martynov, O. I., & Smiyann, O. D. (1996). О хрупких повреждениях трубопроводов подачи воды в парохладители котлов блоков СКД. *Sbornik materialov III Mezhdunarodnoy Konferentsii "Korroziya-96"*. L'vov. 53-55. [in Russian]

17. Anuchkin, M. P., Goritskiy, V. N., & Miroshnichenko, B. I. (1986). *Truby dlya magistral'nykh truboprovodov*. Moskva: Nedra. [in Russian]

Increasing corrosion and mechanical resistance destruction of welding cover capacities water towers

Valeriy Makarenko, Serhiy Bilyk, Tetiana Khomutetska, Tetiana Arhatenko, Yulia Makarenko, Olena Panchenko

Abstract. The paper considers standard methods for determining the corrosion and mechanical characteristics of pipes and their welded joints, steel shell structures for water supply to consumers. It was found that sharp fluctuations in the values of microhardness in the zone of thermal influence of the welded joint exceed the baseline values in the middle part of the weld and the base metal of the pipe. The obtained results can be used to test the performance of carbon steel steels designed for the construction of water towers of long service life in corrosive environments. Under the action of the temperature gradient on the outer surfaces of the walls of the water tank tensile stresses occur, and on the inner surfaces-compressive, which is a favorable factor that reduces the risk of corrosion. Temperature stresses that occur in the case of temperature inhomogeneity along the contour of the cylindrical tank are unfavorable. Stresses from the weight load are small and do not have a significant effect on the destruction of the steel tank, because they are compressive. The value of technological final stresses was determined experimentally by mechanical strain gauge according to the classical method, as well as with the help of electric strain gauges and ultrasonic method according to the method of E. O. Paton Electric Welding Institute (PWI). It has been experimentally established that the most dangerous final welding stresses in assembly seams, the value of which for the longitudinal stress component is close to or exceeds the yield strength $\sigma_{xy} \geq \sigma_T$, and for the transverse – close to the yield strength $\sigma_{xy} \leq \sigma_T$, while on steel plates VSt3 of the same thickness $\sigma_{xy} \approx 0,3\sigma_T$. It is likely that welding during installation in conditions of rigid compression of the metal causes an increased level of final stresses. The magnitude and sign of the final stresses σ_{fin} significantly depends on the method of installation. Even during block installation, when the water tower is mounted from several pre-annealed blocks, the connection between the mounting ring seams in some areas of the base metal near these seams during fitting creates significant stresses (up to 17.6 kgf / mm²), in some areas – up to 6 kgf / mm². When sheet assembly stresses can reach a level close to the yield strength.

Key words: steel, strength, crack resistance, water towers

Стаття надійшла до редакції 05.06.2022