

## **Пружнопластичний стан труби з нерівномірною товщиною стінки при комбінованому навантаженні**

**Б. С. Білобран, О. Б. Кінаш**

Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

*Запропоновано методику теоретичного й експериментального дослідження пружнопластичного стану труби з нерівномірною товщиною стінки при комбінованому навантаженні внутрішнім тиском, згинальним моментом і поздовжньою силою. Досліджували зразки сталевих труб, товщину стінки яких у поперечному перерізі описували за косинусоїдальним законом. Для визначення шляхом розрахунку напружень і деформацій за границею пружності використовували деформаційну теорію пластичності і безмоментну теорію тонкостінних оболонок. Виконано порівняння експериментальних даних із теоретичними. Наведено приклад практичного застосування методики для оцінки міцності послабленої втратою металу зони защемленої ґрунтом ділянки магістрального трубопроводу.*

**Ключові слова:** тонкостінна труба, пружнопластичний стан, внутрішній тиск, стиск, згин.

**Вступ.** Задачу визначення напружень і деформацій за границею пружності в тонкостінній трубі з нерівномірною товщиною стінки при сумісній дії згину, розтягу (стиску) і внутрішнього тиску необхідно розв’язувати при розрахунку магістральних трубопроводів, що працюють у складних умовах, а також при їхніх гідравлічних випробуваннях високими тисками, коли кільцеві напруження можуть навіть перевищувати границю текучості матеріалу труб. Нерівномірність товщини стінки в поперечному перерізі може бути пов’язана як з допусками на товщину при виготовленні труб, так і з її зменшенням у процесі експлуатації, наприклад, внаслідок корозії чи ерозії.

**Напружено-деформований стан тонкостінної труби з нерівномірною товщиною стінки при комбінованому навантаженні.** Розглянемо тонкостінну трубу (рис. 1), що знаходиться під дією внутрішнього тиску  $P$ , в поперечних перерізах якої виникають поздовжня сила  $N$  і згинальний момент  $M$ , зумовлені дією поздовжнього та поперечного навантаження. Товщина стінки труби змінюється симетрично відносно осі  $Y$ , що співпадає з силовою площиною, і її серединної циліндричної поверхні.

При аналізі напружено-деформованого стану труби впливом зміни форми і розмірів поперечного перерізу в процесі навантаження, радіальних та пов’язаних із поперечною силою дотичних напружень нехтуємо. Окрім того, трубу вважаємо тонкостінною оболонкою. У цьому разі нормальні кільцеві  $\sigma_\varphi$  і поздовжні  $\sigma_z$  напруження можна прийняти за головні, що рівномірно розподілені по товщині стінки труби.

Спричинену дією зовнішнього навантаження деформацію труби як стержня будемо характеризувати двома основними параметрами геометричної осі труби, яка проходить через центри середньої лінії поперечного перерізу: поздовжньою деформацією  $\varepsilon_0$  та зміною кривизни  $\kappa_z$ , що зручно при практичних розрахунках.

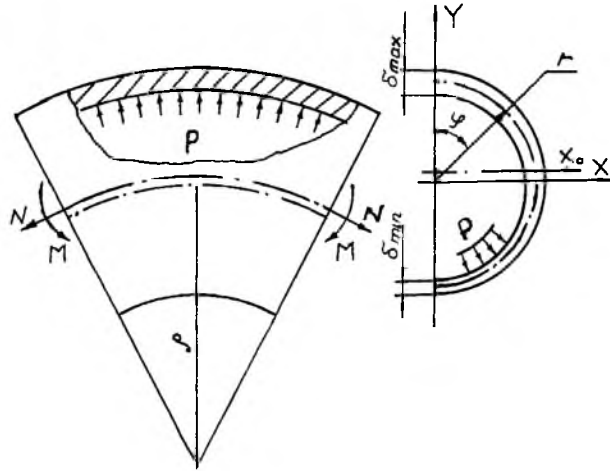


Рис. 1. Схема деформування елемента трубопроводу, навантаженого внутрішнім тиском  $P$ , згинальним моментом  $M$  і осьовою силою  $N$ .

Для спрощення розв'язання задачі за вихідні дані приймаємо внутрішній тиск  $P$  і параметри деформації геометричної осі  $\varepsilon_0, \kappa_z$ . За такої постановки задачі кільцеве напруження  $\sigma_\varphi$  і поздовжню деформацію  $\varepsilon_z$  можна визначити незалежно від інших компонентів напружено-деформованого стану.

За допомогою рівняння статички і гіпотези плоских перерізів знаходимо

$$\sigma_\varphi = \frac{Pr}{\delta(\varphi)}; \tag{1}$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_0 + \tilde{\kappa}_z \cos \varphi; \tag{2}$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{0C} - \tilde{\kappa}_z \tilde{e}, \tag{3}$$

де  $r$  – радіус середньої лінії поперечного перерізу,  $\delta(\varphi)$  – товщина стінки в точці середньої лінії, що визначається полярним кутом  $\varphi$ ;  $\tilde{\kappa}_z = r\kappa_z$  – безрозмірна кривизна геометричної осі труби;  $\varepsilon_{0C}$  – відносна деформація центральної осі;  $\tilde{e} = e/r$  – відносне зміщення центральної осі.

При складанні виразу (2) прийнято, що кривизна центральної осі приблизно дорівнює кривизні геометричної осі, що допустимо, оскільки для розглядуваної задачі  $\tilde{\kappa}_z \ll 1$ . Відносне зміщення центральної осі визначається згідно з формулою

$$\tilde{e} = \frac{\int_0^\pi \delta(\varphi) \cos \varphi d\varphi}{\int_0^\pi \delta(\varphi) d\varphi}. \tag{4}$$

Для визначення поздовжнього напруження і кільцевої деформації скористаємося варіантом деформаційної теорії пластичності, для якого фізичні співвідношення записуються у формі узагальненого закону Гука, а залежність між інтенсивностями напружень  $\sigma_i$  і деформацій  $\varepsilon_i$  збігається з діаграмою розтягу [1]. При такому підході для розглядуваного випадку плоского напруженого стану маємо

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_1}(\sigma_z - \mu_1\sigma_\varphi); \quad (5)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E_1}(\sigma_\varphi - \mu_1\sigma_z); \quad (6)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\mu_1}{1-\mu_1}(\varepsilon_z + \varepsilon_\varphi); \quad (7)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad \mu_1 = \frac{1}{2} - \frac{1-2\mu}{2E}E_1; \quad (8)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{1-\mu_1^2} \sqrt{(\varepsilon_z^2 + \varepsilon_\varphi^2)(1-\mu_1 + \mu_1^2) - \varepsilon_z\varepsilon_\varphi(1-4\mu_1 + \mu_1^2)}, \quad (9)$$

де  $E_1, \mu_1$  – змінні параметри пружності (січний модуль і коефіцієнт поперечної деформації);  $\varepsilon_r$  – радіальна деформація;  $E, \mu$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона.

Із фізичних співвідношень (5) і (6) отримаємо

$$\sigma_z = E_1\varepsilon_z + \mu_1\sigma_\varphi; \quad (10)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\sigma_\varphi(1-\mu_1^2)}{E_1} - \mu_1\varepsilon_z. \quad (11)$$

За допомогою відомої діаграми деформування матеріалу труби  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$  і закономірності, за якою змінюється товщина стінки  $\delta = f(\varphi)$ , використовуючи залежності (1), (4), (8)–(11) та метод послідовних наближень можна знайти шукані невідомі  $\sigma_z, \varepsilon_\varphi$ .

Дослідження показують, що здебільшого для труб у стані поставки діаграму деформування матеріалу в зоні малих пружнопластичних деформацій з достатньою для практики точністю можна аналітично описати ламаною лінією з трьома ділянками: прямою – в межах пружності та двома кривими за степеневими функціями – до і після точки, що відповідає умовній границі текучості  $\sigma_T = \sigma_{0,2}$ .

У цьому разі маємо

$$E_1 = E \quad \text{при} \quad 0 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{\text{пл}}; \quad (12)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_{0,2}}{\varepsilon_{0,2}} \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{0,2}} \right)^{m_0-1} \quad \text{при } \varepsilon_{\text{пл}} \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{0,2}; \quad (13)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_{0,2}}{\varepsilon_{0,2}} \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{0,2}} \right)^{m-1} \quad \text{при } \varepsilon_i \geq \varepsilon_{0,2}, \quad (14)$$

де

$$m_0 = \frac{\log\left(\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\text{пл}}}\right)}{\log\left(\frac{\varepsilon_{0,2}}{\varepsilon_{\text{пл}}}\right)}; \quad m = \frac{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{0,2}}\right)}{\log\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{0,2}}\right)}. \quad (15)$$

Параметри схематизованої діаграми  $m_0, m$  визначаються за умов, що вона проходить через три точки експериментальної діаграми: точку границі пропорційності  $(\sigma_{\text{пл}}, \varepsilon_{\text{пл}})$ ; точку умовної границі текучості  $(\sigma_{0,2}, \varepsilon_{0,2})$  та точку з координатами  $(\sigma_1, \varepsilon_1)$ , яка приблизно відповідає значенню найбільшої очікуваної інтенсивності деформацій. Практика експлуатації магістральних трубопроводів показує, що для ділянок, які працюють у складних умовах, здебільшого можна приймати  $\varepsilon_1 = 0,01 \dots 0,015$ .

Варто зазначити, що цей спосіб схематизації є достатньо зручним при розрахунках із застосуванням ЕОМ. Програмне забезпечення, опрацьоване на основі такої схематизації діаграми деформування, також придатне для розрахунку тонкостінної труби, діаграма розтягу матеріалу якої має площинку текучості. У цьому разі потрібно прийняти  $\sigma_{\text{пл}} = \sigma_{0,2} = \sigma_T, \varepsilon_{0,2} = \varepsilon_{T1}$  ( $\varepsilon_{T1}$  – відносне подовження, що відповідає кінцю площинки текучості),  $m_0 = 0$ , що дає перехід до широко вживаної на практиці схематизації [2]. Окрім того, врахування різниці між границями пропорційності та текучості, що для окремих трубних сталей може досягати 30% [3], важливо для уточнених розрахунків, які потрібно виконувати при випробуваннях магістральних трубопроводів високими тисками [4].

За допомогою функції розподілу поздовжніх напружень у поперечному перерізі труби можна визначити значення поздовжньої сили  $N$  та згинального моменту  $M$ , що відповідають заданим параметрам деформації труби як стержня  $\varepsilon_0$  і  $\tilde{\kappa}_z$ . Для цього слід скористатися умовами статичної еквівалентності:

$$N = \int_A \sigma_z dA = 2r \int_0^\pi \sigma_z \delta(\varphi) d\varphi; \quad (16)$$

$$M = \int_A \sigma_z y dA = 2r^2 \int_0^\pi \sigma_z \delta(\varphi) (\cos \varphi - \tilde{\varepsilon}) d\varphi, \quad (17)$$

де  $y$  – відстань, що відраховується від центральної осі поперечного перерізу.

Рівняння (16), (17) дають можливість встановити однозначну залежність між поздовжньою силою і відносним видовженням (скороченням) осі та між згинальним моментом і кривизною зігнутої осі і відповідно характеризують жорсткість тонкостінної труби під тиском при розтязі (стиску) і згині. Отже, з використанням одержаних вище залежностей можна знайти закономірність розподілу поздовжніх напружень у поперечному перерізі труби та її характеристики жорсткості при розтязі й згині за відомими значеннями відносного видовження осі та її кривизни.

Для розв'язання зворотної задачі – визначення параметрів деформації геометричної осі труби  $\varepsilon_0$ ,  $\tilde{\kappa}_z$  за відомими значеннями внутрішніх силових факторів  $N$  і  $M$  – потрібно спочатку отримати залежності  $M = f(\tilde{\kappa}_z)$  (діаграму згину) і  $\varepsilon_0 = f(\tilde{\kappa}_z)$  для заданих значень поздовжньої сили та внутрішнього тиску у вигляді графіків чи таблиць або розв'язати систему двох нелінійних рівнянь, сформованих на підставі виразів (16), (17).

**Методика експериментального дослідження.** Для перевірки правомірності застосування описаного вище методу визначення напружень і параметрів жорсткості при розтязі (стиску) та згині при інженерних розрахунках елементів тонкостінних трубопроводів виконано експериментальні дослідження на спеціально розробленій установці для згину з одночасним стиском. Із цією метою було запроєктовано і виготовлено стенд, що дозволило досліджувати напружено-деформований стан зразка труби діаметром 76 мм при комбінованому навантаженні згинальним моментом, поздовжньою стисковою силою і внутрішнім тиском (рис. 2).

Стенд представляє собою плоску рамну конструкцію замкненого контуру, що складається з двох жорстких важелів 2 із муфтами 3, в які щільно вставлено кінці піддослідної труби 1, двох верхніх тяг 6 із поперечинами 7 та нижньої тяги 5 з шаровими і гвинтовими парами для створення у трубі поздовжньої стискної сили і згинального моменту. Для ущільнення торців труби і запобігання витікання масла, яке нагніталось за допомогою ручної поршневої помпи 10, використано гумові прокладки 4 зі спеціальної маслостійкої гуми.

Прикладені до труби зовнішні навантаження вимірювали зразковими динамометрами стиску типу ДОС-5 8 і 9, внутрішній тиск – зразковим манометром 11. Установка підвішена шарнірно на звареній з кутників просторовій рамі.

Створені навантаження, характерні для ділянок магістральних трубопроводів, що працюють в умовах поздовжньо-поперечного згину: згинальний момент, осьова стиска сила, внутрішній тиск.

Для вимірювання поздовжніх деформацій зовнішньої поверхні труби при згині зі стиском як у пружній, так і в пластичній зоні застосовувалися механічні тензометри важільно-індикаторного типу з базою 25 мм.

Кріплення тензометрів на трубі здійснюється попарно пружинним притискачем. Радіальні переміщення точок зовнішньої поверхні труби в напрямі осей  $X$ ,  $Y$  вимірювали за допомогою пристрою з чотирма індикаторами [5], який встановлювали на зразку поряд із тензометрами. Установлено, що розміри поперечного перерізу труби в процесі випробування зразків змінювалися неістотно ( $< 1\%$ ).

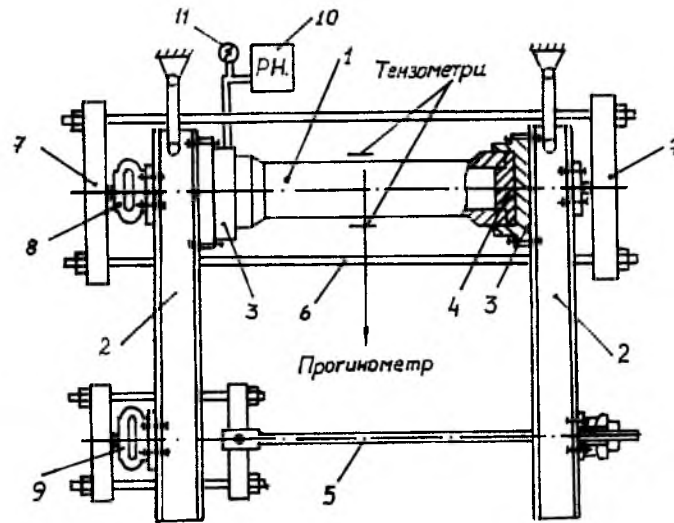


Рис. 2. Схема установки для дослідження напружено-деформованого стану труби, що знаходиться під дією навантаження внутрішнього тиску  $P$ , згинального моменту  $M$  і осьової сили  $N$ .

Стрілу прогину труби при дослідженні вимірювали за допомогою прогиноміра, побудованого на основі штангенциркуля, що дозволяло вимірювання проводити з точністю до 0,1 мм.

**Зразки для дослідження і механічні характеристики матеріалу труби.** Об'єктом експериментального дослідження пружнопластичного стану тонкостінних труб при комбінованому навантаженні внутрішнім тиском, поздовжньою стискною силою та згинальним моментом служили зразки сталевих труб у стані поставки з поздовжнім зварним швом. Дослідження проводили на трубах із зовнішнім діаметром 76 мм, які проточували ззовні у середній частині труби з різностінністю  $\Delta = (\delta_{\max} - \delta_{\min})/2$ . Зміну товщини стінки в поперечному перерізі зразка труби описували за косинусоїдальним законом:

$$\delta(\varphi) = \delta_0 \left( 1 + \frac{\Delta}{\delta_0} \cos \varphi \right), \quad (18)$$

де  $\delta_0$  – середнє значення товщини стінки труби,  $\delta_0 = (\delta_{\max} + \delta_{\min})/2$ ;  $\delta_{\max}$ ,  $\delta_{\min}$  – відповідно максимальне і мінімальне значення товщини стінки труби, що вимірювалися за допомогою ультразвукового приладу.

Довжина трубних зразків дорівнювала 700 мм, довжина піддослідної частини – 400 мм.

Основні механічні характеристики матеріалу труб визначали з діаграми напружень, отриманої при випробуванні на стиск зразків труб у необточенному стані. Досліджували суцільні зразки труб висотою 150 мм. Стиск здійснювали на пресі П-125 із застосуванням зразкового динамометра ДОС-25 та важільно-індикаторних тензометрів з базою 25 мм. Останні кріпилися посередині робочої довжини зразка пружинними притискачами, що дозволяло вимірювати деформації на бокових паралельних поверхнях.

Реєстрація видовження за важільно-індикаторним тензометром проводилася до деформацій, приблизно рівних 2%.

Навантаження зразків проводилося із забезпеченням плавності зростання сили і можливості його припинення на декілька секунд для зняття показників за силовимірювальною шкалою динамометра і за шкалами важільно-індикаторних тензометрів. На підставі отриманих таким чином результатів будували дійсну діаграму напружень, що описувалася трьома залежностями: рівнянням прямої у межах пружності і двома степеневими функціями в нелінійній зоні, параметри яких знаходили за такими даними:  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\sigma_T = \sigma_{0,2} = 340$  МПа;  $\sigma_{\text{пл}} = 0,95\sigma_T$ ;  $\sigma_1 = 1,05\sigma_T$ ;  $\varepsilon_1 = 0,01$ .

#### Випробування труб при дії внутрішнього тиску, стиску та згину.

Перед дослідженнями вимірювали основні розміри перерізу робочої частини зразка. Після встановлення приладів і зняття їхніх початкових показників проводилося попереднє навантаження до 0,2...0,3 очікуваної границі пропорційності і розвантаження до 0,1...0,3 кН. У процесі навантаження труби зовнішніми силами внутрішній тиск підтримувався приблизно постійним. При згині у пружній зоні деформації крайніх волокон збільшувалися пропорційно навантаженню. Поява перших пластичних деформацій була відмічена в крайніх стиснутих волокнах. Після цього збільшення навантаження супроводжувалося швидким ростом поздовжніх деформацій стиснутої зони поперечного перерізу труби. Надалі ріст кривизни супроводжувався збільшенням деформацій в обох зонах. При цьому поздовжні деформації крайніх розтягнутих волокон були менші, ніж поздовжні деформації стиснутих волокон.

Спричинене внутрішнім тиском кільцеве напруження обчислювали за формулою, що впливає із залежностей (1) і (18):

$$\sigma_{\varphi}(\varphi) = \frac{\sigma_{\varphi 0}}{1 + \tilde{\Delta} \cos \varphi}, \quad (19)$$

де  $\sigma_{\varphi 0} = \frac{Pr}{\delta_0}$  – кільцеве напруження, спричинене внутрішнім тиском, коли

товщина стінки дорівнює її середньому значенню  $\delta_0$ ;  $\tilde{\Delta} = \frac{\Delta}{\delta_0} = 0,179$  –

безрозмірний параметр зміни товщини стінки труби.

Залежно від вимірних значень відносних деформацій у найбільш розтягнутих  $\varepsilon_p$  і стиснутих  $\varepsilon_c$  волокнах поздовжню деформацію  $\varepsilon_0$  і безрозмірну кривизну  $\tilde{\kappa}_z$  геометричної осі труби визначали у відповідності з гіпотезою плоских перерізів:

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_c}{2}; \quad (20)$$

$$\tilde{\kappa}_z = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_c}{(2 + \delta_0/r)}. \quad (21)$$

Безрозмірну величину згинального моменту знаходили за вимірними значеннями сил  $F_1$  і  $F_2$  та стріли прогину  $f$  і обчисленим на підставі виразів (4) і (18) зміщенням центральної осі  $e = \tilde{\Delta}r/2$  за формулою

$$\tilde{M} = \frac{F_1(f + e) + F_2(f + e + l)}{4\sigma_T r^2 \delta_0}, \quad (22)$$

де  $F_1$  і  $F_2$  – зовнішні сили, виміряні верхнім і нижнім динамометрами;  $f + e$ ,  $f + e + l$  – плечі, що характеризують відстань від центра ваги перерізу зразка до лінії дії відповідної сили.

Величина поздовжньої сили  $N$ , що виникає у поперечному перерізі посередині труби, – це різниця між розтягальною силою  $F_p$  від дії внутрішнього тиску на днища і сумарною стискною силою  $F_1 + F_2$ , яку показують шкали верхнього і нижнього динамометрів. Її безрозмірна величина визначається за формулою

$$\tilde{N} = \frac{N}{2\pi r \delta_0 \sigma_T} = \frac{F_p - (F_1 + F_2)}{2\pi r \delta_0 \sigma_T}. \quad (23)$$

Отже, за результатами вимірювань можна отримати експериментальні значення згинального моменту  $\tilde{M}$  і поздовжньої сили  $\tilde{N}$ . З іншого боку, ці значення можна знайти за параметрами діаграми деформування матеріалу труби та відповідними значеннями кільцевого напруження  $\tilde{\sigma}_\varphi$ , параметрів деформації геометричної осі  $\tilde{\kappa}_z$  і  $\varepsilon_0$  аналітичним шляхом при використанні чисельних методів і ЕОМ за вищенаведеною методикою і порівняти їх з експериментальними.

**Аналіз результатів.** Для порівняння розрахункових даних з експериментальними у табл. 1 представлено розрахункові значення безрозмірного згинального моменту  $\tilde{M}$ ,  $\tilde{M}'$  і поздовжньої безрозмірної сили  $\tilde{N}$ ,  $\tilde{N}'$ , отримані для зразка з параметром  $\Delta = 0,172$  і зовнішнім діаметром  $D = 70,8$  мм. Відмінність між ними полягає в тому, що величини  $\tilde{M}$ ,  $\tilde{N}$  обчислювалися за умови, що товщина стінки труби є нерівномірною і змінюється у кільцевому напрямку за формулою (18), а для розрахунку значень  $\tilde{M}'$ ,  $\tilde{N}'$  приймалося припущення, то товщина стінки є умовно-постійною і дорівнює її середньому значенню  $\delta_0 = 1,25$  мм. Розрахунок параметрів  $\tilde{M}'$ ,  $\tilde{N}'$  здійснено за наведеною вище методикою при  $\tilde{\Delta} = 0$  і методикою роботи [6]. Різниця між відповідними результатами за цими методиками не перевищувала 0,5%.

Як видно з табл. 1, розбіжність між розрахунковими і експериментальними даними для труби з нерівномірною товщиною стінки у поперечному перерізі залишається порівняно невеликою протягом усього експериментального дослідження і переважно не перевищує 10%. Для поздовжньої сили в області розвинутих пластичних деформацій розбіжність дещо більша (20%).



Т а б л и ц я 1

## Порівняння теоретичних даних з експериментальними

Задані величини			Експериментальні значення		Розрахункові значення			
$\tilde{\kappa}_z \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon_0 \cdot 10^{-2}$	$\tilde{\sigma}_p$	$\tilde{N}$	$\tilde{M}$	$\tilde{N}$	$\tilde{M}$	$\tilde{N}'$	$\tilde{M}'$
0,024	-0,048	0,59	-0,096	0,085	-0,093	0,083	-0,105	0,109
0,045	-0,046	0,58	-0,070	0,180	-0,073	0,182	-0,097	0,208
0,063	-0,048	0,59	-0,075	0,265	-0,076	0,261	-0,105	0,290
0,137	-0,088	0,58	-0,125	0,395	-0,131	0,305	-0,202	0,444
0,180	-0,132	0,58	-0,195	0,380	-0,202	0,383	-0,271	0,427
0,257	-0,166	0,56	-0,160	0,490	-0,167	0,484	-0,245	0,520
0,435	-0,304	0,54	-0,195	0,565	-0,212	0,539	-0,293	0,565
0,715	-0,501	0,54	-0,170	0,650	-0,182	0,639	-0,272	0,655
0,960	-0,611	0,54	-0,100	0,740	-0,112	0,733	-0,214	0,748
1,186	-0,664	0,54	-0,031	0,780	-0,036	0,803	-0,126	0,758

Неточність розрахунків  $\tilde{N}'$  для цієї ж труби з умовно-постійною товщиною стінки зі збільшенням кривизни постійно зростає. Найбільша різниця між відповідними значеннями параметра поздовжньої стискної сили  $\tilde{N}$  і  $\tilde{N}'$  в зоні пластичних деформацій перевищувала 100%. Різниця між значеннями параметра згинального моменту  $\tilde{M}$  і  $\tilde{M}'$ , навпаки, зі збільшенням кривизни зменшується з 30% у пружній зоні до 3% при найбільшій пружній кривизні. Отже, врахування зміни товщини стінки для тонкостінних труб, що знаходяться під дією комбінованого навантаження, є необхідною умовою, що суттєво відчувається при розрахунках  $N$  у пластичній зоні.

Виконані порівняння експериментальних даних із розрахунковими показали, що побудована на базі деформаційної теорії пластичності математична модель задовільно узгоджується з експериментом і може бути використана при інженерних розрахунках тонкостінних трубопроводів з урахуванням пластичних деформацій та зміни товщини стінки труби вздовж контуру поперечного перерізу.

**Практичне застосування.** Практичне застосування розробленої методики проілюструємо на прикладі оцінки міцності послабленої втратою металу зони пружно викривленої у вертикальній площині по профілю траси ділянки трубопроводу діаметром 720 мм і товщиною стінки 9 мм, розташованої у щільному стабільному ґрунті. Ділянка знаходиться під внутрішнім тиском  $P = 5,5$  МПа, а безрозмірна кривизна зігнутої осі трубопроводу  $\tilde{\kappa}_z = 0,0005$ . Враховуючи протяжність трубопроводу та високий ступінь защемлення ґрунтом у поздовжньому напрямі, відповідно до п. 8.27 чинних норм [7] можна вважати, що ділянка працює в умовах, коли деформація осі  $\varepsilon_0 = 0$ . Матеріал труб – сталь 17Г1С; границя текучості  $\sigma_T = 360$  МПа; тимчасовий опір  $\sigma_B = 520$  МПа; відносне залишкове подовження  $\delta_5 = 20\%$ ; модуль пружності  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа; границя пропорційності  $\sigma_{\text{пц}} = 0,9\sigma_T$ .

Параметри схематизованої діаграми напружень визначали за умов її проходження через точки границь пропорційності і текучості та тимчасового опору ( $\sigma_B, \varepsilon_B$ ). Згідно з рекомендацією роботи [3], відносне подовження  $\varepsilon_B$ , що відповідає  $\sigma_B$ , прийнято приблизно рівним  $0,2\delta_5$ .

Дефектна зона вважається достатньо довгою, що дозволяє знехтувати впливом крайових ефектів на напружений стан середньої її частини. У кільцевому напрямі дефектна зона розташована симетрично відносно площини згину зі сторони стиснутих у поздовжньому напрямі волокон.

Зміну товщини стінки у кільцевому напрямі дефектного перерізу описано за допомогою косинусоїди, так що

$$\begin{aligned} \delta(\varphi) &= \delta && \text{при } 0 \leq \varphi \leq \frac{5}{6}\pi, \\ \delta(\varphi) &= \delta(1 - \tilde{\Delta}_1 \cos(3\varphi)) && \text{при } \frac{5}{6}\pi \leq \varphi \leq \pi, \end{aligned}$$

де  $\delta$  – номінальна товщина стінки;  $\tilde{\Delta}_1 = \Delta\delta/\delta$  – безрозмірний параметр зменшення товщини стінки;  $\Delta\delta = \delta - \delta_{\min}$ .

В табл. 2 наведено результати обчислень інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , відносної кільцевої деформації  $\varepsilon_\varphi$  і коефіцієнта запасу міцності  $n_B$  в найбільш небезпечній точці при  $\varphi = \pi$  та 50%-ному зменшенні товщини стінки,  $\tilde{\Delta} = 0,5$ . Там же подано відповідні результати для випадку, якби труба лежала на рівній основі ( $\tilde{\kappa}_z = 0$ ).

Т а б л и ц я 2

Вплив місцевого послаблення труби на коефіцієнт запасу міцності

$\tilde{\kappa}_z$	$\varepsilon_\varphi$	$\sigma_i$	$n_B$
0,0005	0,0069	1,088	1,291
0	0,0069	1,079	1,302

Як бачимо, викривлення труби неістотно впливає на значення інтенсивності напружень, зменшуючи запас міцності всього на 0,83%, так що основним навантажувальним фактором із точки зору порушення цілісності конструкції є внутрішній тиск. Розрахунки також показали, що у разі випробування трубопроводу інтенсивність напружень у найбільш послабленому місці досягне границі міцності матеріалу труби, якщо внутрішній тиск викличе в неослабленій стінці кільцеві напруження, рівні  $0,8\sigma_T$ .

## Резюме

Предложена методика теоретического и экспериментального исследования упругопластического состояния трубы с неравномерной толщиной стенки при комбинированном нагружении внутренним давлением, изгибающим моментом и продольной силой. Исследованию подвергали образцы металлических труб, толщину стенки которых в поперечном сечении описывали с

помощью косинусоидального закона. Для определения напряжений и деформаций за пределом упругости расчетным путем использовали деформационную теорию пластичности и безмоментную теорию тонкостенных оболочек. Выполнено сравнение экспериментальных данных с теоретическими. Приведен пример практического применения методики для оценки прочности ослабленной потерей металла зоны участка подземного магистрального трубопровода.

1. Піскунов В. Г., Присяжнюк В. К. Опір матеріалів з основами теорії пружності і пластичності: Підручник під ред. В. Г. Піскунова. У 2 ч., 5 кн. – Ч. 1, Кн. 1. Загальні основи курсу. – Київ: Вища шк., 1994. – С. 159 – 167.
2. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – Киев: Наук. думка, 1981. – 496 с.
3. Айнбиндер А. Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. – М.: Недра, 1991. – 287 с.
4. Krzemien W., Morawski B., Altevers H. D. Podwyższenie bezpieczeństwa, trwałości i ekonomiki użytkowania rurociągów przez “stresowe próby ciśnieniowe” // Materiały II Krajowej Konferencji Technicznej “Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów”. – Plock, 1999. – S. 147 – 155.
5. Білобран Б. С. Экспериментальные исследования чистого изгиба труб за пределом упругости // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 4. – С. 3 – 6.
6. Білобран Б. С., Кінаш О. Б. Пружнопластичний стан тонкостінної труби під тиском при згині з розтягом (стиском) // Пробл. прочности. – 1998. – № 6. – С. 99 – 106.
7. СНиП 2.05.06-85\*. Магистральные трубопроводы. – М.: ГУП ЦПП, 1997. – 60 с.

Поступила 04. 10. 99