

Розрахунок напружено-деформованого стану системи “труба - композитний бандаж”

Є.В. Савчук, С.М. Шукасєв

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Анотація. Робота присвячена питанням застосування композиційних матеріалів для посилення і ремонту зношених трубопроводів. Досліджувався вплив ряду конструкційних та експлуатаційних факторів на напружений стан труби за умови її посилення композитним бандажем. Виконано порівняльний аналіз розрахунків сталевий труби підсиленої композитом за методом скінчених елементів та рядом аналітичних методів у тому числі згідно з ДСТУ ISO 24817:2019. Числові та аналітичні розрахунки виконувалися згідно з планом повного факторного експерименту (три фактори на трьох рівнях, всього двадцять сім дослідів) зі змінними факторами: товщина бандажу, товщина труби та відношення залишкової товщини до товщини труби. Розрахунки включали два варіанти системи: “труба без пошкодження” і “труба з пошкодженням”. Запропонований новий аналітичний підхід до визначення напружено-деформованого стану системи “труба-композитний бандаж”, який дає вищу точність у порівнянні з ДСТУ ISO 24817:2019

Ключові слова: напружено-деформований стан; трубопровід; ремонт; композити.

Вступ

Поява та розвиток композиційних матеріалів вплинули на технології ремонту трубопроводів. Композиційні матеріали стали альтернативою класичним “металевим” ремонтам. Переваги неметалевих “композитних” ремонтів полягають у простоті проектування, зручності у застосуванні, відсутності потреби у зупинці роботи трубопроводу на час ремонту. На відміну від металевих ремонтів, де за допомогою металевий втулки можна повністю зняти навантаження з пошкодженої ділянки, при встановленні композитного бандажу необхідно точно оцінювати напружено-деформований стан (НДС) компонентів системи “труба-композитний бандаж” (Рис. 1). На сьогодні існує ряд методів розрахунку НДС таких систем, зокрема, широко поширеними є різні методи створені виробниками композиційних матеріалів, що базуються на даних їх випробувань 1. Недоліком таких методів є їх обмеженість у застосуванні для різних композиційних матеріалів. Основним документом що регламентує порядок підготовки, проведення та оцінки якості ремонту в Україні є ДСТУ-ISO 24817. Зазначений стандарт повністю перенесений та наслідую загальноприйнятий Європейський стандарт 2. Також цей стандарт є спорідненим з стандартом США ASME PCC-2 3.

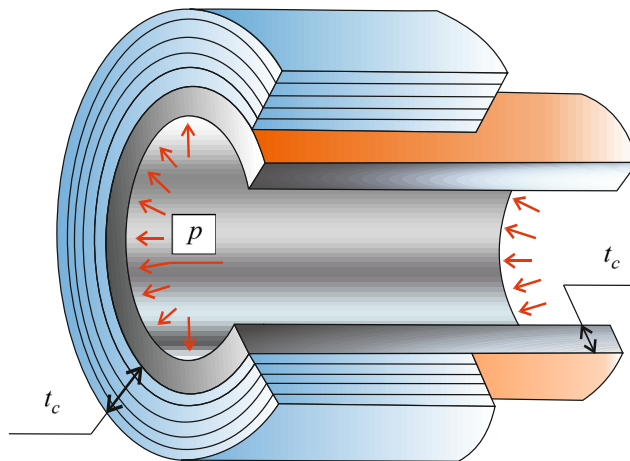
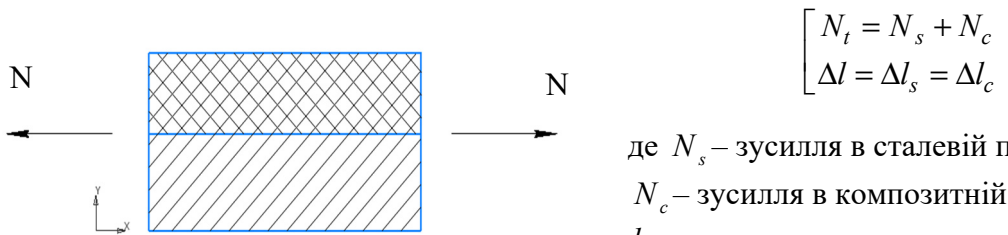


Рис. 1 Система трубопровід – композитний бандаж

Мета дослідження – уточнення аналітичних методів розрахунку напружено-деформованого стану системи “труба - композиційний бандаж” за різних значень конструкційних та силових факторів.

Аналітичний розрахунок за теорією тонкостінних оболонок

Для визначення НДС оболонки складеної з двох матеріалів (Рис. 2), розглядали загальний випадок навантаження пластин з різними механічними характеристиками. Умови рівноваги та сумісності деформацій для цієї моделі записуються таким чином:



$$\begin{cases} N_t = N_s + N_c \\ \Delta l = \Delta l_s = \Delta l_c \end{cases},$$

Рис. 2 Зображення двошарової тонкостінної оболонки навантаженої розтягаючим зусиллям

де N_s – зусилля в сталевій пластині,
 N_c – зусилля в композитній пластині,
 l – довжина пластини.

В розгорнутому вигляді, та враховуючи напруження що виникають в окремих пластинах, система набуває вигляду:

$$\begin{cases} N = \sigma_s t_s + \sigma_c t_c \\ \frac{l N_s}{E_s t_s w} = \frac{l N_c}{E_c t_c w} \end{cases},$$

де w – ширина пластин, l – довжина пластин, E_s – модуль сталеві пластини, E_c – модуль композитної пластини.

Величину ширини w можливо скоротити. Внутрішній тиск в такому випадку буде мати розмірність Н/м (ньютон на метр). Розв’язком системи лінійних рівнянь відносно зусиль N_1 та N_2 можна записати так.

$$\begin{cases} N_s = \sigma_s t_s = N \frac{E_s t_s}{E_c t_c + E_s t_s} \\ N_c = \sigma_c t_c = N \frac{E_c t_c}{E_c t_c + E_s t_s} \end{cases}. \quad (1)$$

З системи рівнянь (1) можна отримати вираз для визначення товщини композитного бандажу

$$t_{cw} = \frac{D E_s}{2 E_c} \frac{1}{\sigma_{sy}} (p_d - p_s), \quad (2)$$

де σ_{sy} – границя текучості труби, p_d – граничий тиск для неукріпленої труби.

Рівняння (2) описує необхідну товщину композитного бандажу для забезпечення напружень в трубі нижче границі текучості, вираз співпадає з стандартами ISO та ASME.

Аналітичний розрахунок для двошарової товстостінної оболонки (задача Ламе)

В роботі розглянуто застосування теорії товстостінних циліндрів до визначення НДС елементів системи «труба-композитний бандаж». За основу було взято розв’язок задачі Ламе.

У випадку труби посилено бандажем, між елементами системи (Рис. 3) буде виникати контактний тиск, і визначення НДС кожного окремого елемента можна розглядати як окрему задачу. Цей тиск буде виникати через те що компоненти мають різні характеристики жорсткості. У такому випадку можна припустити, що поверхні компонентів є не розривними під час навантаження. Іншими словами переміщення поверхонь контакту є однаковими.

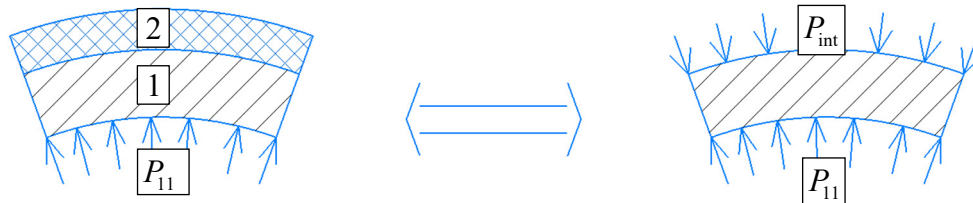


Рис. 3. Сили що виникають в системі «труба-композитний бандаж»

Тоді умова сумісності переміщень має вигляд:

$$A_1 \frac{1-\mu_1}{E_1} \cdot R + B_1 \frac{1+\mu_1}{E_1} \cdot \frac{1}{R} - \mu_1 \frac{\sigma_z}{E_1} R = A_2 \frac{1-\mu_2}{E_2} \cdot R + B_2 \frac{1+\mu_2}{E_2} \cdot \frac{1}{R} - \mu_2 \frac{\sigma_z}{E_2} R$$

де R - радіус контакту труби та бандажу.

Вводячи нові коефіцієнти (α_i, β_i) через зовнішні та внутрішні радіуси можна отримати вираз для визначення контактного тиску.

$$p_{int} = \frac{p_{11} \left[\alpha_1 R + \frac{\beta_1}{R} \right] + p_{22} \left[\alpha_2 k_2^2 R + \frac{\beta_2}{R} \right] + R \left[\frac{\mu_2 \sigma_{2z}}{E_2} - \frac{\mu_1 \sigma_{1z}}{E_1} \right]}{R(\alpha_1 k_1^2 R + \alpha_2) + \frac{1}{R}(\beta_1 + \beta_2)}, \quad \begin{aligned} \alpha_i &= \frac{1-\mu_i}{E_i} \cdot \frac{1}{r_{1i}^2} \cdot \frac{1}{r_{2i}^2 - r_{1i}^2}, \\ \beta_i &= \frac{1+\mu_i}{E_i} \cdot \frac{r_{1i}^2 r_{2i}^2}{r_{2i}^2 - r_{1i}^2}, \\ k_i &= \frac{r_{2i}}{r_{1i}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подальший розв'язок за теорією товстостінних оболонок полягає у визначенні НДС окремих елементів системи «труба – композитний бандаж» навантажених внутрішнім та контактним тиском p_{int} (Рис. 3) з застосуванням розв'язку задачі Ламе.

Аналітичний розрахунок «гібридним» методом

В роботі запропоновано третій аналітичний підхід, що був названий «гібридним» та поєднує в собі елементи розв'язку за тонкостінною теорією оболонок та задачею Ламе. Метод є двоетапним та потребує визначення контактного тиску між компонентами системи «труба – композитний бандаж» за рівнянням (3). На другому етапі необхідно обчислити НДС окремих елементів системи «труба – композитний бандаж» навантажених внутрішнім та контактним тиском p_{int} (Рис. 3) застосовуючи безмоментну теорію оболонок. Тиск, що діятиме на трубу, визначається як різниця зовнішнього та внутрішнього тисків:

$$p_s = p - p_{int}$$

Напруження які виникають у трубі:

$$\sigma_s = \frac{p_s R_s}{h_s},$$

де R_s – серединний радіус труби, h_s – залишкова товщина труби.

Сили які діють на композитний бандаж:

$$p_c = p_{int}$$

Напруження які виникають у композитному бандажі:

$$\sigma_c = \frac{p_c R_c}{h_c},$$

де R_c – серединний радіус композитного бандажу, h_c – товщина бандажу.

План повного факторного експерименту

Числові та аналітичні розрахунки моделі труби з бандажем виконувалися відповідно до плану повного факторного експерименту $3^3 // 27$: три фактори на трьох рівнях, всього 27 дослідів. Змінними факторами було обрано: товщину бандажу t_c : 4 мм, 6 мм, 8 мм, товщину труби t_s : 4 мм, 8 мм, 12 мм, та відношення залишкової товщини до товщини труби k_d : 0.2, 0.6, 1 (Рис. 4).

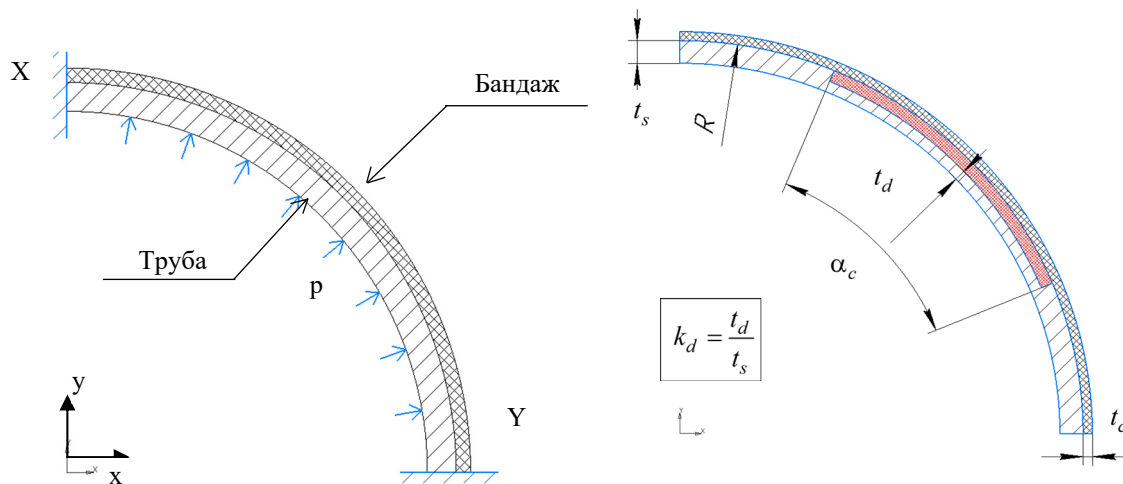


Рис. 4. Схема моделювання сегменту труби для числового експерименту

За результатами розрахунків був проведений порівняльний аналіз та була порахована похибка між числовим методом та 3 аналітичними моделями (Рис. 5).

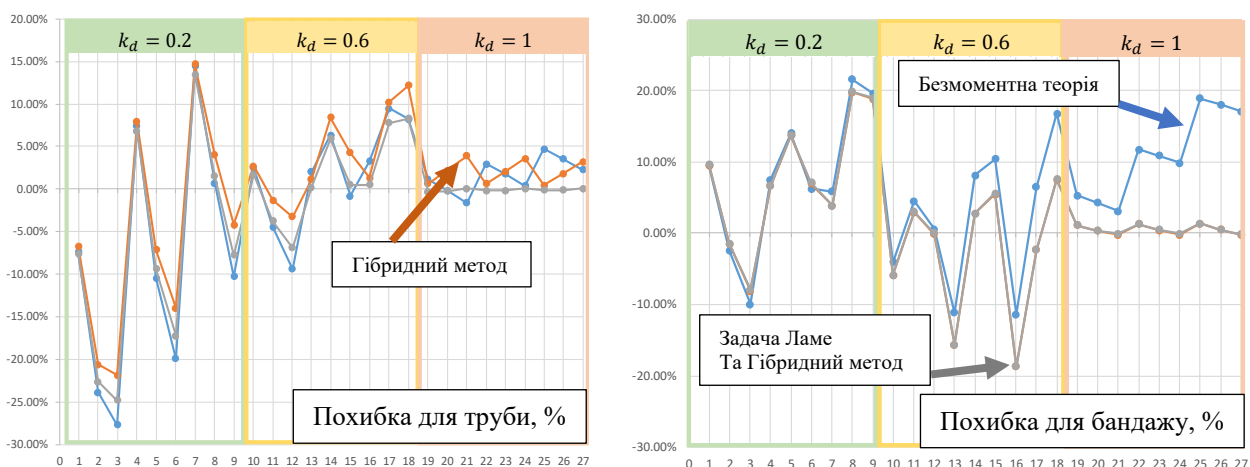


Рис. 5. Похибка розрахунку головних напружень для бандажу у системі “труба-композитний бандаж” за наявного пошкодження

Висновки

- Виконаний розрахунок системи “труба-композитний бандаж” з пошкодженням за числовим методом та 3 аналітичними моделями, показано що збільшення глибини дефекту може призвести до суттєвої похибки при застосуванні ДСТУ-ISO 24817 (більше 20 відсотків).
- Продемонстровано що найкращий збіг результатів аналітичних і числових розрахунків маємо за умови застосування теорії товстостінних оболонок -0.3...1.27%.
- Запропоновано новий аналітичний двоступеневий “гібридний” метод який поєднує в собі розрахунки НДС за безмоментною теорією тонкостінних оболонок та визначення контактного тиску за теорією товстостінних оболонок. Похибка методу лежить в діапазоні - 0.28...3.93%.

Список літератури

1. Dumitrescu, A.; Minescu, M.; Dinita, A.; Lambrescu, I. Corrosion Repair of Pipelines Using Modern Composite Materials Systems: A Numerical Performance
2. ISO. TS 24817:2006 Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries—Composite Repairs for Pipework—Qualification and Design, Installation, Testing and Inspection. Technical Specification; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.
3. ASME. B31G-2009 Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines; The American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA, 2009.

Calculation of the stress-strain state of the “pipe-composite wrap” system

Yevhenii Savchuk, Sergiy Shukayev

Abstract: *This study focuses on the application of composite materials for strengthening and repairing worn pipelines. The influence of various structural and operational factors on the stress state of a pipe reinforced with a composite wrap was investigated. A comparative analysis was conducted between the calculations of a steel pipe reinforced with a composite using the finite element method and several analytical methods, including those specified in DSTU ISO 24817:2019. Numerical and analytical calculations were carried out according to a full factorial experiment plan (three factors at three levels, twenty-seven experiments in total), with the variable factors being the wrap thickness, pipe thickness, and the ratio of residual thickness to pipe thickness. The calculations involved two system variants: “undamaged pipe” and “damaged pipe”. A new analytical approach was proposed to determine the stress-strain state of the “pipe-composite wrap” system, which provides higher accuracy compared to DSTU ISO 24817:2019.*

Keywords: *stress-strain state; pipeline; repair; composites.*