

Дослідження та методи аналізу

УДК 629.4.063

ВПЛИВ АНТИКОРОЗИЙНОГО ПОКРИТТЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ НА МІЦНІСТЬ ТРУБОПРОВОДУ

В.Я.Грудз., І.Й.Попадюк., О.Т.Мартинюк.

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: public@ifdtung.if.ua

Рассматривается прочность трубопровода с нанесением внутреннего антикоррозионного покрытия. Получены расчетные формулы для оценки напряжённого состояния системы.

Durability of the pipeline with drawing an internal anticorrosive covering is examined. Settlement formulas for an estimation of the intense condition of system are received.

У переважній більшості газ малих родовищ України містить домішки сірководню, який в трубопроводі створює надзвичайно агресивне корозійне середовище, що зумовлює інтенсивну внутрішню корозію трубопроводів і обладнання.

Одним із методів захисту таких трубопроводів є нанесення на їх внутрішню поверхню інгібіторів корозії, які при нанесенні тонкими шарами на поверхню металу між застиганням утворюють плівку з добрими властивостями адгезії.

Для визначення основних технологічних параметрів при нанесенні антикорозійного покриття на внутрішню поверхню труби магістрального газопроводу можна розглядати як двошаровий циліндр.

Нехай p_0, p_2 – відомі внутрішній та зовнішній тиски, r_0, r_2 – внутрішній та зовнішній радіуси двошарового циліндра, r_1 – радіус поверхні контакту шарів, p_1 – невідомий контактний тиск (рис. 1).

За аналогією із задачею Леме для товстостінного циліндра розглянемо кожний шар як самостійний товстостінний циліндр. Індексацию ведемо за зовнішнім радіусом. Напружено-деформований стан системи описуємо полярними координатами r, θ . Очевидно, $\sigma_r^{(1)}, \sigma_\theta^{(1)}, \sigma_r^{(2)}, \sigma_\theta^{(2)}$ будуть головними напруженнями.

Вихідні співвідношення контактної задачі включають:

– рівняння рівноваги (статичний аспект задачі)

$$r \frac{d\sigma_r^{(i)}}{dr} + \sigma_r^{(i)} - \sigma_\theta^{(i)} = 0, \quad i = \overline{1,2}; \quad (1)$$

– співвідношення Коші (геометрична сторона задачі)

$$E_r^{(i)} = \frac{du_i}{dr}, \quad E_\theta^{(i)} = \frac{U_i}{r}; \quad i = \overline{1,2}; \quad (2)$$

– узагальнений закон Гука (фізичний аспект)

$$\sigma_r^{(i)} = \frac{E_i}{1 - \mu_i^2} (E_r^{(i)} + \mu_i E_\theta^{(i)});$$

$$\sigma_\theta^{(i)} = \frac{E_i}{1 - \mu_i^2} (E_\theta^{(i)} + \mu_i E_r^{(i)}), \quad (3)$$

$$i = \overline{1,2}.$$

У формулах (1)-(3) позначено:

$E_r^{(i)}, E_\theta^{(i)}$ – радіальні та кільцеві деформації;

U_i – радіальне переміщення поверхні радіуса r в i -ому шарі;

E_i, μ_i – модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалу i -того шару.

Маючи на увазі ідеальний контакт між шарами, для замкнутості задачі запишемо співвідношення одностороннього контакту

$$\sigma_r^{(1)} \Big|_{r=r_1} = \sigma_r^{(2)} \Big|_{r=r_1}, \quad U^{(1)} \Big|_{r=r_1} = U^{(2)} \Big|_{r=r_1}. \quad (4)$$

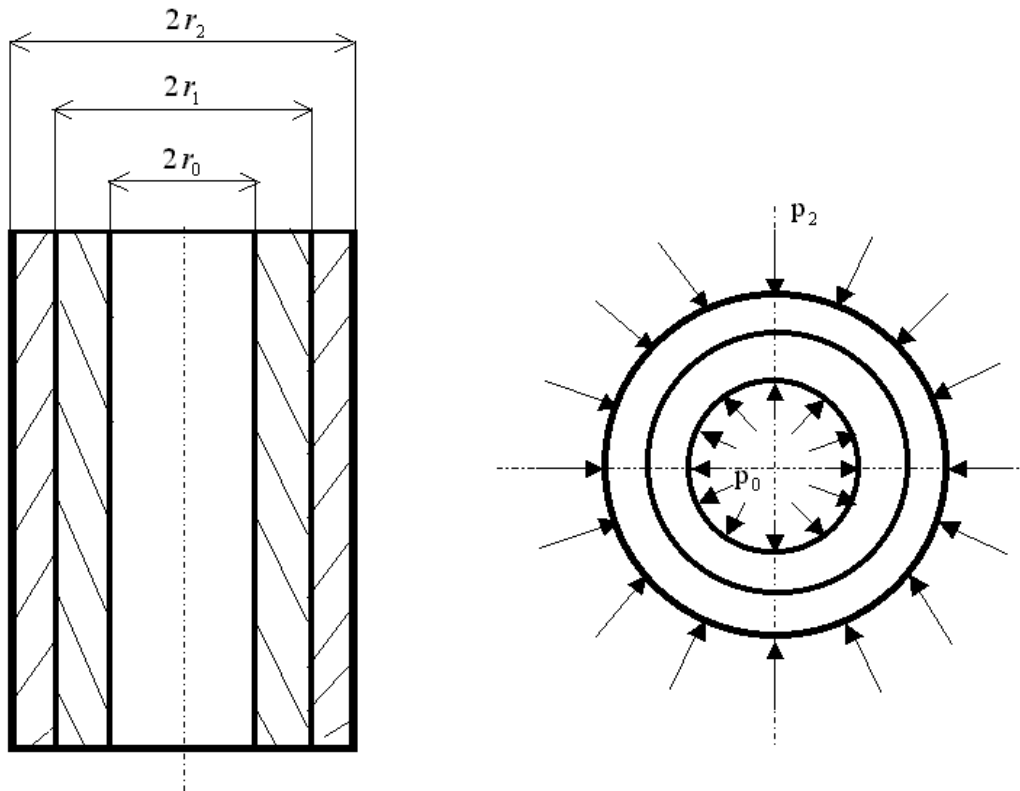


Рисунок 1 — Двошаровий товстостінний циліндр, навантажений внутрішнім та зовнішнім тиском

Граничні умови задачі

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}|_{r=r_0} = -p_0, \quad \sigma_r^{(1)}|_{r=r_1} = -p_1, \\ \sigma_r^{(2)} = -p_1, \quad \sigma_r^{(2)}|_{r=r_2} = -p_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставимо (2) у (3), одержуємо

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)} &= \frac{E_i}{1-\mu_i^2} \left(\frac{dU_i}{dr} + \mu_i \frac{U_i}{r} \right); \\ \sigma_\theta^{(i)} &= \frac{E_i}{1-\mu_i^2} \left(\frac{U_i}{r} + \mu_i \frac{dU_i}{dr} \right), \\ & i = \overline{1,2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Тепер підставимо (6) у (1), одержуємо систему диференціальних рівнянь у переміщеннях

$$\frac{d^2 U_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_i}{dr} - \frac{U_i}{r^2} = 0, \quad i = \overline{1,2} \quad (7)$$

Інакше

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d(u_i r)}{dr} \right] = 0, \quad i = \overline{1,2}.$$

Двічі інтегруємо, маємо загальний розв'язок

$$U_i = c_{i1} r + c_{i2} \frac{1}{r}, \quad i = \overline{1,2}, \quad (8)$$

де 4 константи інтегрування $c_{i1}, c_{i2}, i = \overline{1,2}$ визначаються із граничних умов (5). Зауважимо, що друга і третя умови (5) виходять із першої

умови (4) про рівність контактних напружень адгезійно контактуючих поверхонь.

Підставимо (8) в (6), знаходимо

$$\sigma_r^{(i)} = \frac{E_i}{1-\mu_i^2} \left[(1+\mu_i)c_{i1} - \frac{1-\mu_i}{r^2} c_{i2} \right]; \quad (9)$$

$$\sigma_\theta^{(i)} = \frac{E_i}{1-\mu_i^2} \left[(1+\mu_i)c_{i1} + \frac{1-\mu_i}{r^2} c_{i2} \right]. \quad (10)$$

Після підстановки граничних умов (5) у (9) маємо

$$\left. \begin{aligned} -p_0 &= \frac{E_1}{1-\mu_1^2} \left[(1+\mu_1)c_{11} - \frac{1-\mu_1}{r_0^2} c_{12} \right] \\ -p_1 &= \frac{E_1}{1-\mu_1^2} \left[(1+\mu_1)c_{11} - \frac{1-\mu_1}{r_1^2} c_{12} \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} -p_1 &= \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \left[(1+\mu_2)c_{21} - \frac{1-\mu_2}{r_1^2} c_{22} \right] \\ -p_2 &= \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \left[(1+\mu_2)c_{21} - \frac{1-\mu_2}{r_2^2} c_{22} \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Маємо дві незалежні одна від другої системи лінійних рівнянь на невідомі константи інтегрування.

Розв'язуючи їх, одержуємо

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= \frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 p_0 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_0^2}; \\
 c_{12} &= \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 r_1^2 (p_0 - p_1)}{r_1^2 - r_0^2}; \\
 c_{21} &= \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2}; \\
 c_{22} &= \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Підставляючи (3) у (8), знаходимо формули для визначення радіальних переміщень точок кожного шару через невідомий контактний тиск p_1 .

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 p_0 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_0^2} r + \\
 &\quad + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 r_1^2 (p_0 - p_1)}{r_1^2 - r_0^2} \frac{1}{r}; \\
 U_2 &= \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} r + \\
 &\quad + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Для знаходження невідомого контактного тиску p_1 використаємо співвідношення (4)

$$\begin{aligned}
 &\frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 p_0 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_0^2} r_1 + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 r_1^2 (p_0 - p_1)}{r_1^2 - r_0^2} \frac{1}{r_1} = \\
 &= \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} r_1 + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r_1};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 p_0}{r_1^2 - r_0^2} r_1 - \frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_1^3}{r_1^2 - r_0^2} p_1 + \\
 &+ \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 r_1}{r_1^2 - r_0^2} p_0 - \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 r_1}{r_1^2 - r_0^2} p_1 = \\
 &= \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} p_1 - \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_2^2 r_1}{r_2^2 - r_1^2} p_2 + \\
 &+ \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{r_1 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} p_1 - \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{r_1 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} p_2;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\left(\frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{r_1 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \right. \\
 &\left. + \frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_1^3}{r_1^2 - r_0^2} + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{r_1 r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \right) p_1 =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 r_1}{r_1^2 - r_0^2} p_0 + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{r_0^2 r_1}{r_1^2 - r_0^2} p_0 + \\
 &+ \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_2^2 r_1}{r_2^2 - r_1^2} p_2 + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{r_1 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} p_2; \\
 p_1 &= \frac{\frac{2}{E_1} \frac{r_0^2 r_1}{r_1^2 - r_0^2} p_0 + \frac{2}{E_2} \frac{r_2^2 r_1}{r_2^2 - r_1^2} p_2}{\left[\frac{r_1}{E_2} \frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{\mu_2 r_1}{E_2} + \frac{r_1}{E_1} \frac{r_1^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} + \frac{\mu_1 r_1}{E_1} \right]}.
 \end{aligned}$$

Остаточно для контактної тиску маємо

$$p_1 = 2 \frac{\frac{p_0}{E_1} \frac{r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} + \frac{p_2}{E_2} \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}}{\left[\frac{1}{E_2} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_2 \right) + \frac{1}{E_1} \left(\frac{r_1^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} + \mu_1 \right) \right]}. \tag{15}$$

Контактну задачу розв'язано.

Напруження у двошаровому циліндрі визначаємо за формулами Леме окремо для кожного шару

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^{(1)} &= \frac{r_0^2 p_0 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_0^2} - \frac{r_0^2 r_1^2 (p_0 - p_1)}{r_1^2 - r_0^2} \frac{1}{r^2}; \\
 \sigma_\theta^{(1)} &= \frac{r_0^2 p_0 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_0^2} + \frac{r_0^2 r_1^2 (p_0 - p_1)}{r_1^2 - r_0^2} \frac{1}{r^2}; \\
 \sigma_r^{(2)} &= \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}; \\
 \sigma_\theta^{(2)} &= \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Переміщення описуються формулами (14), контактний тиск p_1 - формулою (15).

Результати, отримані в ході реалізації задачі, доводять, що міцність трубопроводу, що складається з двох контактних оболонок, навантажених внутрішнім тиском, залежить від величини внутрішнього тиску. Розрахунки, наведені для реальних умов за одержаними залежностями, свідчать, що міцність трубопроводу забезпечується при робочих тисках на 10-15% більших, ніж для трубопроводу без покриття.

Література

1. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость: Справочное пособие. – М.: Недра, 1982. – 344 с.
2. Богданова Т.И., Шехтер Ю.Н. Ингибирующие нефтяные составы для защиты от коррозии. – М.: Химия, 1984. – 247 с.

3. Жидкова М.А. О точности линеаризации уравнения движения газа: // Газовая промышленность. – М., 1965. – №11. – С.20-26.

4. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. – М.: Недра, 1975. – 288 с.

УДК 620.197

ВПЛИВ НИЗЬКОМОЛЕКУЛЯРНИХ КАРБОНОВИХ КИСЛОТ НА ВУГЛЕКИСЛУ КОРОЗИЮ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

Д.Ю.Петрина, О.О.Онищук, Я.І.Савчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42264,
e-mail: public@ifdtung.if.ua

Проблема борьбы с коррозией достигла особой остроты в связи с большим объемом металловоложений в строительство газопроводов и других объектов газовой промышленности. Одной из причин коррозионного разрушения является присутствие в продукции газовых и газоконденсатных месторождений углекислого газа и низкомолекулярных карбоновых кислот, что в условиях высоких температур и давлений обуславливает интенсивную внутреннюю коррозию. В связи с этим проведено широкий комплекс экспериментальных исследований, целью которых является установление количественной картины влияния различных факторов на интенсивность коррозионного разрушения трубной стали 17Г1С.

Problem of corrosion control reached special acuity in view of a large amount of metal investment in construction of gas pipelines and other objects of gas industry. One of the causes of corrosion damage is presence of carbon-dioxide gas and low-molecular carboxylic acid in production of gas and gas-condensate fields, that under high temperature and pressure conditions cause intensive internal corrosion. A broad spectrum of laboratory researches is conducted with the purpose of establishment the influence of the separate factors and their set (combination) on intensity of corrosive destroying of metals of trunk pipeline equipment.

Експлуатація нафтових і газових родовищ нерозривно пов'язана з корозійним руйнуванням нафтогазового устаткування, зокрема трубопроводів. Однією з причин такого виду руйнування є присутність у продукції газових і газоконденсатних родовищ вуглекислого газу та низькомолекулярних карбонових кислот, що в умовах високих температур і тисків призводить до інтенсивного корозійного руйнування внутрішньої поверхні газопромислового обладнання. Ці кислоти зустрічаються повсюдно, причому в продукції свердловин газоконденсатних родовищ вміст їх значно вищий, ніж у газових. Встановлено, наприклад, що конденсаційні води ряду родовищ Північного Кавказу характеризуються невисокою мінералізацією та наявністю в них розчиненого CO_2 та органічних кислот, кількість яких коливається в широкому інтервалі, а в окремих випадках сягає 500 мг/л і вище [1, 2]. Також зазначено, що зі збільшенням глибини залягання пласта вміст кислот у конденсаційній воді зростає, причому октова кислота складає приблизно 50...90% від суми досліджуваних кислот. Однак вивченню ступеня впливу карбонових кислот на корозію металів трубопроводів присвячено порівняно невелику кількість робіт. Встановлення дії органічних кислот і CO_2 дасть можливість, окрім оцінки їх ролі, запланувати і застосувати діючі заходи для боротьби з корозійним руйнуванням обладнання. До того ж вони зумовлюють інтенсивну внутрішню корозію, ступінь впливу якої можна оцінити тільки на основі методів внутрішньотрубного діагностування, які є надзвичай-

но дорогими порівняно з іншими і тому використовуються тільки через значні проміжки часу експлуатації трубопроводу.

Враховуючи викладене, метою нашого дослідження було кількісне визначення залежності швидкості корозії трубної сталі 17Г1С від дії низькомолекулярних карбонових кислот індивідуально та спільно з вуглекислою за різних температур і тисків. Досліджували зразки, вирізані з труби сталі 17Г1С у стані поставки (нормалізовані). Виготовлені зразки знежирювали ацетоном, промивали етиловим спиртом і завантажували в автоклав, конструктивну схему якого зображено на рис. 1.

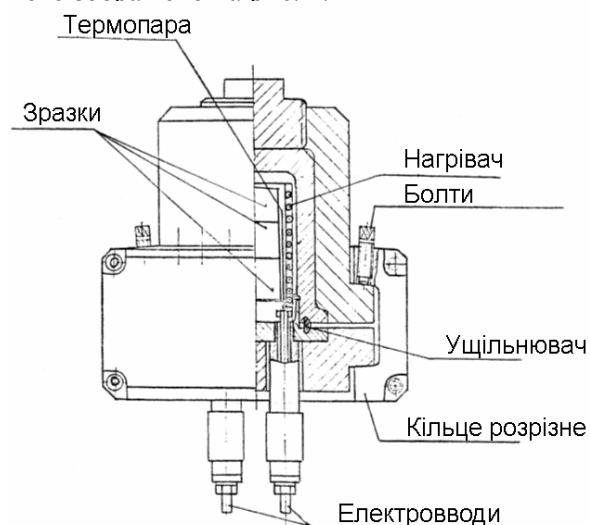


Рисунок 1 – Конструктивна схема автоклаву