

УДК 539.371

## Оцінювання підсилювальної здатності композитного бандажу в сучасних системах ремонту трубопроводів

Савчук Є.В., Рубашевський В.В., Шукраєв С.М.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація:** Тривала експлуатація трубопроводів, яка в багатьох випадках перевищує нормативний термін, зумовлює експлуатаційне старіння металу та появу локальних корозійно-механічних пошкоджень. Застосування композитних матеріалів для посилення зношених трубопроводів – одна з найбільш перспективних сучасних технологій.

У дослідженні виконано порівняльний аналіз розрахунків сталевий труби підсиленої композитом за методом скінчених елементів (МСЕ) та згідно з ДСТУ ISO 24817:2019. Числові розрахунки за МСЕ виконувалися згідно з планом повного факторного експерименту (три фактори на трьох рівнях, всього двадцять сім розрахунків). За результатами розрахунків побудовано регресійну модель, яка оцінює колову деформацію на зовнішній поверхні труби в залежності від товщини бандажу, товщини труби, та внутрішнього тиску. Розрахунки за МСЕ продемонстрували хорошу відповідність аналітичним результатам.

**Ключові слова:** ремонт трубопроводів; бандаж; композитні матеріали; метод скінчених елементів; планування експерименту.

Дослідженням щодо застосування композитних матеріалів в системах ремонту трубопроводів присвячено багато робіт як вітчизняних, так і закордонних фахівців [1–3]. Створена відповідна нормативна база, зокрема, розроблені міжнародні стандарти щодо композитного ремонту трубопроводів [4–5]. Але зацікавленість у розробці методів проектування композитних систем ремонту трубопроводів зберігається, що пояснюється як появою нових композиційних матеріалів, так і розвитком самих методів проектування.

Метою цієї роботи є проведення порівняльного аналізу розрахунків системи «трубопровід – композитний бандаж», виконаного за методом скінчених елементів (МСЕ) та аналітичним шляхом у відповідності до ДСТУ ISO 24817:2019. Побудова та проведення числового експерименту з широким варіюванням таких факторів, як товщина бандажу, товщина труби, та внутрішній тиск; оцінці впливу перелічених факторів на колову деформацію, що виникає на зовнішній поверхні труби, та узагальненні результатів дослідження шляхом побудови відповідної регресійної моделі, що може бути застосована до оптимального проектування системи.

У відповідності до стандартів ISO/ASME [4–5] композитні бандажі використовуються задля ремонту та укріплення труб як і з виявленими дефектами чи корозією, так і для нових труб заради підвищення їх довговічності. На рис. 1 зображено стандартну схему системи «труба – композитний бандаж» та основні параметри що розглядаються у розрахунках. Також розглядаються лише пружні деформації труби, так як приймається умова однакових деформацій труби та бандажу.

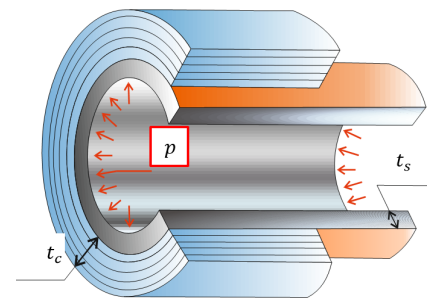


Рис. 1 Схема «трубопровід – композитний бандаж»

$$\varepsilon_c = \frac{(P_{int} - P_{live})D}{2(E_s t_s + E_c t_c)}$$

$$\varepsilon_s = \frac{(P_{int} - P_{live})D}{2(E_s t_s + E_c t_c)} + \frac{P_{live}D}{2t_s E_s} \quad (1)$$

де,  $\varepsilon_c$  – деформація композиту,  $\varepsilon_s$  – деформація труби,  $P_{int}$  – експлуатаційний тиск і  $P_{live}$  – тиск за якого відбувається встановлення бандажу.

У розрахунках прийнято, що бандаж встановлюється на «ненадуту» трубу ( $P_{live} = 0$ ). Тоді рівняння набувають такого вигляду:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s = \frac{pD}{2(E_s t_s + E_c t_c)} \quad (2)$$

За допомогою закону Гука можна легко перейти до напружень що виникають у сталі. Ітеративно, можливо прийти до оптимального значення товщини бандажу за яких буде виконуватися умови міцності композиту та труби.

Для перевірки наведеного підходу була створена числова модель четвертої частини (1/4) перерізу труби. Моделювання виконувалось з застосуванням ANSYS Mechanical. Діаметр труби для усіх точок числового експерименту становить 219 мм. Відтворювався плоский напружений стан з застосуванням плоских скінченних елементів. За матеріал труби була обрана сталь, з модулем пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа та коефіцієнтом Пуассона,  $\mu = 0.3$ , а для бандажу було обрано орієнтовні значення, характерні для вуглепластикових композитів,  $E = 1.148 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0.275$ .

Числовий розрахунок за МСЕ виконувався згідно з планом повного факторного експерименту  $3^3/27$  (три фактори на трьох рівнях, 27 розрахунків). За незалежні фактори були обрані: товщина бандажу  $t_c$ , що змінювалась на трьох рівнях: 2 мм, 5 мм, 8 мм; товщина труби  $t_s$  (4 мм, 8 мм, 12 мм), та внутрішній тиск  $p$  (2 МПа, 16 МПа, 30 МПа). Функція відгуку визначалася як десятинний логарифм колової деформації на зовнішній поверхні труби  $\hat{y} = \log_{10} e_c$ . Відповідна регресійна модель записується таким чином:

$$\begin{aligned} \hat{y} = \log_{10} e_c = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 z_1 + b_5 z_2 + b_6 z_3 + \\ & + b_7 x_1 x_2 + b_8 x_2 x_3 + b_9 x_3 x_1 + b_{10} x_1 z_2 + b_{11} x_1 z_3 + b_{12} x_2 z_1 + b_{13} x_2 z_3 + \\ & + b_{14} x_3 z_1 + b_{15} x_3 z_2 + b_{16} z_1 z_2 + b_{17} z_2 z_3 + b_{18} z_3 z_1 + b_{19} x_1 x_2 x_3 + b_{20} z_1 x_2 x_3 + \\ & + b_{21} x_1 z_2 x_3 + b_{22} x_1 x_2 z_3 + b_{23} x_1 z_2 z_3 + b_{24} z_1 x_2 z_3 + b_{25} z_1 z_2 x_3 + b_{26} z_1 z_2 z_3, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $x_1, x_2, x_3, z_1, z_2, z_3$  – кодовані значення факторів  $t_c, t_s$  та  $P$ , які визначаються як:  $x_1 = 1/3 \cdot (t_c - 5)$ ,  $z_1 = 3 \cdot (x_1^2 - 2/3)$ ;  $x_2 = 1/4 \cdot (t_s - 8)$ ,  $z_2 = 3 \cdot (x_2^2 - 2/3)$ ;  $x_3 = 1/14 \cdot (p - 16)$ ,  $z_3 = 3 \cdot (x_3^2 - 2/3)$ .

В таблиці 1 представлені натуральні і кодовані значення факторів та результати випробувань. Обраний план експерименту відповідає критеріям D-оптимальності та ортогональності.

Таблиця 1. Натуральні і кодовані значення факторів та результати розрахунків

№	Натуральні значення факторів			Кодовані значення факторів						Результати			
										МСЕ		ДСТУ ISO 24817:2019	
	$t_c$	$t_s$	$p$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$e_c, \%$	$\log_{10} e_c$	$e_c, \%$	$\log_{10} e_c$
1	2	4	2	-1	-1	-1	1	1	1	0.02	-3.68	0.021	-3.691
2	5	4	2	0	-1	-1	-2	1	1	0.016	-3.806	0.016	-3.806
3	8	4	2	1	-1	-1	1	1	1	0.013	-3.903	0.013	-3.892
4	2	8	2	-1	0	-1	1	-2	1	0.011	-3.938	0.012	-3.966
5	5	8	2	0	0	-1	-2	-2	1	0.009	-4.013	0.010	-4.032
6	8	8	2	1	0	-1	1	-2	1	0.008	-4.077	0.008	-4.085
7	2	12	2	-1	1	-1	1	1	1	0.007	-4.104	0.008	-4.150
8	5	12	2	0	1	-1	-2	1	1	0.006	-4.157	0.007	-4.195
9	8	12	2	1	1	-1	1	1	1	0.006	-4.205	0.006	-4.233

№	Натуральні значення факторів			Кодовані значення факторів						Результати			
										MSE		ДСТУ ISO 24817:2019	
	$t_c$	$t_s$	$p$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$e_c, \%$	$\log_{10} e_c$	$e_c, \%$	$\log_{10} e_c$
10	2	4	16	-1	-1	0	1	1	-2	0.163	-2.777	0.167	-2.788
11	5	4	16	0	-1	0	-2	1	-2	0.125	-2.903	0.125	-2.903
12	8	4	16	1	-1	0	1	1	-2	0.103	-3.000	0.100	-2.989
13	2	8	16	-1	0	0	1	-2	-2	0.087	-3.035	0.092	-3.063
14	5	8	16	0	0	0	-2	-2	-2	0.074	-3.110	0.078	-3.129
15	8	8	16	1	0	0	1	-2	-2	0.066	-3.174	0.067	-3.182
16	2	12	16	-1	1	0	1	1	-2	0.057	-3.201	0.063	-3.247
17	5	12	16	0	1	0	-2	1	-2	0.051	-3.254	0.056	-3.292
18	8	12	16	1	1	0	1	1	-2	0.047	-3.302	0.050	-3.330
19	2	4	30	-1	-1	1	1	1	1	0.306	-2.504	0.313	-2.515
20	5	4	30	0	-1	1	-2	1	1	0.235	-2.63	0.235	-2.630
21	8	4	30	1	-1	1	1	1	1	0.192	-2.727	0.188	-2.716
22	2	8	30	-1	0	1	1	-2	1	0.162	-2.762	0.173	-2.790
23	5	8	30	0	0	1	-2	-2	1	0.139	-2.837	0.146	-2.856
24	8	8	30	1	0	1	1	-2	1	0.123	-2.901	0.126	-2.909
25	2	12	30	-1	1	1	1	1	1	0.106	-2.928	0.118	-2.974
26	5	12	30	0	1	1	-2	1	1	0.096	-2.981	0.104	-3.019
27	8	12	30	1	1	1	1	1	1	0.088	-3.029	0.094	-3.057

За методом найменших квадратів були одержані оцінки коефіцієнтів регресійної моделі (3). За відсутності паралельних дослідів і дисперсії відтворення, для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії (3) використовували наступну процедуру [6]. Спершу, всі коефіцієнти були проанжовані за параметром (3):

$$t_j = \frac{|b_j|}{s_Y \sqrt{c_{jj}}} \quad (4)$$

де  $b_j$  – значення відповідного  $j$ -го коефіцієнта рівняння регресії;  $s_Y$  – середнє квадратичне відхилення функції відгуку відносно загального середнього;  $c_{jj}$  – діагональні елементи матриці дисперсій-коваріацій.

Після ранжування з рівняння (3) було виключено ряд коефіцієнтів. Виключення коефіцієнтів здійснювалося до тих пір, поки зменшувалася залишкова дисперсія.

$$\hat{y} = \log_{10} e_c = -3.312 - 0.067x_1 - 0.198x_2 + 0.588x_3 + 0.003z_1 + 0.011z_2 - 0.105z_3 + 0.030x_1x_2 - 0.004x_1z_2 - 0.002x_2z_1 \quad (5)$$

Якість отриманої моделі (5) було оцінено за критерієм Фішера, де залишкова дисперсія  $s_{\text{зал}}^2$  порівнювалась з дисперсією функції відгуку відносно загального середнього  $s_Y^2$  [6]. Розрахункове значення статистики Фішера  $F = 1.53 \cdot 10^5$  є більшим за табличне значення критерію  $F_{\text{табл}} = 2.2195$  за рівня значущості  $\alpha = 0.05$ , що засвідчує адекватність моделі.

На рис. 2 представлено порівняння розрахунків за регресійною моделлю (суцільна лінія) та за ДСТУ ISO 24817:2019 (точки). Точки на діаграмі розташовані в порядку заданому у таблиці 1. Для зручності діаграма розділена на зони з позначенням значень застосованих параметрів в цих зонах.



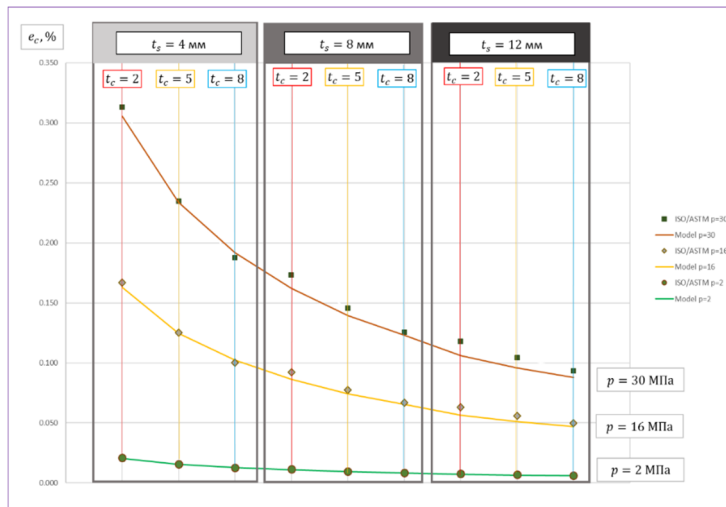


Рис. 2 Результати розрахунків колової деформації на зовнішній поверхні труби  $e_c$  в залежності від товщини бандажу  $t_c$ , товщини труби  $t_s$  та внутрішнього тиску  $p$ : суцільна лінія – за регресійною моделлю (5), точки - за рівнянням (1)

2. Розрахунки за методом скінчених елементів продемонстрували хорошу відповідність аналітичним результатам, отриманими за ДСТУ ISO 24817:2019, похибка не перевищувала 2%.

#### Список літератури

1. Lim, Kar Sing, et al. "An overview of corroded pipe repair techniques using composite materials." *Int. J. Mater. Metall. Eng* 10.1 (2016): 19-25.
2. Оптимальне проектування композитних бандажів для ремонту трубопроводів / І.Г. Львов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2017. – № 40 (1262). – С. 37-42.
3. Dumitrescu, Andrei, et al. "Corrosion Repair of Pipelines Using Modern Composite Materials Systems: A Numerical Performance Evaluation." *Energies* 14.3 (2021): 615.
4. ДСТУ ISO 24817:2019 Нафтова, нафтохімічна та газова промисловість. Композитний ремонт трубопроводів. Кваліфікація та проектування, монтажування, випробування та перевіряння (ISO 24817:2017, IDT)
5. ASME PCC-2-2015: Repair of Pressure Equipment and Piping.
6. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.

## Assessment of the reinforcing ability of a composite bandage for modern pipeline repair systems

Savchuk Eugen, Rubashevskiy Viktor, Shukayev Sergiy

**Abstract.** The long-term operation of pipelines, which, in many cases, exceeds their regulatory service life, causes the strain ageing of metal, as well as the appearance of local mechano-corrosive damages. In this regard, the use of composites to reinforce worn pipelines constitutes one of today's most promising technologies.

In this study, a comparative analysis was performed between the composite-reinforced steel pipe calculations that were conducted using the finite element method (FEM), and those that were conducted in accordance with the DSTU ISO 24817:2019 standard. The FEM numerical calculations were carried out using the complete factorial experiment design (consisting of three factors at three levels, with twenty-seven calculations in total). Based on the results of these calculations, a regression model was developed to assess the circular deformation of the pipe's outer surface depending on the thickness of the bandage, the thickness of the pipe, and the internal pressure. The FEM calculations were found to be in close agreement with analytical results.

**Keywords:** pipeline; repair system; bandage; composite material; finite element method; design-of-experiment.

Аналіз виконаних розрахунків за МСЕ та рівнянням (2) засвідчив їх добру кореляцію між собою, похибка у логарифмічних величинах не перевищувала 2%, а в натуральних величинах – 12%. Розглянутий підхід може застосовуватися для обрання найбільш адекватного рішення щодо проектування композитної системи ремонту.

#### Висновки:

1. Одержана регресійна модель в межах факторного простору дозволяє достовірно оцінити вплив як розглянутих факторів, так і їх взаємодій на коловоу деформацію на зовнішній поверхні труби.