



Перепічай А.О., Прохоренко В.М., Зворикін К.О.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, м. Київ

## СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВІД ЗВАРЮВАННЯ КІЛЬЦЕВИХ ШВІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРОПРОВОДІВ

### Анотація

*В роботі розглядаються результати скінченно-елементного моделювання залишкового напружено-деформованого стану в зоні кільцевих зварних стиків технологічних паропроводів, зварні шви яких реально можуть бути виконані за двома випадками: 1 – якісно без непровару в корені шва, 2 – з непроваром у корені шва, допустимим за діючими нормами завдовжки до 25% загальної довжини шва і завглибшки до 20% товщини стінки труби. В даній роботі аналізується вплив непровару кореня шва на залишковий напружено-деформований стан паропроводу в зоні кільцевого зварного шва.*

### Abstract

*In this paper the results of finite element simulation of residual stress-strain state in the area of circular welded joints of steam technology, welding seams which can realistically be accomplished in two cases: 1 – quality without lack of penetration into the root of the weld, 2 – with fusions at the root of the weld allowable for the regulations in force up to 25% of the total seam length and depth of up to 20% wall thickness. This paper analyzes the impact of lack of penetration root pass on the residual stress-strain state of the steam in the annular zone of the weld.*

### Вступ

Для оцінки міцності будь-якої конструкції необхідно мати інформацію про її напружено-деформований стан, особливо за наявності в ній тих чи інших конструктивних або технологічних концентраторів напружень і деформацій [1]. До таких конструкцій відносяться тонкостінні циліндричні оболонки з кільцевими швами, зокрема, технологічні паропроводи, у кільцевих швах яких досить часто виникає технологічний дефект у вигляді непровару кореня шва [2].

Багато технологічних паропроводів на нафтопереробних заводах з непроварами різної довжини в кільцевих зварних стиках на даний час вже відпрацювали проектний термін експлуатації. Періодичним рентгенконтролем кільцевих швів часто виявляються непровари в корені шва різної довжини і

тоді постає питання про можливість обґрунтованого продовження на деякий час безпечної експлуатації таких технологічних паропроводів без виконання ремонтних робіт із заміною пошкоджених стиків.

Сподіваємось, що аналіз залишкового напружено-деформованого стану, зумовленого зварюванням кільцевих швів технологічних паропроводів, допоможе в кінцевому підсумку вирішити складну науково-технічну задачу розрахункової оцінки залишкового ресурсу експлуатації паропроводу з виявленими ушкодженими кільцевими стиками або обґрунтованої розробки і застосування рекомендованих технологічних заходів для подальшої безпечної експлуатації паропроводу.

Сучасні інженерно-наукові обчислювальні комплекси на основі використання методу скінченних елементів дають можливість вирішувати з високою точністю задачу про залишковий напружено-деформований стан при зварюванні кільцевих швів на циліндричних оболонках.

Актуальність даної роботи обґрунтована використанням в реальних умовах трубопровідних систем з технологічними непроварами в корені шва. Такі дефекти часто утворюються внаслідок неправильного підбору режиму зварювання або неякісного виконання підготовчих робіт [2].

Непровар в корені шва є широко розповсюдженим явищем, виявляється під час діагностування кільцевих зварних стиків неруйнівним контролем і має різні форми та конфігурації. В нормативній документації існують допуски на експлуатацію конструкцій з непроварами фіксованої глибини та протяжності (табл. 1).

Спираючись на дані нормативної документації [3–6], можна стверджувати, що за певних значень довжини та глибини непровару подальша експлуатація конструкції допускається і тому є необхідним детальний розгляд і аналіз залишкового напружено-деформованого стану від зварювання, який у подальшому передбачається використати для вирішення питання про можливість продовження безпечної експлуатації кільцевого шва паропроводу з обмеженням чи без обмеження терміну. На належному рівні детальний і всебічний розгляд напружено-деформованого стану в оболонці з кільцевим швом може бути виконаний лише на основі скінченно-елементного моделювання такого стану з використанням методу скінченних елементів.

Допуски на експлуатацію конструкцій з непроварами в корені зварного шва

| Назва нормативного документа | Параметри непровару, який допускається до експлуатації |                      |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------|
|                              | глибина, % від товщини $\delta$                        | довжина по периметру |
| СНиП 3.05.05-84              | до 20%, але не більше 3 мм                             | 25%                  |
| СНиП 3.05.03-85              | до 10%, але не більше 2 мм                             | 20%                  |
| РД 34.15.027-93              | до 10%                                                 | 20%                  |
| ПН АЭ Г-7-010-89             | до 10%, але не більше 2 мм                             | 20%                  |

### Постановка задач дослідження

В роботі ставляться такі задачі дослідження:

- здійснити скінченно-елементне моделювання залишкового напружено-деформованого стану в

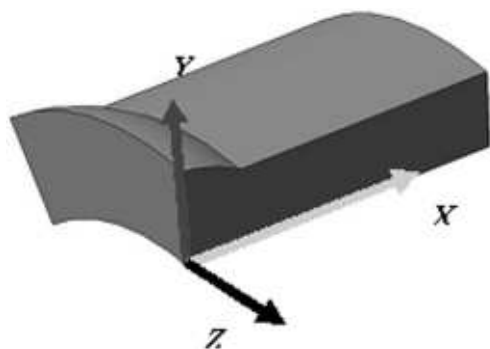


Рис. 1. Система координат для аналізу напружень та деформацій

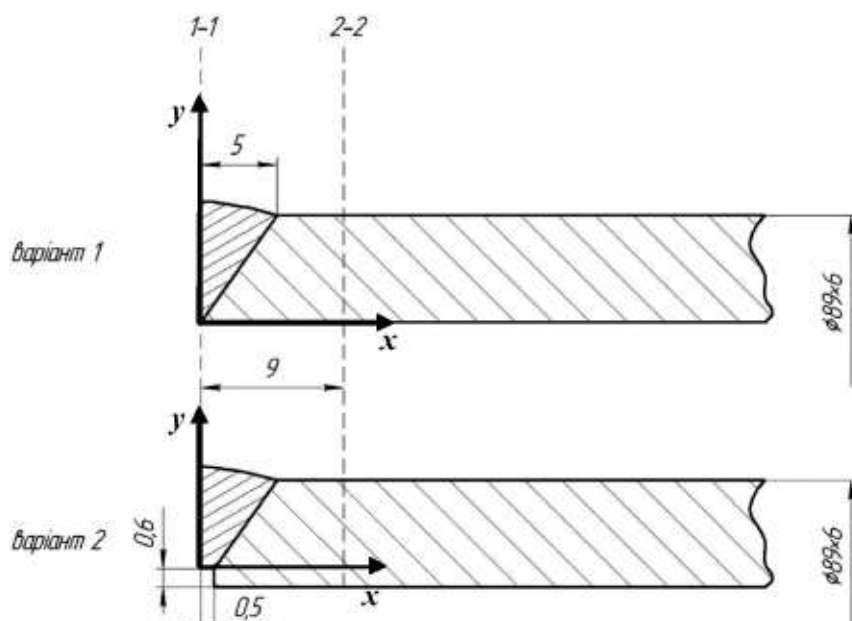


Рис. 2. Загальний вигляд та основні розміри зразка труби  $\varnothing 89 \times 6$  мм у поздовжньому перетині стінки

зоні кільцевого зварного шва технологічного паропроводу  $\varnothing 89 \times 6$  мм із сталі 10, виконаного за двома варіантами – з повним проваром кореня шва

(варіант 1) і з штучним кільцевим "непроваром" у вигляді проточки оболонки в корені шва по всій його довжині;

- побудувати для залишкового стану розподіл всіх компонентів нормальних напружень та лінійних пластичних деформацій, а також їх еквівалентних значень по товщині оболонки в напрямку двох нормалей до неї, проведених у площинах двох поперечних перетинів оболонки по шву і на відстані 9 мм від нього для згаданих вище варіантів 1 і 2 в системі координат XYZ (рис. 1, 2);

- на основі отриманих для варіантів 1 і 2 результатів проаналізувати залишковий напружено-деформований стан в зоні кільцевого зварного шва трубопроводу з точки зору впливу непровару в корені шва по всій його довжині на розподіл по товщині труби нормальних напружень та пластичних деформацій;

- за результатами аналізу зробити прогнозні висновки стосовно очікуваного впливу непровару в кільцевих зварних стиках технологічних паропроводів на їх подальшу безпечну експлуатацію.

### Основна частина

На стадії пре процесорної підготовки моделі створюється необхідна для розрахунку база даних, задається система координат, розробляються геометричні моделі циліндричних оболонок з кільцевим швом для двох варіантів зварювання (з повним проваром та із заданим непроваром у корені кільцевого шва), задаються властивості матеріалу, тип і час аналізу, режим зварювання, граничні умови, створюється сітка скінчених елементів, призначається тип елемента.

Властивості матеріалу – сталі 10: механічні – межа плинності  $\sigma_T = f(T)$  табл. 2, межа міцності  $\sigma_B = 353 \cdot 10^6$  Па, відносне залишкове видовження  $\delta = 0,25$ ,



модуль Юнга  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па, питома вага сталі  $\rho=7800$  кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ ; *теплофізичні* – коефіцієнт температурного розширення  $\alpha=12,4 \cdot 10^{-6}$  1/°С, теплопровідність  $\lambda=57$  Дж/сек·м·°С, питома теплоємність  $c=494$  Дж/°С·м<sup>3</sup>.

Напруження  $\sigma_y$  (в напрямку осі Y) у точках на нормалі 1-1 для шва з проваром і з "непроваром" помітно відрізняються (рис. 5) за характером розподілу, максимальною величиною і локалізацією зони їх дії по товщині оболонки.

Таблиця 2

Залежність межі плинності  $\sigma_T = f(T)$  сталі 10 від температури

| T, °C            | 0   | 500 | 600 | 700 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1500 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| $\sigma_T$ , МПа | 216 | 216 | 43  | 37  | 26  | 24   | 8    | 4    | 1,2  |

*Тип і час аналізу:* Поєднаний термомеханічний аналіз, з можливістю великих переміщень (Nonlinear Geometry) і автоматичною стабілізацією розсіювання енергії, час аналізу – 400 сек.

*Навантаження:* рухоме об'ємне джерело теплої Голдака [7].

*Граничні умови:* температура на торцях оболонки +20°С, задача симетрична відносно середини зварного шва (площина YZ), торці оболонки закріплені від переміщень уздовж осі X (відповідність реальним умовам зварювання стиків паропроводу).

*Тип елемента:* Неха – об'ємний 8-вузловий елемент для розв'язування поєднаної задачі термопластичності. Для матеріалу зварної оболонки приймали модель пластичності з ізотропним зміцненням.

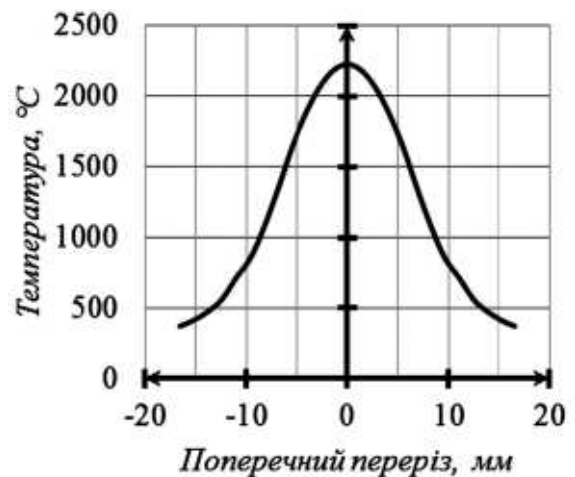
На рис. 3 представлено розподіл температури у поздовжньому перетині оболонки через шов у момент переходу дугою через даний поздовжній перетин оболонки та температурний цикл для точки в центрі шва. Отримані дані дають змогу оцінити температурний стан під час зварювання та швидкість охолодження різних ділянок оболонки в околі кільцевого шва. Після розрахунку отримуємо масив значень параметрів напружено-деформованого стану для всіх вузлів сітки.

За результатами розрахунку відібрані і представлені на рис. 4...11 залежності для залишкових нормальних напружень та лінійних пластичних деформацій уздовж нормалей 1-1 та 2-2 до оболонки в межах її товщини (рис. 2).

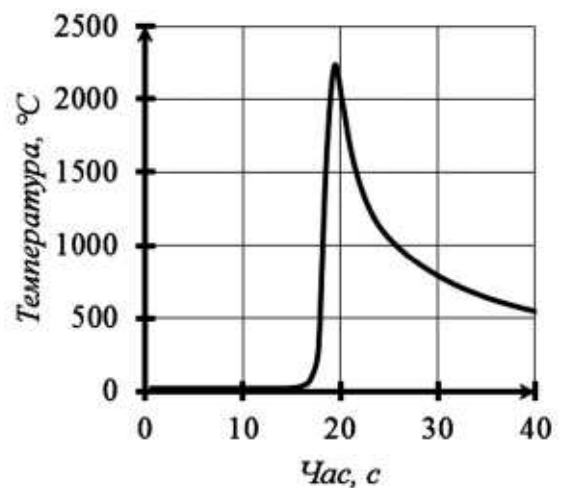
Зокрема, на рис. 4 для варіантів 1 (з повним проваром шва) і 2 (з "непроваром" у вигляді проточки в корені шва завглибшки 1,2 мм, завширшки 1 мм та завдовжки на всю довжину шва) показано розподіл по товщині циліндричної оболонки залишкових напружень  $\sigma_x$  в напрямку осі X (уздовж осі оболонки).

Як видно з рис. 4, напруження  $\sigma_x$  у поперечних перетинах оболонки для точок на нормалях 1-1 і 2-2 мало відрізняються між собою. Це пояснюється невеликою відстанню поперечних перетинів оболонки один від одного і незначним градієнтом напружень  $\sigma_x$  по координаті X.

У шві з проваром напруження  $\sigma_y$  розподілені по товщині оболонки синусоїдально з максимальним значенням близько 10 МПа, а у шві з непроваром вони зосереджені у внутрішній частині оболонки з максимумом ~75 МПа над вершиною "непровару". Це зрозуміло, оскільки "непровар" є концентратором напружень.

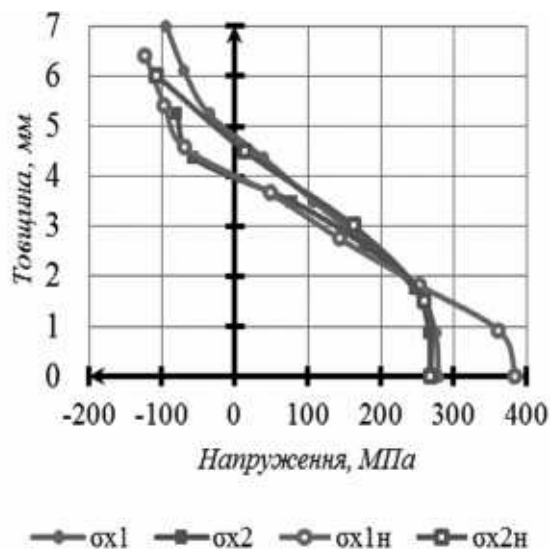


а)



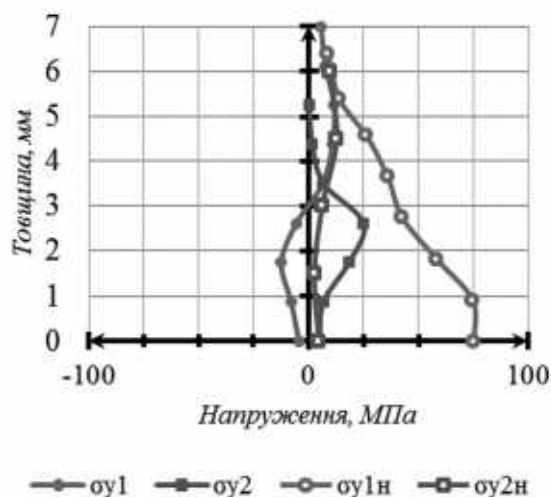
б)

Рис. 3. Розподіл температури у поздовжньому перетині оболонки через шов (а) та температурний цикл точки в центрі шва (б)



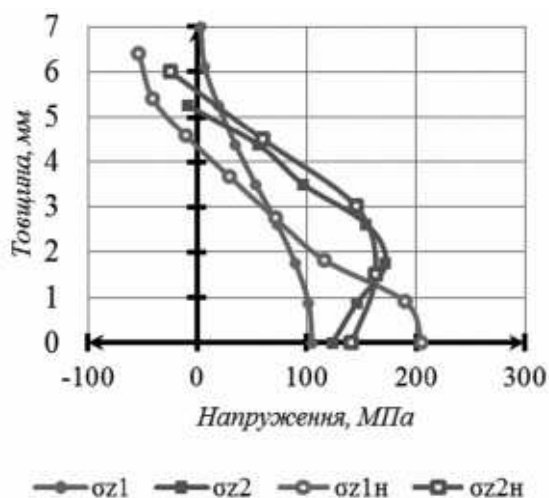
**Рис. 4.** Розподіл по товщині оболонки залишкових напружень  $\sigma_x$  (в напрямку осі  $X$  – уздовж осі оболонки):

для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\sigma_{x1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\sigma_{x2}$  – уздовж нормалі 2-2



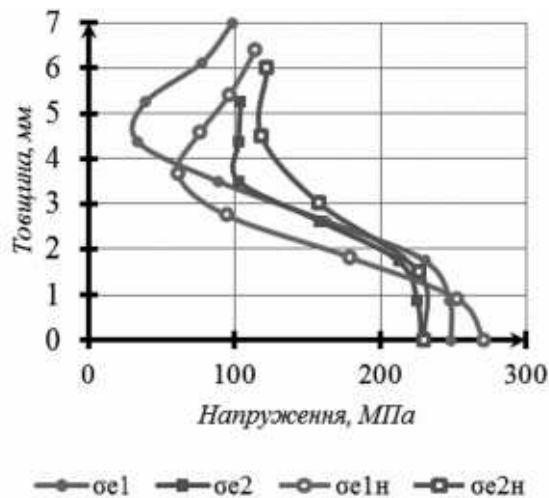
**Рис. 5.** Розподіл по товщині оболонки залишкових напружень  $\sigma_y$  (в напрямку осі  $Y$  – в напрямку товщини оболонки):

для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\sigma_{y1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\sigma_{y2}$  – уздовж нормалі 2-2



**Рис. 6.** Розподіл по товщині оболонки залишкових напружень  $\sigma_z$  (в напрямку осі  $Z$  – в окружному напрямку шва):

для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\sigma_{z1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\sigma_{z2}$  – уздовж нормалі 2-2



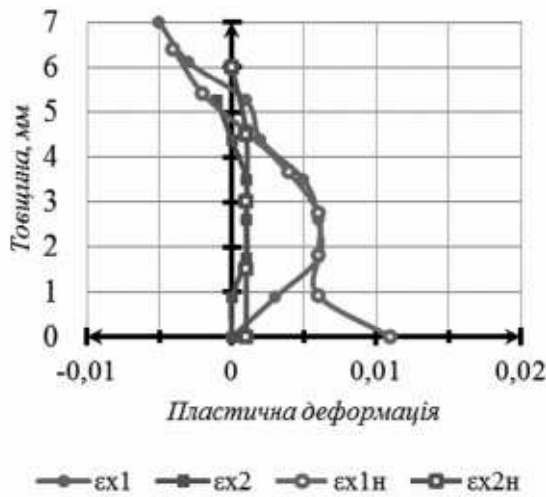
**Рис. 7.** Розподіл по товщині оболонки залишкових еквівалентних напружень  $\sigma_e$ :

для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\sigma_{e1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\sigma_{e2}$  – уздовж нормалі 2-2

Окружні напруження  $\sigma_z$  (в напрямку осі  $Z$ ) (рис. 6) в оболонці за будь-якого варіанту зварювання (з проваром кореня шва чи без нього) є додатними (розтяг), зростають по мірі наближення точки на нормалі до осі оболонки, досягають максимальних значень на внутрішній поверхні оболонки. Для шва з проваром вони дорівнюють  $\sim +105$  МПа, з непроваром  $\sim +205$  МПа. Таке збільшення напружень пов'язане з впливом концентратора у вигляді штучного "непровару".

Розподіл по товщині оболонки залишкових еквівалентних напружень  $\sigma_e$  показаний на рис. 7. Уздовж нормалі 1-1 еквівалентні напруження  $\sigma_e$  досягають максимальних значень  $\sim 230$  МПа на внутрішній поверхні оболонки для шва з проваром і  $\sim 270$  МПа для шва з "непроваром". На глибині 2,5...3,5 мм від зовнішньої поверхні вони мають найменші значення  $\sim 30$  МПа для шва з проваром і  $\sim 60$  МПа для шва з "непроваром".

Залишкові лінійні пластичні деформації  $\epsilon_x$  (уздовж осі  $X$ ) у поперечному перетині оболонки по нормалі 1-1 є двозначними (рис. 8). В зовнішній частині оболонки  $\epsilon_x$  досягають величини  $\sim -0,005$  (укорочення). По мірі переміщення точки уздовж нормалі 1-1 до осі оболонки деформації  $\epsilon_x$  змінюють знак на "+" (видовження) і деє на відстані 2...3 мм від внутрішньої поверхні оболонки досягають значення  $\sim +0,006$ . Після кристалізації розплаву зварювальної ванни пластичні деформації  $\epsilon_x$  мають знак "+" (видовження) по всій товщині оболонки. Поступово зовнішня частина оболонки охолоджується швидше за внутрішню, оскільки тепловіддача із зовнішньої поверхні більша ніж з внутрішньої. Внаслідок цього більше зростає жорсткість в'язей зі сторони зовнішньої частини оболонки, накладених на її внутрішню частину. При подальшому охолодженні внутрішньої частини оболонки пластичні деформації видовження в ній  $\epsilon_x$  поступово збільшуються, зростають напруження розтягу  $\sigma_x$ , які і зумовлюють пластичне укорочення зовнішньої частини оболонки в осьовому напрямку.



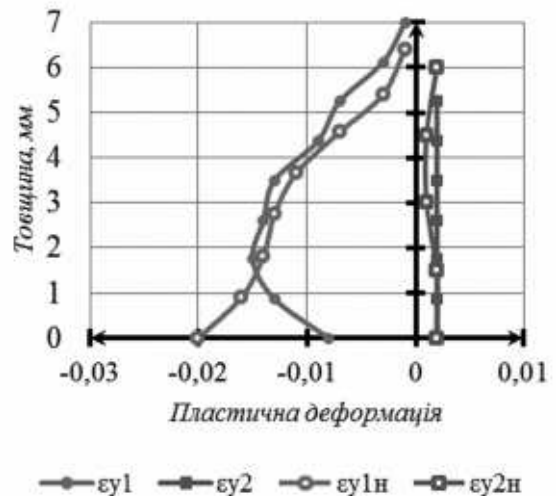
**Рис. 8.** Розподіл по товщині оболонки залишкових лінійних пластичних деформацій  $\epsilon_x$  (в напрямку осі  $X$  – уздовж осі оболонки):

для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\epsilon_{x1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\epsilon_{x2}$  – уздовж нормалі 2-2

Пластичні залишкові деформації  $\epsilon_y$  (уздовж осі  $Y$ ) в напрямку товщини оболонки на нормалі 1-1 (рис. 9) для обох випадків зварювання кільцевих швів (з проваром і "непроваром" кореня шва) мають знак "-" (укорочення) на відміну від таких же деформацій на нормалі 2-2, тобто за межами зони розплавленого металу шва. Причина появи такого знаку деформацій  $\epsilon_y$  на нормалі 1-1 полягає в тому, що нормаль 1-1 проходить по шву, де рухається при зварюванні ванна рідкого металу, в якому немає

ніякої пластичної деформації, поки він перебуває в розплавленому стані. Після кристалізації рідкого металу в ньому з'являється значне пластичне видовження (пластичні деформації  $\epsilon_x$  і  $\epsilon_z$ ) в напрямку осей  $X$  і  $Z$ . Оскільки об'єм металу при пластичній деформації не змінюється, пластичне видовження уздовж осей  $X$  і  $Z$  зумовлює утворення пластичної деформації  $\epsilon_y$  зі знаком "-" (укорочення).

Пластичні залишкові деформації  $\epsilon_z$  (уздовж осі  $Z$ ) (рис. 10) по товщині оболонки на нормалі 1-1 для обох варіантів зварювання кільцевих швів (з проваром і "непроваром" кореня шва) мають знак "+" (видовження) на відміну від таких же деформацій на нормалі 2-2. Причиною такого характеру (видовження замість укорочення) в розподілі даних деформацій, так само як це згадувалось вище, є наявність рідкого розплаву металу у зварювальній ванні, який при подальшому охолодженні після кристалізації починає в окружному напрямку (в напрямку осі  $Z$ ) пластично видовжуватись, оскільки його температурне укорочення не може реалізуватись з причини накладених на метал зварного



**Рис. 9.** Розподіл по товщині оболонки залишкових лінійних пластичних деформацій  $\epsilon_y$  (в напрямку осі  $Y$  – в напрямку товщини оболонки):

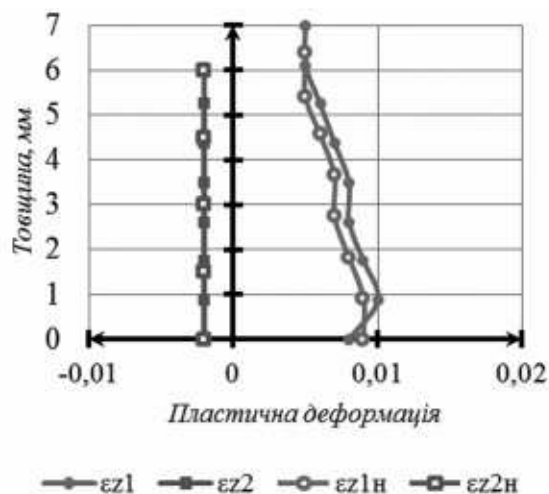
для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\epsilon_{y1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\epsilon_{y2}$  – уздовж нормалі 2-2

шва в'язей (обмежень) зі сторони металу з меншими температурами, який оточує кільцевий шов.

Еквівалентна пластична деформація (рис. 11) при зварюванні шва як з проваром, так і з непроваром кореня практично однакова по товщині оболонки за виключенням зони в околі умовної вершини "непровару". У шві з не проваром в цій зоні еквівалентна пластична деформація приблизно у 2,5 раза більша, що пов'язано з присутністю концентратора напружень і деформацій у вигляді "не-

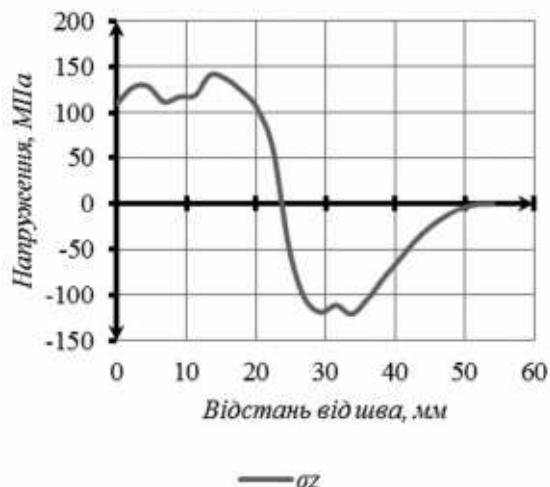
провару". Це є місце підвищеної небезпеки з точки зору міцності і працездатності кільцевого шва паропроводу.

Викликає неабиякий інтерес розподіл по осі  $X$  в залишковому стані окружних напружень  $\sigma_z$ , які є аналогом розподілу у класичному стиковому з'єднанні поздовжніх напружень у поперечному перетині з'єднання. У зв'язку з нерегулярністю сітки скінченних елементів у поздовжньому перетині оболонки важко було вибрати більш-менш прийнятний прямолінійний шлях для побудови залежності  $\sigma_z(x)$  і тому за такий шлях взяли відрізок на внутрішній твірній лінії оболонки від точки на осі



**Рис. 10.** Розподіл по товщині оболонки залишкових лінійних пластичних деформацій  $\epsilon_z$  (в напрямку осі  $Z$  – в окружному напрямку шва):

для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\epsilon_{z1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\epsilon_{z2}$  – уздовж нормалі 2-2

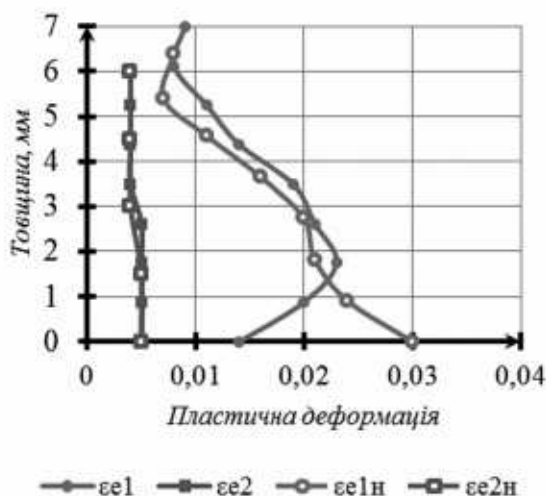


**Рис. 12.** Розподіл окружних залишкових напружень  $\sigma_z(x)$  від осі шва уздовж внутрішньої твірної циліндричної оболонки (додатний напрямку осі  $X$ )

шва в додатному напрямку осі  $X$ . Розподіл напружень  $\sigma_z(x)$  уздовж цього відрізка показано на рис. 12.

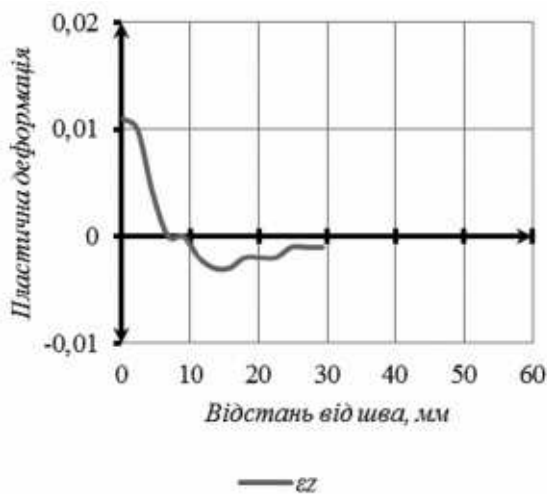
Як видно, епіюра на рис. 12 має більш-менш звичний класичний вигляд і не викликає сумнівів відносно її зрівноваженості, хоч це є розподіл напружень лише уздовж однієї лінії, а не по всій площі поздовжнього перетину оболонки в одну сторону від осі шва.

Наостанок, на рис. 13 показано розподіл уздовж згаданої вище внутрішньої твірної залишкових окружних пластичних деформацій  $\epsilon_z(x)$ . З приводу причин утворення додатних значень цих дефор-



**Рис. 11.** Розподіл по товщині оболонки залишкових еквівалентних пластичних деформацій  $\epsilon_e$ :

для варіанта 1 (з проваром кореня шва) зафарбований маркер; для варіанта 2 (з "непроваром" кореня шва у вигляді проточки) не зафарбований маркер;  $\epsilon_{e1}$  – уздовж нормалі 1-1;  $\epsilon_{e2}$  – уздовж нормалі 2-2



**Рис. 13.** Розподіл окружних залишкових пластичних деформацій  $\epsilon_z(x)$  від осі шва уздовж внутрішньої твірної циліндричної оболонки (додатний напрямку осі  $X$ )



мацій у шві мова йшла вище в даній роботі. Границя зони пластичного деформування по даному компоненту пластичної деформації в сторону від кільцевого шва складає приблизно 30 мм, що повною мірою узгоджується з наведеним вище на рис. 11 розподілом окружних напружень.

### Висновки

1. В цілому напружено-деформований стан у внутрішній частині паропроводу у точках на нормалі 1-1 є приблизно у 2...3 рази більшим порівняно із зовнішньою частиною, що можна пояснити більш швидким охолодженням зовнішньої частини оболонки порівняно з внутрішньою і поступовим зростанням при подальшому охолодженні загальної жорсткості в'язів для внутрішньої частини оболонки зі сторони зовнішньої.

2. Найявніш в корені кільцевого шва концентратора у вигляді кільцевої проточки на внутрішній поверхні труби завширшки 1 мм і завглибшки 1,2 мм, яка моделює непровар кореня шва, збільшує на нормалі 1-1 у внутрішній частині труби жорсткість (об'ємність) напружено-деформованого стану, що спостерігається у вигляді відповідних сплесків на кривих для всіх представлених напружень і пластичних деформацій саме у внутрішній частині труби.

3. Не дивлячись на невелику товщину стінки паропроводу, залишковий напружено-деформований стан оболонки є тривісним і у внутрішній її частині близьким до плоско-деформованого, що можна пояснити суттєвим зростанням жорсткості оболонки при зменшенні її діаметра.

4. Характерною особливістю напружено-деформованого стану на нормалі 1-1 в паропроводі з кільцевою проточкою є значне збільшення всіх компонентів тензора напружень і пластичних деформацій в околі "вершини" кільцевої проточки, зокрема:  $\sigma_x$  – з +280 до +380 МПа,  $\sigma_y$  – з -10 до +80 МПа,  $\sigma_z$  – з +100 до +200 МПа,  $\epsilon_x$  – з +0,0026 до +0,0060,  $\epsilon_y$  – з -0,016 до -0,013,  $\epsilon_z$  – з +0,020 до +0,024.

5. Вказані вище зміни значень компонентів напружень в околі вершини "непровару" за розрахунками відповідно до критерію пластичності Губера-Мізеса збільшують радіус гіперповерхні текучості в 1,9 раза, що зумовить зменшення майже у 4 рази розміру поправки Ірвіна [8] на пластичну зону біля вершини непровару і буде сприяти переходу металу зварного шва в цьому місці із пластичного стану у крихкий з можливістю крихкого руйнування за силовим критерієм Ірвіна [8].

### Література:

1. *Николаев Г.А.* Надежность сварных соединений и конструкций. – М., "Машиностроение", 1967. – 227 с.
2. *Волченко В.Н.* Контроль качества сварки. Учебное пособие для машиностроительных вузов. – М.: "Машиностроение", 1975. – 328 с.
3. *СНУП 3.05.05-84* "Технологическое оборудование и технологические трубопроводы".
4. *СНУП 3.05.03-85* "Тепловые сети".
5. *РД 34.15.027-93* "Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций".
6. *ПН АЭ Г-7-010-89* "Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок сварные соединения и наплавки правила контроля".
7. *Скиба В.Ю., Корниенко Е.Е., Веселов С.В., Плотникова Н.В.* Определение рациональных режимов электродуговой сварки стали 30ХГСА с помощью конечно-элементного моделирования в программном комплексе SYSWELD. НГТУ, 2004. – 10 С.
8. *Броек Д.* Основы механики разрушения: пер. с англ. / Д. Броек. – М.: В – Высш. шк., 1980. – 368 с.
9. *John A. Goldak.* Computational Welding Mechanics / John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi – Springer, 2007. – 323 с.