

УДК 621.791.052

## МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗВАРНИХ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНКОВИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ (огляд літературних джерел)

Аналіз причин руйнувань тонкостінних посудин тиску, апаратів оболонкових конструкцій і трубопроводів свідчить, що найбільш слабкою ділянкою є зварні з'єднання, що відповідальні, як правило, за несну здатність усієї конструкції. Тому актуальними є дослідження технологічної і експлуатаційної надійності тонкостінних оболонкових конструкцій, особливо пов'язаних з методами розрахунку зварних тонкостінних оболонкових конструкцій на міцність з урахуванням реальних властивостей окремих зон зварних з'єднань і їх геометричних параметрів. Підвищення надійності, технологічності і економічності зварних тонкостінних оболонкових конструкцій потребує удосконалення методів їх розрахунку на міцність та несну здатність, а також впровадження сучасних форм конструкторсько-технологічного проектування їх зварних з'єднань з урахуванням особливостей експлуатації в жорстких умовах навантаження.

The analysis of reasons of destructions of the thin-walled vessels of pressure, vehicles of thecal constructions and pipelines testifies that the most weak area are the weld-fabricated connections, that responsible, as a rule, for несny ability of all construction. Therefore actual are re-searches of technological and operating reliability of the thin-walled thecal constructions especially related to the methods of calculation the thin-walled thecal weldments on durability taking into account the real properties of separate zones of the weld-fabricated connections and them geometrical parameters. The increase of reliability, technologicalness and economy of the thin-walled thecal weldments needs the improvement of methods of their calculation on durability and несny ability, and also introduction of modern forms of the design-engineering planning them the weld-fabricated connections taking into account the features of exploitation drastic loading.

**Ключові слова:** несна здатність, тріщиностійкість, напруження, надійність, деформація



**В.Д. Макаренко**  
професор Навчально-наукового інституту «Нафти і газу» Національного технічного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», д.т.н., професор



**О.Т. Чернова**  
доцент Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, к.т.н.



**С.Ю. Максимов**  
зав. відділу «Фізико-механічні дослідження зварюваності конструкційних сталей» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, д.т.н.



**М.І. Мурашко**  
директор Чернігівського інституту ім. Героїв Крут, к.е.н.



**Ю.В. Макаренко**  
бакалавр університету Манітоба (Канада)



**І.О. Макаренко**  
Чернігівський інститут ім. Героїв Крут, канд. держ. упр.

**П**ідвищення надійності конструкцій потребує удосконалення старих і розроблення нових методів їх розрахунку на міцність та несну здатність, а також впровадження прогресивних форм конструкторсько-технологічного проектування. Особливої актуальності дані питання набули в останні роки в зв'язку з інтенсивним розвитком хімічної, нафтопереробної, суднобудівної та інших галузей народного господарства,

що зумовило різке збільшення випуску апаратів, посудин і трубопроводів різних типів і розмірів, що працюють за умов високих тисків і знакозмінних навантажень у корозійно-агресивних середовищах. Експлуатація таких конструкцій характеризується великою ймовірністю їх руйнувань, що супроводжується значними економічними витратами і екологічними наслідками.

У теперішній час існує ціла низка розрахункових і експериментальних методик для оцінки несної здатності і опору крихкому руйнуванню зварних оболонкових конструкцій. В той же час цілий комплекс проблем, пов'язаних із забезпеченням надійності і працездатності оболонкових конструкцій за наявності в них неоднорідних зон зварних з'єднань, залишається практично не вирішеним. Актуальність їх вирішення зростає в зв'язку з більш широким використанням при виготовленні оболонкових конструкцій високоміцних легованих сталей і сплавів, а також нових способів виконання зварних з'єднань з використанням прогресивних матеріалів.

Складність експериментальних і теоретичних досліджень пов'язана з впливом механічної неоднорідності на працездатність зварних з'єднань за різних умов навантаження, а тому багато авторів у своїх роботах обмежувались тільки дослідженнями листових або стрижневих конструкцій. Тобто практично відсутня необхідна розрахункова база для розроблення рекомендацій щодо раціонального конструкторсько-технологічного проектування механічно неоднорідних з'єднань оболонкових конструкцій, оптимальної геометрії зварювального стику, матеріалу, відповідних режимів і технології зварювання, режимів гідрочисно пневмоопресування при контрольно-здавальних випробуваннях та інше. Для вирішення даної проблеми необхідно, перш за все, вибрати оптимальні розрахункові методи, які дозволяють виконувати аналіз несної здатності зварних оболонкових конструкцій з урахуванням впливу найбільш значущих факторів.

Метою роботи є огляд історичних аспектів розроблення методів оцінювання несної здатності зварних тонкостінних оболонкових конструкцій, які експлуатуються в жорстких умовах навантаження.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Відомо [1, 2, 3], що в основу розрахунку тонкостінних зварювальних оболонкових конструкцій покладена теорія тертя мембранних оболонок, напружений стан яких виражається рівнянням Лапласа

$$P = (\sigma_1/R_1 + \sigma_2/R_2)/t, \quad (1)$$

де  $P$  – внутрішній тиск;  $t$  – товщина стінки оболонки;  $R_1$  й  $R_2$  – відповідно головні радіуси кривизни оболонки в точці, яка характеризується напруженнями  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ .

При цьому використовують спрощений розрахунок умови і припущення, що витікають з

гіпотези тонкостінності оболонки [20]. Наприклад, нормальними напруженнями  $\sigma_3$ , що діють перпендикулярно до серединної поверхні оболонки, нехтують унаслідок їх малості в порівнянні з компонентами напруженого стану в стінці  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ .

У сучасних умовах чинні нормативні документи для розрахунку на міцність тонкостінних оболонкових конструкцій базуються на підходах Лапласа. Так, розрахунок труб на міцність у бувшому СРСР регламентувався СНиП 2.05.06-85\*. Відповідно до цього стандарту, міцність трубопроводів забезпечується товщиною стінки труби, яка визначається з нормативного значення тимчасового опору матеріалу, величини робочого тиску, діаметра труби, класу і категорії трубопроводу:

$$P_{\text{доп}} = 2m_t t R_t^n / k_1 k_n D_{\text{вн}}, \quad (2)$$

де  $R_t^n$  – мінімальна міцність труби при розтягуванні;  $t, D$  – товщина і внутрішній діаметр труби;  $m_t$  – коефіцієнт умови роботи трубопроводу, що залежить від його категорії;  $k_1$  – коефіцієнт надійності по матеріалу (визначається термообробкою матеріалу труб);  $k_n$  – коефіцієнт надійності з призначення трубопроводу.

Відповідно до СНиП 2.05.06-85\*, розрахунок на міцність магістральних трубопроводів виконується з урахуванням двовісності напруженого стану стінки труб через поправкові коефіцієнти, вибір яких не має достатнього наукового обґрунтування і базується на дослідних даних, отриманих у результаті експлуатації трубопроводів.

За кордоном, наприклад у Німеччині, розрахунок трубопроводів виконують відповідно до стандартів DIN 2470 і DIN 2413, а в США – за стандартом ANIB 31.8. Товщину стінки труб визначають виходячи з тих же основних параметрів, що і в країнах бувшого СРСР, але замість тимчасового опору в розрахунках використовують нормативні значення умовної межі плинності.

Розглянемо деякі методики розрахунку, які найбільш широко використовувались в інженерних проєктах,

$$P_{\text{max}} = \sigma_B t / R \quad [6]; \quad (3)$$

$$P_{\text{max}} = (\sigma_B t / R) \quad [4]; \quad (4)$$

$$2/\sqrt{3} e^{s(1-\sqrt{3})} [(m-1)/(m-1/\sqrt{3})]^{(1-m\sqrt{3})} \quad [4]; \quad (5)$$

$$P_{\text{max}} = 2/3^{(m+1)/R} (\sigma_B t / R) \quad [5]; \quad (6)$$

$$P_{\text{max}} = \sigma_B (0,25/s + 0,227) (e/s)^s (2t/D + t) \quad [7], \quad (7)$$

де  $P_{\max}$  – розрахунковий руйнівний тиск;  $t$ ,  $R$  – товщина стінки і радіус труби;  $m$  – показник зміцнення матеріалу труби;  $s$  – дійсне рівномірне здовження;  $D = 2R$  – внутрішній діаметр труби;  $e$  – основа натурального логарифма.

Приведена першою котельна формула (3), яка базується на рівнянні Лапласа (1), найбільш розповсюджена на практиці і складає основу для приведених нижче варіантів розрахунку тонкостінних оболонок (4–6). Різниця підходів, на основі яких запропонована формула (4), полягає в більш чіткому обґрунтуванні і виборі моменту, який несе відповідальність за досягнення граничного стану розглянутих оболонок. Специфікою навантаження даних конструкцій є те, що момент досягнення максимальної величини тиску  $P_{\max}$ , що діє на оболонку, який приймається за момент вичерпання її несної дієздатності, не відповідає граничним значенням, що діють у стінці оболонки головних напружень  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ . Зокрема, було встановлено, що граничний стан тонкостінних оболонок відповідає стадії втрати стійкості їх пластичних деформацій, а момент вичерпання несної дієздатності визначається деформаційною здатністю металу і його спроможністю зміцнюватися в процесі навантаження за межею плинності. Останнє враховується введенням до котельної формули (3) коефіцієнта  $\beta$ , який характеризує специфіку деформування конструкції на стадії втрати пластичної стійкості і визначається безпосередньо з аналізу граничного стану оболонкових конструкцій (див. формулу 4). Аналогічні підходи були використані при розробленні розрахункових методик (див. формули 5–6), коректуючи в кінцевому рахунку котельну формулу (3) шляхом введення відповідних поправкових функцій, які виражають специфіку роботи матеріалу оболонкових конструкцій, навантажених внутрішнім тиском.

Базуючись на приведених вище закономірностях, у роботі [3] були отримані розрахункові залежності для оцінки величини максимального тиску і руйнівного напруження в стінці для двох типів оболонкових конструкцій:

- циліндричний ( $n = \sigma_2 / \sigma_1 = 0,5$ )
 
$$P_{\max} = \beta \cdot t / R, \quad \beta = 2 / (\sqrt{3})^{(m+1)} \quad \text{в}; \quad (8)$$

- сферичний ( $n = \sigma_2 / \sigma_1 = 1$ )
 
$$P_{\max} = \beta \cdot t / R, \quad \beta = (2/3)^m \quad \text{в}, \quad (9)$$

де  $m$  – показник ступеня деформаційного зміцнення матеріалу оболонки.

Слід зазначити, що перераховані розрахункові методики (3–8) мають поодинокий характер і не можуть бути розповсюджені на загальний випадок навантаження оболонкових конструкцій, при якому значення показника двовісності напруженого стану в стінці оболонки змінюється в широких межах ( $0 < n < \infty$ ).

У зв'язку з цим, неабиякий інтерес мають дослідження щодо аналізу міцності зварювальних з'єднань при двовісному напруженні. Зокрема, в [3] запропонований метод оцінки механічних властивостей зварювальних з'єднань тонкостінних посудин, що працюють під тиском, шляхом гідростатичного вигину плоских зразків і циліндричних оболонок, закріплених по контуру. Потрібне відношення компонент напруженого стану  $n = \sigma_2 / \sigma_1$  у дослідних зразках досягалося вибором відповідного контуру отворів у матриці установки. При випробуванні вигином зразки розташовувались таким чином, щоб шов був симетричним відносно кромки отвору. Міцність зварювального з'єднання за запропонованою методикою оцінювалась, крім того, за величиною напружень в основному металі в момент руйнування з'єднання.

У деяких роботах (наприклад, [8]) для оцінювання властивостей зварювальних з'єднань в умовах двовісного навантаження використовуються порівняння результатів випробувань зразків на гідростатичний вигин і посудин на внутрішній тиск. При цьому відмічалось, що навіть при подібності напруженого стану в розглянутих об'єктах спостерігається різниця в моменті початку процесу втрати пластичної стійкості зразків посудин. Цей стан пояснюється тим, що процес вигину зразків зумовлює локалізацію деформацій у зоні вигину, яка сприяє протіканню процесу втрати несної здатності конструкцій при великих значеннях напружень.

Значний інтерес представляють дослідження [9–11] і теоретичні підходи [7, 11, 12], в яких описується вплив двовісного навантаження стінки оболонкових конструкцій на їх граничний стан. Так, наприклад, у роботі [1], виходячи з аналізу втрати пластичної стійкості тонкостінної оболонки циліндричної форми, навантаженої внутрішнім тиском і осьовою розтягувальною силою, встановлені загальні закономірності процесу деформування оболонки і досягнення граничного стану. При цьому величина граничного тиску, яка відповідає стадії втрати пластичної стійкості оболонки, визначається за формулою



$$P_{\max} = \frac{e^{n/3(n-1)}}{(n^2 - n - 1)^{1/n/2} (1 - 0,5n)^m (t/R)}, \quad (10)$$

де  $n = 2 / \dots$ ;  $m$  – показник ступеня деформаційного зміцнення матеріалу оболонки.

Наведені вище розрахункові методики можна використовувати для аналізу несної здатності оболонкових конструкцій, виконаних однорідними зварювальними з'єднаннями. Вони не дозволяють врахувати механічну неоднорідність зварювальних з'єднань оболонкових конструкцій, які часто зустрічаються на практиці, що значно звужує область їх застосування. Оцінка ж міцності розглянутих оболонкових конструкцій з механічними неоднорідними з'єднаннями, здійснена за даними методиками розрахунку, виходячи зі значень властивостей найбільш слабкого ланцюга (тобто, м'якого прошарку), є значно заниженою. Про це, зокрема, свідчать результати досліджень міцності оболонок тиску, ослаблених м'якими прошарками [14, 15] та ін., які показують, що через контактне зміцнення м'яких ділянок значно зростає несна здатність конструкцій. Це дозволяє по-новому підійти до вирішення проблеми підвищення роботоздатності зварювальних з'єднань оболонкових конструкцій. Найбільш інтересні експериментальні результати, отримані при випробуванні труб 114 41 мм із сталей 15Г2СФ і 15Г2СФР із знеміцненими ділянками в навколошовній зоні і зварних посудин 1234 1155 мм із низько- і середньолегованих сталей з кільцевими м'якими швами, що підтверджують неоднозначність механічної поведінки м'яких прошарків у зв'язку з проявленням ефекту їх контактного зміцнення і виявленням взаємозв'язком параметрів граничного стану усєї конструкції з геометричними, механічними і деформаційними характеристиками зварних з'єднань.

Аналіз робіт [8, 13–15] показує, що несна здатність тонкостінних оболонкових конструкцій, ослаблених м'якими прошарками, визначається відношеннями типу (3)–(4) при заміні в них  $\sigma_B$  чи  $\sigma_B^M$  ( $\sigma_B$  – гранична міцність матеріалу оболонки) на деяку величину  $\sigma_{cp}$ , яка характеризує величину рівня граничних напружень у стінці оболонки, прикладених у напрямку поперек прошарку, і відповідає моменту втрати пластичної стійкості розглянутих конструкцій:

$$P_{\max} = \sigma_{cp} t / R, \quad (11)$$

де  $\sigma_{cp} = \sigma_B^M f(K_B, n, K, c_i)$ .

Тут  $\sigma_B^M$  – параметр, який характеризує момент втрати пластичної стійкості оболонки, ослабленої м'яким прошарком;  $\sigma_B^M$  – тимчасовий опір металу м'якого прошарку;  $f(c_i, n)$  – деякий функціонал, що визначає ступінь контактного зміцнення м'якого прошарку, що працює в складі оболонкової конструкції, в залежності від конструктивно-геометричних параметрів  $c_i$  (наприклад,  $K_B = \sigma_B^{OM} / \sigma_B^M$ ,  $k = h/t$  і т.п., де  $\sigma_B^{OM}$  – тимчасовий опір основного металу) і схеми навантаження (параметра двовісності  $n = 2 / \dots$ ). Виходячи з цих позицій, основну увагу при оцінюванні несної здатності тонкостінних оболонкових конструкцій, як правило, приділяли дослідженню впливу конструктивно-геометричних параметрів механічно неоднорідних з'єднань на їх статичну міцність [16]. При цьому аналіз базувався на основних закономірностях механічної поведінки неоднорідних з'єднань, встановлених раніше для листових чи стрижневих конструкцій. Для розглянутих конструкцій у процесі їх статичного навантаження характерним є контактне зміцнення найбільш слабкого ланцюга – м'якого прошарку, при цьому його роль значно зростає зі зменшенням відносної товщини прошарку  $k$ , що призводить до підвищення міцності і зниження пластичності з'єднань, і в діапазоні відносно малих величин  $k$  несна здатність з'єднань практично знаходиться на рівні міцності більш твердого металу. При розмірах м'яких прошарків більше товщини з'єднаних елементів ( $k < 1$ ) майже відсутнє контактне зміцнення м'якого металу і статична міцність з'єднань, ослаблених м'якими прошарками, визначається механічними характеристиками металу (наприклад,  $\sigma_B^M$ ).

Крім розрахункових методик оцінки механічних властивостей зварних з'єднань, ослаблених м'якими прошарками, розроблена ціла низка підходів і одержані розрахункові залежності для визначення відносного видовження, відносного звуження і енергоємності розглянутих з'єднань [17–19].

Таким чином, існуючі розрахункові залежності дають змогу оцінити значний комплекс механічних властивостей неоднорідних зварних з'єднань.

Приведені розрахункові методики можна використовувати для аналізу роботоздатності зварних з'єднань оболонкових конструкцій тільки для поодиноких випадків (наприклад, при

розрахунку на міцність лінійної частини тонкостінних циліндричних оболонок, навантажених внутрішнім тиском). Це пов'язано з тим, що вони, з одного боку, не враховують специфіку пружно-пластичного деформування оболонок конструкторських на стадіях, які випереджають їх граничний стан, а, з іншого боку, вид напруженого стану в стінці оболонок, який визначається схемою їх силового навантаження і геометричною формою. Крім того, зазначені залежності і закладені в їх основу підходи до оцінювання впливу механічної неоднорідності на міцність зварних з'єднань практично непридатні (через їх великий ступінь наближеності) для аналізу роботоздатності тонкостінних оболонок конструкторських, так як не враховують нерівномірність поля напружень у стінці оболонки і, таким чином, особливості контактної зміцнення м'яких прошарків за даних умов. Усе це свідчить про актуальність проблеми

вивчення несної здатності механічно неоднорідних з'єднань оболонок конструкторських.

Важливим етапом на стадії проектування і виготовлення таких конструкторських є вибір оптимальних параметрів їх зварних з'єднань. Слід зазначити, що створення раціональних зварних конструкторських є комплексним завданням, вирішення якого дасть можливість забезпечити оптимальність конструкторських з позиції її міцності та технологічності.

### Висновок.

Подальше удосконалення методів розрахунку зварних тонкостінних оболонок конструкторських на міцність та несну здатність, а також впровадження сучасних підходів до конструкторсько-технологічного проектування зварних з'єднань цих конструкторських з урахуванням особливостей експлуатації в жорстких умовах навантаження сприятиме підвищенню їх надійності, технологічності та економічності.

- [1] Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1985.
- [2] Прочность устойчивость колебания. Справочник. – М.: Машиностроение, 1968.
- [3] Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. – М.: Машиностроение, 1976.
- [4] Моношков А.Н., Пыхов С.И., Пустин И.А. Пластическая устойчивость и ее роль в оценке прочности труб. – М.: Металлургия, 1972. – С. 77–81.
- [5] Щеглов Б.А. Оценка механических свойств листовых металлов при гидравлических испытаниях. – М.: Металлургия, 1965. – С. 24–29.
- [6] ГОСТ 3845-65. Трубы. Методы испытания гидравлическим давлением. – М.: Изд-во стандартов, 1969.
- [7] Ройер Р. Влияние показателя деформационного упрочнения и концентрации напряжений на характер разрыва сосудов давления: Тр. амер. об-ва инженеров-механиков. 96. Сер. Д, 1974, С. 82–87.
- [8] Зайнуллин Р.С., Бакиев А.В. Прочность сварных соединений с разупрочненными участками при двухосном растяжении. Сварочное производство, 1973, С. 35–36.
- [9] Ковальчук Г.И. К вопросу о потере устойчивости пластического деформирования оболочек. // Проблемы прочности, 1983. – С. 11–16.
- [10] Островский А.А. К экспериментальному обоснованию критерия потери устойчивости пластического деформирования тонкостенных элементов. // Проблемы прочности, 1981. – С. 57–58.
- [11] Чечин Э.В. Резервы снижения металлоемкости сварных сосудов, работающих при температурах 293К и 77К. // Автоматическая сварка, 1985. – С. 6–12.
- [12] Колдинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Пер с англ. – М.: «Мир», 1984.
- [13] Бакши О.А., Богомолова А.С. Работоспособность сварных цилиндрических труб с поперечной мягкой прослойкой при осевом растяжении. // Сварочное производство, 1969. – С. 3–4.
- [14] Бакши О.А., Богомолова А.С. Прочность механических неоднородных сварных соединений при двухосном растяжении. // Сварочное производство, 1971. – С. 3–6.
- [15] Нетребский М.А. О прочности кольцевых швов сосудов высокого давления. – К.: Наукова думка, 1984. – С. 354–359.
- [16] Шахматов М.В., Ерофеев В.В., Лупин В.А. и др. Несущая способность механически неоднородных сварных соединений износостойких труб. // Проблемы прочности, 1985. – С. 33–36.
- [17] Бакши О.А. Деформационная способность (пластичность) сварных стыковых соединений и пути ее регулирования. Тр. Челябинского политехн. ин-та, 1968. – С. 3–14.
- [18] Кульневич Т.В. Расчет относительного сужения мягкой прослойки при растяжении. Тр. Челябинского политехн. ин-та, 1979. С. 34–35.
- [19] Кульневич Т.В., Кульневич Б.Г. Расчет энергоемкости сварных соединений при растяжении. Тр. Челябинского политехн. ин-та, 1974. – С. 30–36.
- [20] Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1987.
- [21] Makarenko V.D., Muravjev K.A., Kalyanov A.I. (2006) Special features of manual arc welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia. Welding International. 10 (5). 64–71.
- [22] Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I. (1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. Welding International. 12. 34–39.
- [23] Makarenko V.D., Shatilo S.P. (1999) Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. Welding International. 12. 56–61.
- [24] Makarenko V.D., Beljaev V.A., Protasov V.N., Shatilo S.P. (2000) Mathematical model of the mechanism of resistance of welded joints in oil and gas pipelines to static hydrogen fatigue. Welding International. 4. 83–88.

Надійшла 16.11.2020 р.