

ЗМІЦНЕННЯ ПОШКОДЖЕНОЇ СТАЛЕВОЇ ТРУБИ КОМПОЗИТНИМ БАНДАЖЕМ: МОДЕЛЬ І РОЗРАХУНОК

Запропоновано методикку обчислення міцності сталевих руб з пошкодженістю від дії внутрішнього тиску при наявності композитного бандажа та досліджено вплив пружних характеристик композитного матеріалу, з якого виготовлено бандаж, рівня пошкодженості труби та величини натягу стрічки на товщину зміцнювального шару та розподіл напружень по товщині у двошаровій конструкції. Для заданих конструктивних і технологічних характеристик встановлено потрібну мінімальну товщину зміцнювального шару, за якої труба з пошкодженістю є рівноміцною зі звичайною сталевую трубою без пошкоджень.

Б.В. Копей

*кафедра нафтогазового обладнання
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу,
Вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76006, УКРАЇНА
E-mail: kopeyb@ifdtung.if.ua*

В.В. Розгонюк

*НАК «Нафтогаз України»,
Вул. Богдана Хмельницького, 6, Київ, 01001, УКРАЇНА*

О.В. Максимук, Н.В. Щербина

*Інститут проблем механіки і математики,
ім.Я.Підстригача НАНУ, Вул. Наукова, 3-Б, Львів,
УКРАЇНА*

А. М. Найда

ВАТ «ЛУКОР», Калуш, УКРАЇНА

1. Вступ

У нафтогазовидобувній промисловості в основному використовують металеві труби. Останнім часом при виготовлення нафтогазових трубопроводів знаходять також застосування неметалеві (пластикові) труби, що мають достатньо високі експлуатаційні параметри [1]. У процесі експлуатації, за певних технологічних умов навантаження, поява і злиття мікротріщин у трубі може призвести до її руйнування, аварійної ситуації. Для захисту металевих трубопроводів від негативних чинників (зокрема, низької корозійної стійкості) та підвищення їхніх характеристик щодо міцності розробляють різні методи. Серед них ефективним способом є нанесення на зовнішню чи внутрішню поверхню труби покриття захисного шару із полімерного композитного матеріалу.

Розглядається запропонований спосіб підвищення міцності й надійності сталевих труб при дії внутрішнього тиску. Він полягає у нанесенні на зовнішню поверхню труби (у разі пошкодженості матеріалу) зміцнювального шару – композитного бандажу. Цей шар формується за спеціально розробленою технологією із тканого композиту (текстоліту) і виконує функцію зміцнення сталеві труби. Місцезнаходження та рівень пошкодженості сталеві труби встановлюється за експериментальною методикою.

Оцінку експлуатаційної міцності металеві труби з пошкодженістю у разі нанесення зміцнювального шару виконуватимемо розрахунковим способом за допомогою сформульованої математичної моделі.

Метою дослідження є визначення мінімальної товщини зміцнювального шару, за якої сталеві труба з

пошкодженістю не поступатиметься за міцністю від монолітної труби (без пошкоджень).

2. Математична модель

2.1 Монолітна труба.

Розглядаємо дуже довгу трубу – циліндричну кругову оболонку під дією рівномірного внутрішнього сталого тиску P . Оболонка, яка перебуває під дією навантажень, рівномірно розподілених уздовж неї, характеризується однаковими по довжині деформаціями. На цій підставі можемо звести досліджувану задачу до розгляду плоского кільця, що деформується у радіальному напрямку (рис. 1).

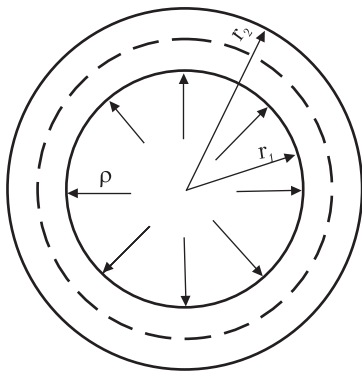


Рисунок 1. Труба під дією внутрішнього тиску

У випадку плоскої задачі (задача Ламе) при заданому навантаженні напруження і нормальне переміщення у будь-якій точці стінки труби визначаються за формулами [2]

$$\sigma_r = A + B \frac{1}{r^2}, \quad \sigma_{\theta\theta} = A - B \frac{1}{r^2}, \quad (1)$$

$$U_r = \frac{1}{E} \left[A(1-\nu)r - B(1+\nu) \frac{1}{r} \right], \quad (2)$$

де

$$A = P \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad B = -P \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}.$$

При $r = r_1$ радіальне і колове напруження σ_r та $\sigma_{\theta\theta}$ досягають максимального значення, тобто

$$\sigma_r = -P; \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1+k^2}{1-k^2} P, \quad (4)$$

де $k = \frac{r_1}{r_2} = \frac{d}{D}$ – величина, обернена до діаметра технологічного отвору труби, d, D – відповідно внутрішній та зовнішній її діаметри.

За певних співвідношень радіусів r_1 і r_2 та робочого тиску напруження σ_r та $\sigma_{\theta\theta}$ можуть призвести до руйнування труби.

При проектуванні труби вважають відомими внутрішній радіус r_1 , робочий тиск P і характеристики міцності матеріалу. Встановлено, що міцність труби, яка зазнає дії внутрішнього тиску, зі збільшенням товщини стінки зростає тільки до певної межі [2]. Внутрішній тиск у трубі не може перевищувати певне значення. Із

розрахунку на міцність за допустимими напруженнями, скориставшись третьою теорією міцності, дійшли висновку, що ні при якому збільшенні товщини стінок труби її не можна виготовити на тиск, який є більшим, ніж величина $[\sigma]/2$, де $[\sigma]$ – допустиме напруження [2].

Отже, міцність сталевій трубі перевіряємо за допомогою умови

$$P \leq \frac{[\sigma]}{2} \quad (5)$$

Якщо робочий тиск у трубі перевищить гранично допустиме значення, то це може призвести до руйнування труби.

2.2. Двошарова труба.

Розглядається конструкція труби з бандажем, що моделюється двошаровою оболонкою (рис.2). У разі пошкодженого матеріалу труби на зовнішній її поверхні утворюють зміцнювальний шар. Припускаємо, що забезпечується ідеальний контакт його із силовим (внутрішнім) сталевим шаром.

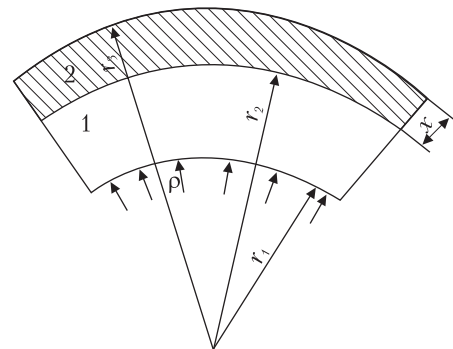


Рисунок 2. Схема конструкції труби з бандажем
1 – сталеві оболонка; 2 – зміцнювальний шар із композитного матеріалу (бандаж)

Використовуючи дискретний підхід до опису напружено-деформованого стану конструкції шаруватой будови, на підставі (1), (2) запишемо розв'язок для кожного шару труби окремо.

Для основного шару ($r_1 \leq r \leq r_2$) маємо

$$\sigma_r^{(1)} = A_1 + B_1 \frac{1}{r^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(1)} = A_1 - B_1 \frac{1}{r^2}, \quad (7)$$

$$u_r^{(1)} = \frac{1}{E_1} \left[A_1(1-\nu_1)r - B_1(1+\nu_1) \frac{1}{r} \right] \quad (8)$$

Аналогічно запишемо розв'язок для зміцнювального шару ($r_2 \leq r \leq r_3$):

$$\sigma_r^{(2)} = A_2 + B_2 \frac{1}{r^2}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(2)} = A_2 - B_2 \frac{1}{r^2}, \quad (10)$$

$$u_r^{(2)} = \frac{1}{E_2} \left[A_2(1-\nu_2)r - B_2(1+\nu_2) \frac{1}{r} \right] \quad (11)$$

Величини з індексами 1,2 відносяться до основного та зміцнювального шару труби відповідно.

Невідомі сталі A_1, B_1, A_2, B_2 в (6)–(10) та невідомий міжшаровий контактний тиск q знаходимо з таких умов навантаження на зовнішній ($r=r_3$) і внутрішній ($r=r_1$) поверхнях двошарової циліндричної оболонки:

$$\sigma_r^{(2)} = 0 \text{ при } r=r_3, \tag{12}$$

$$\sigma_r^{(1)} = -P \text{ при } (r=r_1), \tag{13}$$

та умов контактної взаємодії шарів

$$\sigma_r^{(1)} = -\sigma_r^{(2)}, \tag{14}$$

$$\sigma_r^{(2)} = -q, \tag{15}$$

$$u_r^{(1)} = u_r^{(2)} \text{ при } r=r_2. \tag{16}$$

Внаслідок задоволення цих умов отримуємо

$$A_1 = -P - B_1 \frac{1}{r_1^2}, \tag{17}$$

$$A_2 = -B_2 \frac{1}{r_3^2},$$

$$B_2 = P \frac{r_2^2}{1 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2} + B_1 \frac{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1}{1 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2},$$

де $B_1 = Pr_2^2 C$,

$$C = \frac{E_f - (1 - \nu_1) \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2}\right)}{\left[\frac{r_2^2}{r_1^2} (1 - \nu_1) + (1 + \nu_2)\right] \left[\left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2}\right) - E_f \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} - 1\right)\right]},$$

$$E_f = \frac{E_1}{E_2} \left[(1 - \nu_2) \frac{r_2^2}{r_3^2} + (1 + \nu_2) \right].$$

На підставі (15) з урахуванням (9), (17) встановлюємо розрахункову формулу для контактного тиску

$$q = -P \left[1 + C \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} - 1 \right) \right], \tag{19}$$

Аналіз міцності шаруватих труб експериментальним способом спряжений із труднощами, які обумовлені структурними особливостями і технологією їхнього виготовлення. Скористаємося для цієї мети розрахунковим способом.

Замінімо дію зовнішнього шару труби контактним тиском q (рис.3), тоді напруження в сталевій трубі визначаємо за формулами (розв'язок задачі Ламе)

$$\sigma_r^{(1)} = \frac{Pr_1^2 - qr_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(P - q)r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)r^2}, \tag{20}$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(1)} = \frac{Pr_1^2 - qr_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(P - q)r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)r^2}$$

Тут величина q обчислюється за формулою (19) через комплекс характеристик зовнішнього і внутрішнього шарів.

Оцінку міцності труби за відомим напруженням станом виконуємо за третьою теорією міцності (критерій найбільших дотичних напружень). У цьому разі

$$P \leq \frac{[\sigma]}{2} + q, \tag{21}$$

де q визначаємо згідно з (19).

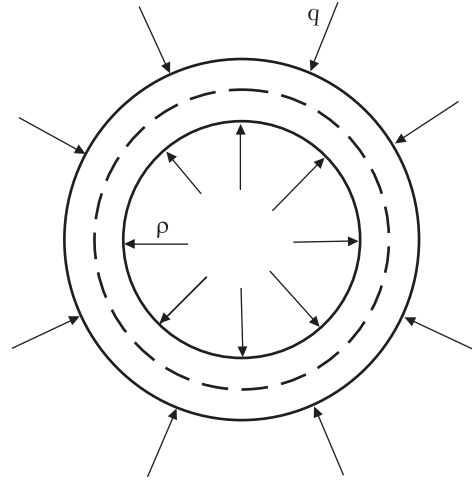


Рисунок 3. Умови навантаження q – шуканий контактний тиск

2.3. Врахування пошкодженості матеріалу труби.

Експлуатаційні характеристики (міцність, деформативність) труби залежать не лише від їхніх конструктивних параметрів, але й від пошкодженості матеріалу. Пошкодженість визначається як процес утворення і накопичення мікродефектів. У більш широкому розумінні пошкодженість тлумачиться як зміна структури матеріалу, що зумовлює зміну його фізико-механічних властивостей. Причинами пошкодженості може бути як навантаження конструкції, так і технологічні недосконалості.

Використовуємо наближений спосіб оцінки впливу пошкодженості матеріалу типу мікротріщин на міцність двошарової труби (рис.2). Пружні характеристики пошкодженого матеріалу сталевій труби відповідно до континуальної теорії першого порядку у випадку середовища з пошкодженнями обчислюємо за формулою [3].

$$E_1^n = E_1 \left[1 - \frac{16}{45} (10 - 3\nu_1) \frac{1 - \nu_1^2}{2 - \nu_1} \omega \right], \tag{22}$$

$$\nu_1^n = \nu_1 \left[1 - \frac{16}{45} (3 - \nu_1) \frac{1 - \nu_1^2}{2 - \nu_1} \omega \right],$$

де E_1^n, ν_1^n – ефективні модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона для пошкодженого середовища; E_1, ν_1 – пружні характеристики суцільного матеріалу; ω – параметр, що характеризує рівень пошкодження, $0 \leq \omega \leq 1$ (при $\omega=0$ – непошкоджений матеріал, при $\omega=1$ – зруйнований матеріал).

Зазначимо, що у випадку контактної взаємодії пошкодженої сталевій труби з ком позитивним бандажем розрахунок контактного тиску (позначатимемо його через q_n) виконуємо за формулою (19). Але при цьому у формулі (18) для C потрібно замінити E_1, ν_1 на E_1^n, ν_1^n відповідно до (22).

Тоді за заданих пружних і геометричних характеристик труби і бандажа та рівня пошкодженості матеріалу труби мінімальна товщина бандажа x , де $r_3 = r_2 + x$,

що забезпечує рівномірність труби з пошкодженістю (з бандажем) і непошкоджені (без бандажа) визначатиметься як результат перевірки умови

$$(1-\omega) \frac{[\sigma]}{2P} = \bar{q}_n, \tag{23}$$

де $\bar{q}_n = \frac{q_n}{P}$.

2.4. Врахування натягу стрічки.

З огляду на технологію виготовлення композитного бандажа для зміцнення сталевій труби, користуємося для оцінки її міцності умовою, що враховує вплив натягу стрічки при формуванні зміцнювального шару.

У випадку непошкодженого матеріалу труби ця умова має вигляд [4]:

$$P \leq \frac{[\sigma]}{2} - \sigma_n, \tag{24}$$

де σ_n – заданий натяг.

Якщо ще врахувати пошкодженість труби, то умова (24), за якою визначається мінімальна товщина композитного бандажа для її зміцнення, набуває вигляду

$$\frac{(1-\omega)}{P} \left(\frac{[\sigma]}{2} - \sigma_n \right) = \bar{q}_n \tag{25}$$

3. Аналіз числових результатів

Розрахунок виконували для таких вхідних даних конструкції.

Геометричні параметри: $r_1 = 675$ мм, $r_2 = 710$ мм, $r_3 = r_2 + x$ – товщина зміцнювального шару труби, що знаходиться шляхом її варіювання з умови рівномірності (23), якщо не враховується натяг, або з умови (25) при урахуванні натягу. Пружні характеристики сталевій труби: $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_1 = 0,3$. Допустиме напруження сталі $[\sigma] = 150$ МПа, робочий тиск $P = 50$ МПа, параметр пошкодженості матеріалу $\omega = 0,35$; натяг стрічки $\sigma_n \leq 20$ МПа.

Пружні характеристики композитного бандажа приймали такими: $\frac{E_1}{E_2} = 4$; $\nu_2 = 0,2$.

3.1. Залежність товщини зміцнювального шару.

У табл. 1 показано вплив відношення модулів пружності сталевій труби і композитного бандажа $\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$ на мінімальну товщину зміцнювального шару ($\sigma_n = 0$) для $\omega = 0,35$.

Таблиця 1.

$\frac{E_1}{E_2}$	10	4	2
x	78	30	15

Результати дослідження впливу рівня пошкодженості труби (параметри) на мінімальну товщину зміц-

нювального шару подані у табл. 2 Обчислення виконали для варіанту $\frac{E_1}{E_2} = 4$, $\sigma_n = 0$.

Таблиця 2.

ω	0,2	0,35	0,5
x	9	30	56

Як видно з табл.2, зі збільшенням пошкодженості сталевій труби потрібно використовувати товстіший бандаж.

У табл.3 представлено результати дослідження впливу натягу текстолітової стрічки при утворенні зміцнювального шару на його мінімальну товщину для забезпечення міцності сталевій труби у разі її пошкодження.

Таблиця 3.

σ_n	0	10	20
x	30	27	25

Аналізуючи дані табл.3, робимо висновок, що домогтися зменшення товщини зміцнювального шару можна шляхом збільшення натягу стрічки при створенні композитного бандажа. Розрахунок виконували для $\frac{E_1}{E_2} = 4$, $\omega = 0,35$. За однакових конструктивних характеристик без урахування натягу ($\sigma_n = 0$) товщина зміцнювального шару $x = 30$ мм, тобто є більшою, ніж у випадку наявності натягу.

3.2. Розподіл навантажень.

На рис.4 зображено розподіл напруження $\frac{\sigma_r}{P}$ у сталевій трубі з композитивним бандажем залежно від r для різних значень параметра $\frac{E_1}{E_2}$ (відповідно до них різні значення x). Криві 1,2,3 побудовані при $\frac{E_1}{E_2} = 2,4,10$ (відповідно $x = 15,30,78$). Крива 4 характеризує розподіл

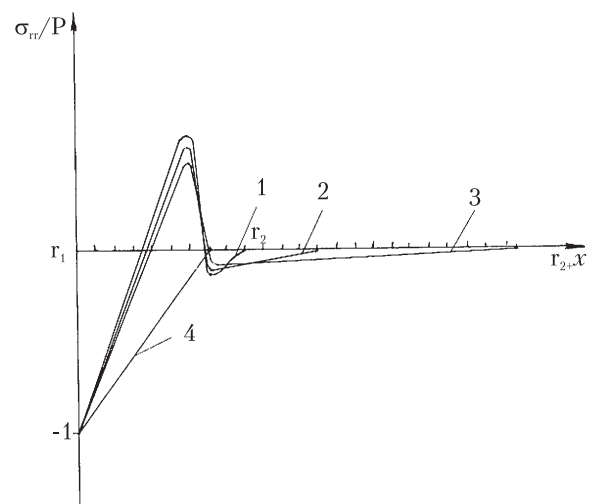


Рисунок 4. Розподіл напруження у пошкодженій сталевій трубі із композитним бандажем

напруження $\frac{\sigma_r}{P}$ у звичайній сталевій трубі (без бандажа) з непошкодженим матеріалом.

Ефективним і технологічно відносно нескладним способом зменшення товщини зміцнюваного шару, що використовується для забезпечення міцності сталевій трубі з пошкодженням матеріалу, є регулювання величини натягу текстолітової стрічки у процесі створення композитного бандажа. Вияв цієї тенденції демонструє рис. 5. Цифри 1, 2, 3 біля кривих вказують на значення натягу $\sigma_n = 0, 10, 20$ (для цих випадків встановлено $x = 30, 27, 25$). Розрахунок виконано для зада-

них конструктивних параметрів, при цьому $\frac{E_1}{E_2} = 4$; $\omega = 0,35$.

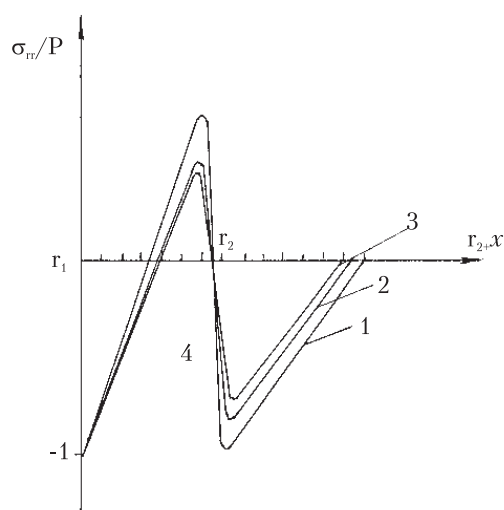


Рисунок 5. Вплив натягу на розподіл радіального напруження у трубі з бандажем при $\omega = 0,35$

Особливості розподілу напруження $\frac{\sigma_r}{P}$ у сталевій трубі зі зміцнювальним шаром для різного рівня пошкодження її матеріалу (відповідно потрібна різна товщина зовнішнього шару) наведено на рис. 6. На цьому рисунку кривим 1, 2, 3 відповідають значення $\omega = 0, 2, 0,35, 0,5$ (для розглянутих випадків отримано $x = 9, 30, 56$). Обчислення виконували для $\frac{E_1}{E_2} = 4$, $\sigma_n = 0$, інші характеристики конструкції не змінювали.

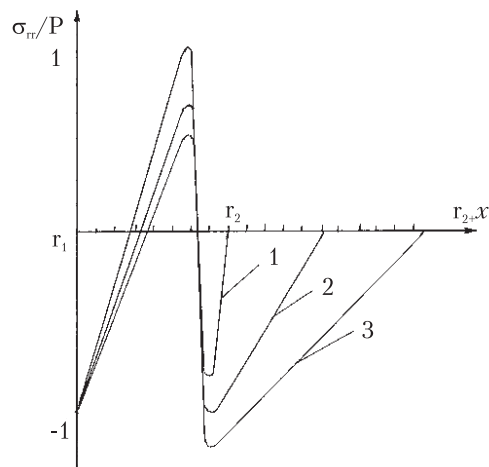


Рисунок 6. Розподіл напруження у сталевій трубі зі зміцнювальним шаром для різного рівня пошкодження її матеріалу

Відзначимо, що біля поверхні контакту труби і бандажа спостерігається концентрація радіального напруження, яка зростає зі збільшенням пошкодження труби. Характерною особливістю для конструкції двошарової труби є високий рівень розтягувальних напружень поблизу зовнішньої поверхні пошкодженої труби та стискувальних – поблизу внутрішньої поверхні зміцнювального бандажа.

Висновки

1. Запропоновано методику обчислення міцності сталевих труб з пошкодженням від дії внутрішнього тиску при наявності композитного бандажа.
2. Досліджено вплив пружних характеристик композитного матеріалу, з якого виготовлено бандаж; рівня пошкодження труби; величини натягу стрічки на товщину зміцнювального шару та розподіл напружень по товщині у двошаровій конструкції.
3. Для заданих конструктивних і технологічних характеристик встановлено потрібну мінімальну товщину зміцнювального шару, за якої труба з пошкодженням є рівномірною зі звичайною сталевією трубою без пошкоджень.

Література

1. Аношкин А.Н., Ташкинов А.А., Ларионов А.Ф., Поспелов А.Б. Бипластмассовые трубы для внутрипромысловых нефтепроводов высокого давления // Механика композит. материалов, 2002. – Т. 36. – № 3. – С. 407-418.
2. Писаренко Г.С., Квітна О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів /за ред. Г.С. Писаренка. – К.: Вища школа, 1993. – 655 с.
3. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. – Механика твердого тела. – 1973. – № 4. – С. 149-158.
4. Безвербный А.Ф. Силовые и геометрические соотношения в многослойных трубах и сосудах давления. В кн.: Многослойные сварные конструкции и трубы. – К.: Наук. Думка, 1984. – с. 296-302.