

УДК 539.371

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

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Вплив конструкційних та експлуатаційних факторів на напружений стан системи «труба – композитний бандаж»

Магістральні трубопроводи, водопровідні труби, труби що перебувають під високим тиском є основними засобами роботи систем водопостачання, транспортування вуглеводнів, палива тощо. Завдяки широкому застосуванню труб, виникає потужний запит на технології що забезпечать довговічність таких конструкцій. Перепади внутрішнього тиску, агресивне середовище разом з виробничими дефектами є ризиками виникнення аварійних ситуацій. Зазвичай порушення структурної цілісності трубопроводу становить значну загрозу навколишньому середовищу та безпеці людей. Аварії паливних трубопроводів є особливо небезпечними, так як можуть супроводжуватися займанням вмісту труби та миттєвим вивільненням значної кількості енергії; вибухом. Застосування укріплюючих елементів, бандажів, що допомагають зняти з труби зайве навантаження, значно підвищує термін експлуатації. Ізолювання труби під композитним бандажем також захищає її від корозії, зменшує негативний вплив дефектів, а сам процес не вимагає припинення експлуатації трубопроводу. Подібними темами, проектуванням композитних бандажів, також займалися вітчизняні та закордонні фахівці [1, 2, 3].

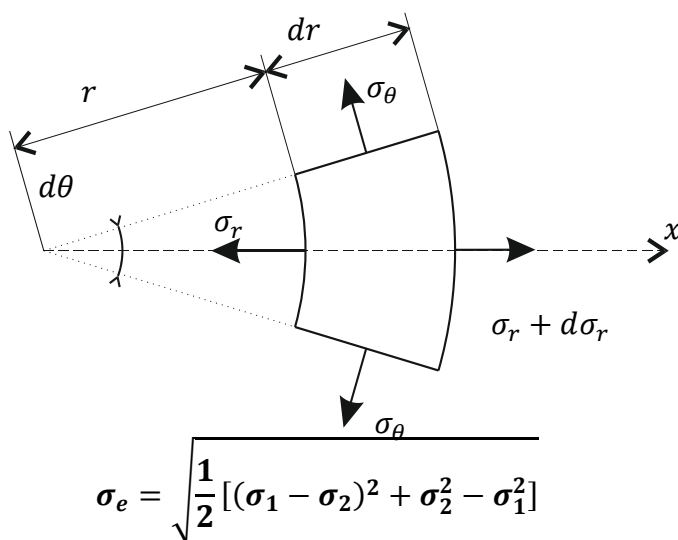
21

Метою роботи було дослідження впливу ряду конструкційних та експлуатаційних факторів на напружений стан труби за умови її укріплення композитним бандажем (бандажування). Методологія дослідження базувалася на застосуванні теорії планування експерименту та регресійного аналізу. Було виконано чисельний експеримент за методом скінчених елементів і побудована регресійна модель, яка описує залежність максимального еквівалентного напруження на внутрішній поверхні труби від внутрішнього тиску та товщин стінки труби і шару композитного бандажу.

Моделювання труби укріпленої бандажем

Для побудови чисельного експерименту було використано можливості Ansys Workbench у середовищі Mechanical. Серед інших програм МСЕ, Workbench має потужний функціонал для параметризації моделей та побудови

поверхні відгуку. Задача виконувалась у пласкій постановці, таким чином розв'язок збігається з аналітичним розв'язком задачі Ламе [4]. Згідно аналітичного розв'язку для труби навантаженої внутрішнім тиском напружено-деформований стан (НДС) буде визначатися за нижче наведеними формулами.



r_2 – Зовнішній радіус
 r_1 – Внутрішній радіус
 σ_e – еквівалентні напруження

Рис. 1 Визначення НДС Труби

У всіх розрахунках при визначенні еквівалентних напружень поздовжнє навантаження не враховувалося. Модель зображена на Рис. 2 складається з труби та бандажу. Відтворювався сегмент труби (1/4) перерізу труби. Зовнішній радіус для усіх розрахунків брався 219 мм.

22

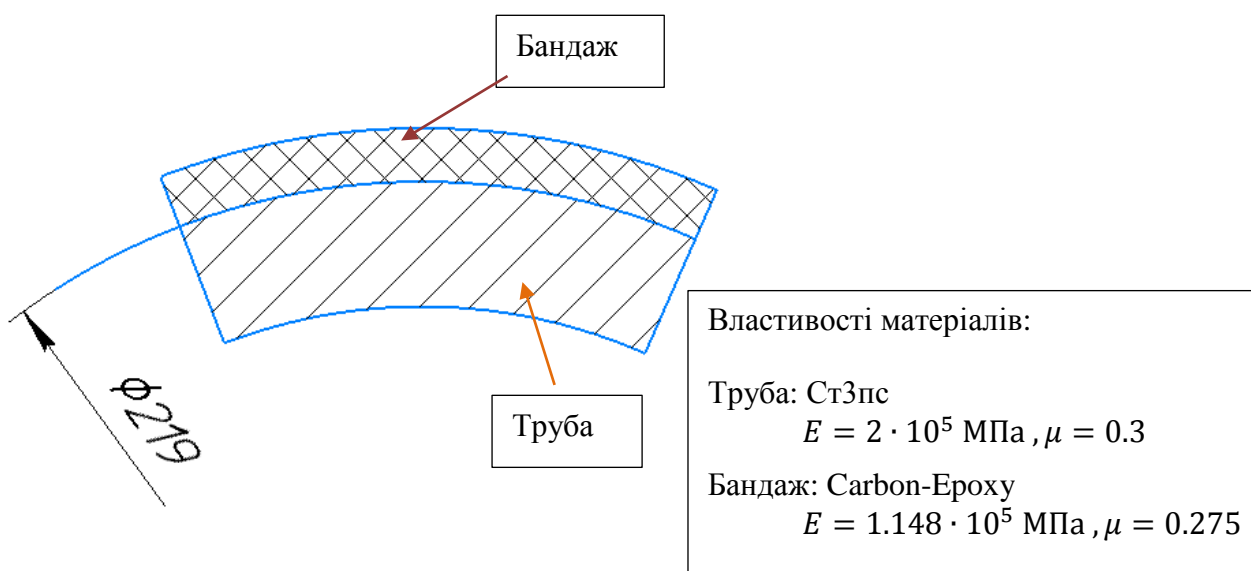


Рис. 2 Схема труби з бандажем

Труба навантажена внутрішнім тиском. Контакт між елементами труби та бандажу визначений як жорсткий (bonded), так як зсув чи відрив бандажу не очікується.

Планування чисельного експерименту

Розрахунок виконувався без врахування нелінійних властивостей матеріалу, припускалося, що композитний матеріал деформується пружно.

Розрахунки моделі труби з бандажем виконували відповідно до плану повного факторного експерименту $3^3//27$: три фактори на трьох рівнях, всього 27 дослідів. Змінними факторами що змінювалися на трьох рівнях було обрано: товщина бандажу: 4 мм, 6 мм, 8 мм, товщину труби h : 4 мм, 8 мм, 12 мм, та внутрішній тиск в трубі P : 2 МПа, 16 МПа, 30 МПа. Функцією відгуку \hat{y} вибрано максимальне еквівалентне напруження за Мізесом на внутрішній поверхні труби σ_{eqv} у МПа.

Регресійна модель, що відповідає обраному плану експерименту має наступний вигляд (1):

$$\hat{y} = (\sigma_{eq})_{max} = b_0 + b_1x_1 + b_2z_1 + b_3x_2 + b_4z_2 + b_5x_3 + b_6z_3 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 + b_{10}x_1z_2 + b_{11}x_1z_3 + b_{12}x_2z_1 + b_{13}x_2z_3 + b_{14}x_3z_1 + b_{15}x_3z_2 + b_{16}z_1z_2 + b_{17}z_1z_3 + b_{18}z_2z_3 + b_{19}x_1x_2x_3 + b_{20}z_1x_2x_3 + b_{21}x_1z_2x_3 + b_{22}x_1x_2z_3 + b_{23}x_1z_2z_3 + b_{24}z_1x_2z_3 + b_{25}z_1z_2x_3 + b_{26}z_1z_2z_3. \quad \#(1)$$

$x_1, x_2, x_3, z_1, z_2, z_3$ - кодовані значення факторів δ, h та p . Параметри Z є квадратами факторів X : $z_i = x_i^2$

Таблиця 1 містить матрицю планування чисельного експерименту. Було визначено кодовані величини що відповідають натуральним значенням факторів для кожного розрахунку. Планування відповідає критеріям D-оптимальності (план є рівномірним) та ортогональності [5].

Таблиця 1 Матриця планування

№	Натуральні значення факторів			Кодовані значення факторів			Результати випробування
	δ	h	p	x_1	x_2	x_3	
							54.43
1	4	4	2	-1	-1	-1	35.93
2	6	4	2	0	-1	-1	27.20
3	8	4	2	1	-1	-1	27.38
4	4	8	2	-1	0	-1	21.96
5	6	8	2	0	0	-1	18.50

6	8	8	2	1	0	-1	18.35
7	4	12	2	-1	1	-1	15.86
8	6	12	2	0	1	-1	14.07
9	8	12	2	1	1	-1	435.41
10	4	4	16	-1	-1	0	287.41
11	6	4	16	0	-1	0	217.57
12	8	4	16	1	-1	0	219.03
13	4	8	16	-1	0	0	175.64
14	6	8	16	0	0	0	148.02
15	8	8	16	1	0	0	146.81
16	4	12	16	-1	1	0	126.91
17	6	12	16	0	1	0	112.57
18	8	12	16	1	1	0	816.39
18	8	12	16	1	1	0	816.39
19	4	4	30	-1	-1	1	538.90
20	6	4	30	0	-1	1	407.95
21	8	4	30	1	-1	1	410.67
22	4	8	30	-1	0	1	329.33
23	6	8	30	0	0	1	277.54
24	8	8	30	1	0	1	275.27
25	4	12	30	-1	1	1	237.96
26	6	12	30	0	1	1	211.06
27	8	12	30	1	1	1	54.43

Результати розрахунків

За результатами розрахунків добре видно (Рис.4) що з збільшенням товщини бандажу, максимальні напруження в трубі зменшуються.

За методом найменших квадратів було визначено невідомі коефіцієнти регресійної моделі. Метод найменших квадратів був застосований для розрахунку 27 коефіцієнтів регресійної моделі. Так як чисельний експеримент не має паралельних дослідів і таким чином не має дисперсії відтворення, досліджувалися вплив коефіцієнтів на модель, та відкидалися менш значущі.

Згідно процедури описаній у посиланні [5] коефіцієнти моделі були відсортовані згідно параметра (2), де менше значення t означає менший вплив на модель.

$$t_j = \frac{|b_j|}{s_Y \sqrt{c_{jj}}}, \#(2)$$

де b_j – це j - коефіцієнт рівняння регресії; s_Y – середнє квадратичне відхилення функції відгуку відносно загального середнього; c_{jj} – діагональні елементи матриці дисперсій-коваріацій

Після відкидання незначущих елементів остаточне рівняння моделі регресії у кодованих величинах разом з значущими коефіцієнтами стане таким:

$$\hat{y} = 175.641 - 35.5x_1 - 80.25x_2 + 153.69x_3 + 7.88z_1 + 31.52z_2 + 45.9x_1x_2 - 70.22x_2x_3 - 31.06x_3x_1 - 27.52x_1z_2 - 18.15x_2z_1 + 6.89x_3z_1 + 27.58x_3z_2 + 13.05z_1z_2 + 40.16x_1x_2x_3 - 15.88z_1x_2x_3 - 24.08x_1z_2x_3 + 11.42z_1z_2x_3 \quad \#(3)$$

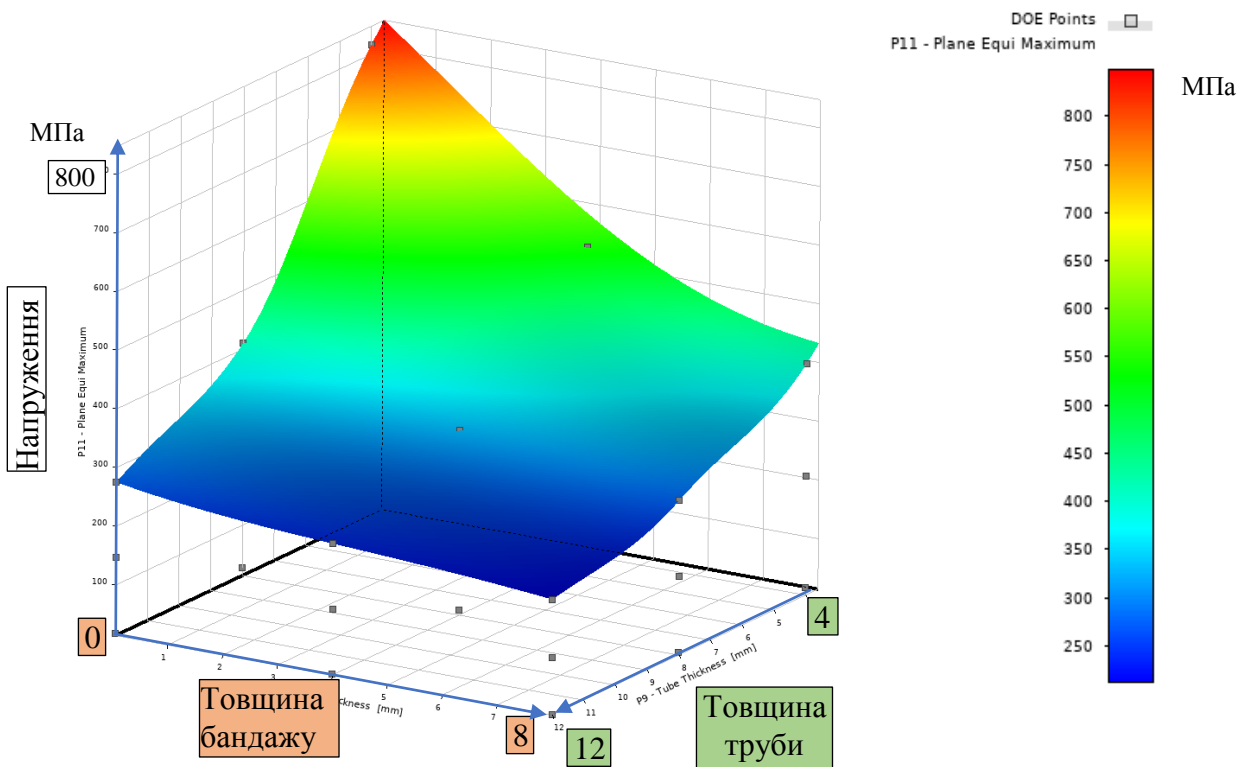


Рис. 3 Поверхня відгуку чисельного експерименту.
Внутрішній тиск 30 МПа

Ефективність отриманої моделі (33333333) було оцінено за критерієм Фішера. Залишкова дисперсія (4) $s_{\text{зал}}^2$ порівнювалась з дисперсією функції відгуку відносно значення загального середнього s_Y^2 :

$$s_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{27} (Y_i - \hat{y}_i)^2}{27 - l} \quad \#(4)$$

де l – кількість коефіцієнтів у рівнянні регресії

$$F = \frac{s_Y^2(f_1)}{s_{\text{зал}}^2(f_2)} \quad \#(5)$$

де f_1 та f_2 є ступенями вільності що визначалися як: $f_1 = 27 - 1 = 26$, $f_2 = 27 - 18 = 9$. Розрахункове значення статистики Фішера (5) $F = 2,8889$ є трохи більше за табличне значення критерію $F_{\text{табл}} = 2,8864$ при рівні значущості $\alpha = 0,05$. Відкидання більшої кількості коефіцієнтів веде до невиконання критерію.

На Рис.4 зображено криві отримані з Рис.1 для 10 різних значень товщини труби. Ці криві є залежностями напружень по від товщини бандажу за тиску 30 МПа.

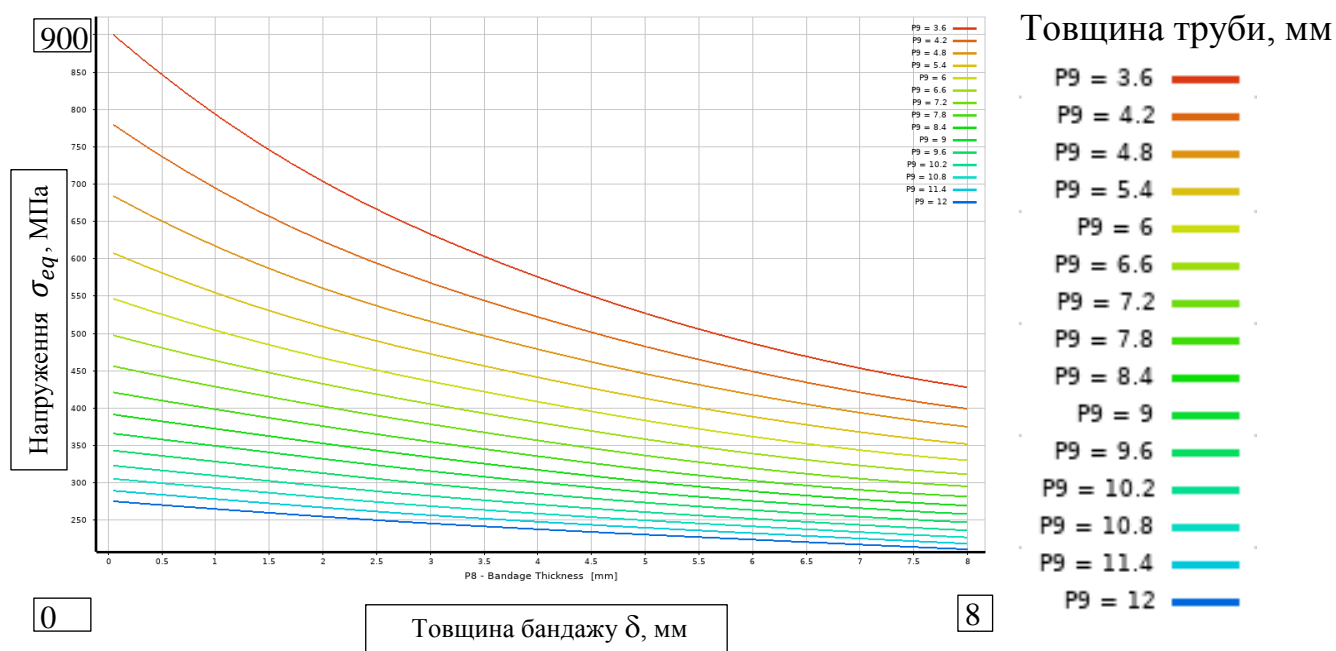


Рис. 4 Графік залежності напружень від товщини бандажу.
Внутрішній тиск 30 МПа

Висновки:

Отримані результати розрахунків засвідчили, що:

1. Розглянуті конструкційні і експлуатаційні фактори, такі як товщина композитного бандажу, товщина труби і внутрішній тиск, суттєво впливають на напружений стан труби у процесі її бандажування композитом;

2. Одержана регресійна модель в межах факторного простору дозволяє достовірно оцінити вплив як розглянутих факторів, так і їх взаємодії на максимальне еквівалентне напруження у трубі, за яким проводять розрахунки на статичну і циклічну міцність;

3. Розглянутий підхід є перспективним для подальшої розробки процедури оптимального проектування композитних бандажів для ремонту трубопроводів.

Список використаних джерел

1. 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. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9130.

2. ISO 24817:2015: Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries – Composite Repairs for Pipeworks – Qualification and Design, Installation, Testing and Inspection.

3. ASME PCC-2-2015: Repair of Pressure Equipment and Piping.

4. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. Учебное пособие для студентов вузов. – Москва: "Машиностроение", 1973. – 456 с. 5

5. 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.