

УДК 622.692.4

Б. Білобран

Професор, д-р техн. наук

Р. Якимечко

Аспірант

Національний університет
«Львівська політехніка»,
м. Львів

ВПЛИВ КРАЙОВОГО ЕФЕКТУ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН ТРУБОПРОВОДУ, ПІДСИЛЕНОГО СТАЛЕБЕТОННОЮ МУФТОЮ

Розглянуто задачу про напружений стан трубопроводу в зоні встановлення муфти на розширному бетоні. На підставі теорії циліндричних оболонок розроблено математичну модель для визначення напружень. Наведено результати дослідження локального напруженого стану для випадку підсилення газопроводу діаметром 1220 мм та їх порівняння з результатами розрахунків методом скінченних елементів.

трубопровід, напружено-деформований стан, муфта, крайовий ефект

У практиці експлуатації магістральних трубопроводів для підсилення дефектних зон широко застосовують різного типу накладні муфти без наповнювача і з наповнювачем, склопластикові бандажі на синтетичній основі та ін. [1 — 4].

Відновлення несучої здатності послаблених різного роду дефектами зон лінійної частини магістральних нафтогазопроводів накладними муфтами на розширному бетоні [5] належить до нових перспективних методів їх ремонту. Важливою перевагою цього методу поряд з можливістю застосування на обводнених ділянках є також можливість істотно зменшувати максимальні кільцеві напруження у зоні дефекту внаслідок обтискування трубопроводу ефектом розширення бетону під час твердіння.

Теоретичні й експериментальні дослідження впливу ефекту обтискування на напружено-деформований стан трубопроводу під муфтою виконано у працях [6 — 7].

Метою цієї статті є оцінка впливу крайового ефекту на збурення напруженого стану трубопроводу в зоні встановлення ремонтної муфти на розширному бетоні.

Розглянемо ділянку трубопроводу зовнішнім діаметром D і товщиною стінки h , що перебуває в умовах плоскої деформації під внутрішнім тиском p , на який накладено

муфту на розширному бетоні завдовжки $2l_0$. При цьому вважатимемо, що через розширення бетону під час отвердіння на його контактній поверхні з трубопроводом виникає еквівалентний гідростатичному тиск p_c .

Дослідимо збурення напружено-деформованого стану в трубопроводі, яке спричинює вплив крайового ефекту за дії на контактній поверхні тиску p_c .

Розрахункову схему ділянки трубопроводу (рис. 1,а) вибираємо у вигляді довгої циліндричної оболонки, середня частина якої завдовжки $2l_0$ перебуває під внутрішнім тиском $p_0 = p - p_c$ і до якої примикають з обох боків напівнескінченні ділянки під тиском p .

Оскільки трубопровід працює в умовах плоскої деформації, то у поперечних перерізах оболонки діє поздовжня сила N і пов'язані з нею нормальні напруження, що визначаються за формулою

$$\sigma_{xN} = \frac{\mu p R}{h} - E \alpha \Delta T, \quad (1)$$

де $R = (D - h) / 2$ — середній радіус поперечного перерізу; E , μ , і α — модуль пружності, коефіцієнт Пуасона і температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу трубопроводу.

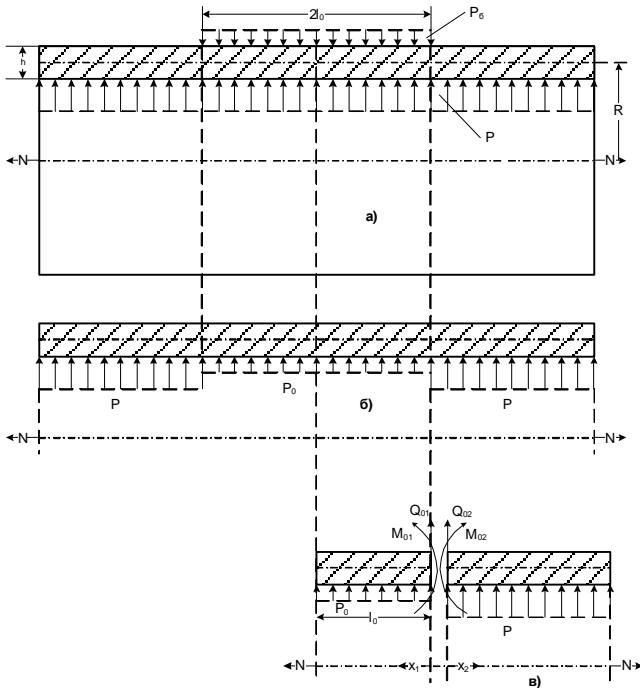


Рис. 1. Розрахункова схема підсиленої ділянки трубопроводу

У зонах спряження ділянок різка зміна тисків спричинює згин стінки у поздовжньому напрямі та виникнення місцевих напружень.

З огляду на симетричність вибраної розрахункової схеми відносно середнього перерізу підкріпленої муфтою частини, достатньо обмежитися дослідженням напружено-деформованого стану її половини. При цьому оболонку вважатимемо достатньо жорсткою та знехтуємо впливом осьового напруження σ_{xN} на згин твірної.

Вибираючи початок координат у стиковому перерізі (рис. 1, в), відповідно до теорії осесиметричних циліндричних оболонок [8] загальні вирази для прогинів (радіальних переміщень) можна записати у вигляді:

— для I (короткої) частини:

$$w_1 = \frac{p_0 R^2}{Eh} + e^{\beta x_1} (C_1 \cos \beta x_2 + C_2 \sin \beta x_1) + e^{-\beta x_1} (C_3 \cos \beta x_1 + C_4 \sin \beta x_1); \quad (2)$$

— для II (напівнескінченної) частини:

$$w_2 = \frac{pR^2}{Eh} + e^{-\beta x_2} (C_5 \cos \beta x_2 + C_6 \sin \beta x_2). \quad (3)$$

Тут $\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2) / \sqrt{Rh}}$ — геометричний параметр.

У виразі для другої ділянки опущено члени з множником $e^{\beta x_2}$, оскільки в міру віддалення від краю (початку координат) прогини, пов'язані з крайовим ефектом, повинні зменшуватися до нуля.

Оболонку можна вважати відносно жорсткою та не враховувати вплив осьового напруження σ_{xN} на згин твірної за умови [9]

$$\sigma_{xN} \ll \frac{Eh}{\sqrt{3(1-\mu^2)}R}. \quad (4)$$

За відомої функції прогинів w можна визначити кути повороту нормалі Φ , згинальні моменти M_x , поперечні сили Q_x та кільцеві зусилля N_θ [8]:

$$\Phi = \frac{dw}{dx}; \quad M_x = B \frac{d^2 w}{dx^2}; \quad Q_x = B \frac{d^3 w}{dx^3}; \quad N_\theta = Eh \frac{w}{R}, \quad (5)$$

де B — циліндрична жорсткість, яка визначається за формулою $B = Eh^3 / [12(1-\mu^2)]$.

Для визначення сталей C_1 — C_6 скористаємося умовами нерозривності прогину, кута повороту, згинального моменту і поперечної сили для стикового перерізу та умовами, що впливають із симетрії згину короткої частини розрахункової схеми.

Для стикового перерізу: при $x_1 = x_2 = 0$:

$$w_1 = w_2; \quad \frac{dw_1}{dx_1} + \frac{dw_2}{dx_2} = 0; \quad \frac{d^2 w_1}{dx_1^2} = \frac{d^2 w_2}{dx_2^2};$$

$$\frac{d^3 w_1}{dx_1^3} = -\frac{d^3 w_2}{dx_2^3}. \quad (6)$$

Для середнього перерізу підкріпленої частини при $x_1 = l_0$ кут повороту Φ_1 та поперечна сила Q_1 дорівнюють нулю:

$$\frac{dw_1}{dx_1} = 0; \quad \frac{d^3 w_1}{dx_1^3} = 0. \quad (7)$$

Знайшовши значення сталей C_1 — C_6 , на підставі виразів (2), (3) і (5) неважко визначити внутрішні зусилля в обох частинах розрахункової схеми.

Нормальні напруження біля поверхневих точок — поздовжні σ_x , що виникають у поперечних перерізах, кільцеві σ_θ , що виникають у поздовжніх перерізах, та еквівалентні напруження за теорією міцності Губера-Мізеса визначаються за формулами [8]:

$$\sigma_x = \sigma_{xN} \pm \frac{6M_x}{h^2}; \quad \sigma_\theta = \frac{N_\theta}{h} \pm \frac{6\mu M_x}{h^2};$$

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_\theta + \sigma_\theta^2}. \quad (8)$$

Тут знак «плюс» відповідає зовнішній, а «мінус» — внутрішній поверхням оболонки.

Викладену вище розрахункову модель застосовано для дослідження локального напружено-деформованого стану в ділянці діючого магістрального газопроводу діаметром 1220 мм і товщиною стінки 12 мм (сталь 17ГС), підсиленого муфтою з плоскими днищами завдовжки 600 мм, діаметром 1420 мм і товщиною стінки 15,7. Муфту встановлено на підземній прямолінійній ділянці (робочий тиск 4,2 МПа). Проміжок між трубою і муфтою заповнено

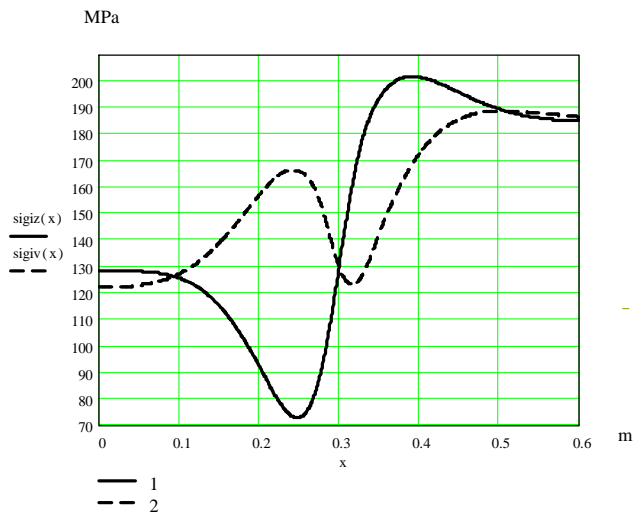


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень біля зовнішньої (крива 1) та внутрішньої (крива 2) поверхонь від середини муфти

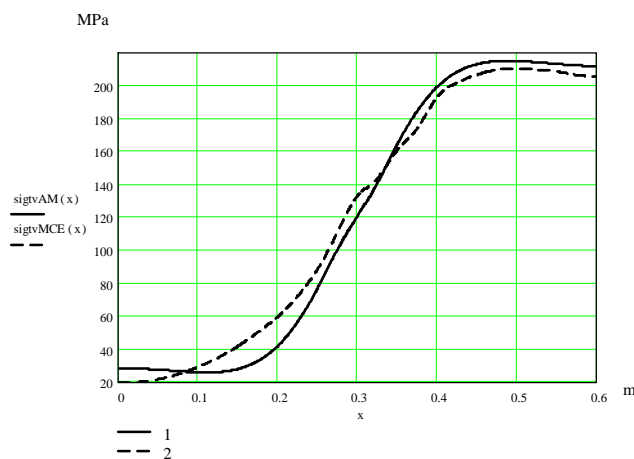


Рис. 3. Залежності коефіцієнта збільшення еквівалентних напружень у зоні впливу крайового ефекту на зовнішній (крива 1) і внутрішній (крива 2) поверхнях труби від температурного перепаду

розширювальним бетоном, через отвердіння якого в міжтрубному просторі створено тиск 3,6 МПа. Відповідно $p_0 = 0,6$ МПа.

Модуль пружності і коефіцієнта Пуасона бетонного шару ($E=1,42 \cdot 10^4$ МПа, $\mu=0,16$) визначено за результатами випробування циліндричних зразків, виготовлених з бетонної суміші, що використана в змонтованій на газопроводі муфті.

Оскільки точно не відома температура монтажу, за якої формувалась статистична невизначеність системи (зварювання в нитку, укладання в траншею), то виконано дослідження впливу можливого температурного перепаду в межах $\Delta T = -30 \dots +30$ °С на максимальні значення еквівалентного напруження у зоні впливу крайового ефекту (рис. 2 — рис. 4).

Як бачимо з рис. 2, потовщення трубопроводу муфтою впливає на його напружено деформований стан лише безпосередньо близько до країв муфти. З віддаленням від краю муфти місцеві напруження швидко згасають. Так на віддалі 0,25...0,3 м від краю муфти еквівалентні напруження істотно не відрізняються від відповідних їх значень за межами впливу крайового ефекту.

З достатньою для практики точністю можна вважати, що для тонкостінних труб вплив крайового ефекту розповсюджується від торця муфти на непідкріплену ділянку трубопроводу приблизно на половину радіуса труби.

Максимальне значення еквівалентних напружень від впливу крайового ефекту й розташування точок, де воно виникає, певною мірою залежить від величини температурного перепаду (рис. 3).

Так, за $\Delta T = -30$ °С максимальне еквівалентне напруження виникає в точках біля зовнішньої поверхні на віддалі $0,17R$ (10,3 см) і на 8,6 % більше, ніж за межами впливу крайового ефекту. У разі $\Delta T = 30$ °С максимальне еквівалентне напруження виникає в точках біля внутрішньої поверхні на віддалі $0,21R$ (12,5 см) і на 5,0 % більше, ніж за межами впливу крайового ефекту.

Для оцінки вірогідності запропонованого аналітичного методу розрахунку напруженого стану трубопроводу в зоні впливу крайового ефекту виконано також розрахунки методом скінченних елементів (МСЕ) з урахуванням обтискування трубопроводу бетонним кільцем. Порівняльний аналіз показав, що здебільшого максимальні значення еквівалентних напружень, визначені за нашою аналітичною методикою (АМ), дещо більші від значень $\max \sigma_{екв}$, розрахованих МСЕ.

У табл. 1 наведено порівняння результатів розрахунків, отриманих обома методами для двох значень температурного перепаду. Як бачимо, найбільша розбіжність між отриманими результатами не перевищує 5,2 — 15,5 %. Задовільно також корелюють результати розрахунків кільцевих напружень на внутрішній поверхні (рис. 4).

Отже, аналітичний метод дає можливість отримувати придатну для практичних розрахунків точність максимальних значень еквівалентних напружень і місця їх виникнення, а також кільцевих напружень у зоні встановлення муфти.

Таблиця 1

Порівняння максимальних еквівалентних напружень у трубопроводі та віддалі від краю муфти до небезпечного поперечного перерізу АМ і МСЕ

$\Delta T, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\max \sigma_{екв}, \text{ МПа}$			$x_0, \text{ м}$		
	АМ	МСЕ	$\delta, \%$	АМ	МСЕ	$\delta, \%$
-30 С	201,7	191,2	5,2	0,103	0,097	3,0
30 С	227,8	225,0	1,2	0,125	0,148	15,5

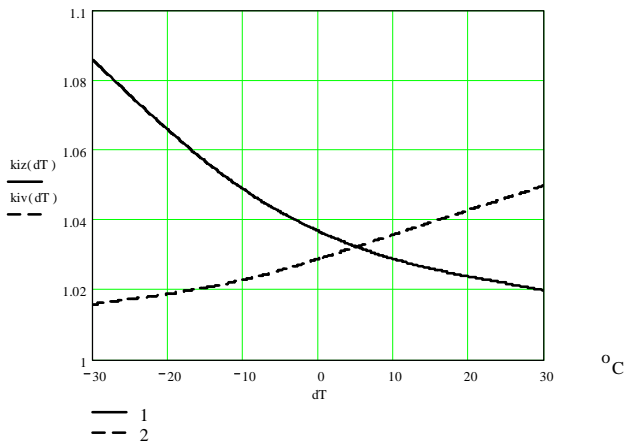


Рис. 4. Розподіл кільцевих напружень біля внутрішньої поверхні від середини муфти: AM — крива 1, МСЕ — крива 2

Проте результати розрахунків напруженого стану в точках біля зовнішньої поверхні під муфтою, особливо поблизу торця муфти, за аналітичною методикою є менш точними, оскільки ця модель не враховує у цих місцях концентрації контактних напружень від опору обтискуванню муфтою суміжних виступаючих ділянок трубопроводу.

Висновки. 1. Збурення напружено-деформованого стану у трубопроводі через крайовий ефект має хвилювий загасаючий характер і з точністю до 5 % можна вважати, що воно розповсюджується від торця муфти на віддаль половини радіуса труби.

2. Найбільше еквівалентне напруження за Губером — Мізесом виникає недалеко від торця муфти і за температурного перепаду $\Delta T = -30$ °C лише на 8,6 % перевищує його значення до накладання муфти.

3. Обтискування трубопроводу бетонним шаром дає можливість зменшити робочі кільцеві напруження посередині муфти у 7,3 разів, з 211,4 МПа до 28,8 МПа.

4. Порівняння результатів, отриманих за нашою методикою і МСЕ, свідчить про їх задовільну збіжність та придатність запропонованої аналітичної методики для практичних розрахунків напруженого стану трубопроводу за межами муфти, а також його розрахунків у точках біля внутрішньої поверхні під муфтою.

1. Гумеров А.Г., Н.Х.Гаскаров и др. Методы повышения несущей способности действующих нефтепроводов. Обз. инф. Серия "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов". — М.: ВНИИОЭНГ. — 1983. — 56 с.

2. Лыщенко Л.З. Ремонт линейной части нефтепроводов. Обз. Инф. Серия "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов". — М.: ВНИИОЭНГ. — 1983. — 35 с.

3. Фокин М.Ф., Трубицын В.А. и др. Методы восстановления несущей способности линейной части магистральных нефтепроводов. — М.: ВНИИОЭНГ, 1986. — 36 с.

4. Шлапак Л.С., Розганюк В.В., Кадай С.І., Дрогомирецький М.М. Ремонт дефектних ділянок газопроводів з використанням композитних підсилюючих бандажів // Нафт. і газова пром. — 2001. — №6. — С. 55—57.

5. Спосіб ремонтування магистрального трубопроводу: Пат 38190 А, Україна // Дрогомирецький М.М., Петровський Б.С., Рильніков Б.С., Білобран Б.С., Якимечко Я.Б.(UA). — №2000063271. Заявлено 06.06.00. Опубл. 15.05.01. Бюл. №4. - 2с.

6. Білобран, Б.С., Рильніков Б.С., Якимечко Я.Б. Оцінка напруженого стану трубопроводу, підсиленого бандажем на розширному бетоні // Бетон і железобетон в Україні. — 2005. — №3. — С. 13—16.

7. Білобран Б.С., Рильніков Б.С., Якимечко Я.Б., Дрогомирецький М.М., Петровський Б.С. Стендові випробування труби підсиленої бандажем на розширному бетоні / Зб. наук. праць. ФМІ ім. Г.В. Карпенка "Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій". — Л.: Каменяр, 2005. — Вип. 7. — С. 13—18.

8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986. — 512 с.

9. Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. — М.: Наука, 1973. — 400 с.

Отримана 10.08.08

B. Bilobran, R. Yakymchko

The influence of edge effect on strain state of pipeline reinforced by a steel-concrete bandage

National University «Lvivska Politechnika», Lviv

The pipeline's stress-strain state task in the zone of expanding concrete bandage was considered. The mathematical model for stress definition was developed using the cylindrical shells theory. The results of stress-strain state investigation of 1220 mm diameter pipeline were presented and compared with results of calculations using FEA.

21 ôîðì àö³ÿ

WIND TURBINE WAKES

20 October 2009 — 22 October 2009

Universidad Politécnica de Madrid, Spain

Contact: Prof. Antonio Crespo

Departamento de Ingeniería Energetica y Fluidomecanica E.T.S.I. Industriale

Universidad Politecnica de Madrid

Jose Gutierrez Abascal, 228006 Madrid, Spain

phone: +34 91 336 3152; fax: +34 91 336 3006

email: crespo@etsii.upm.es