

ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ. ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

УДК 621.791

А. Дзюбик, І. Назар, Л. Дзюбик, Р. Палаш, А. Саковець
Національний університет "Львівська політехніка"

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ СТИКІВ ОБСАДНИХ ТРУБ

О Дзюбик А., Назар І., Дзюбик Л., Палаш Р., Саковець А., 2016

Проаналізовано особливості виготовлення обсадних колон із використанням зварювання. Зокрема, виконано планування експерименту щодо забезпечення реалізації оптимального технологічного процесу. За функцію відгуку прийнято вміст структур гартування в зоні термічного впливу з'єднання. В результаті встановлено параметри режиму, що дають змогу сформувати якісне зварне з'єднання з двох наплавлених шарів. Проведено зварювання модельних зразків стиків труб обсадних колон, експериментальну перевірку структурно-фазового складу навколошовних ділянок. Металографічний аналіз зварного з'єднання показав, що вибраний режим та спосіб накладання валиків забезпечують формування зварних з'єднань без значного вмісту структур гартування. Зварні шви щільні, не містять пор та тріщин. Залишкові зварювальні напруження першого роду визначено із використанням руйнівного та неруйнівних методів. Встановлено, що найнебезпечніші за величиною розтягальні кільцеві напруження досягають максимального значення на осі шва (340 МПа). З віддаленням від осі шва напруження зменшуються і на відстані ≈ 170 мм досягають нуля. Для встановлення напруженого стану застосовано математичний апарат експериментально-розрахункового методу умовних пластичних деформацій. Використана функція для відображення пластичних деформацій дала змогу врахувати особливості їх формування за двошарового зварювання. В результаті оптимізації функціонала, який встановлює найменшу розбіжність між експериментальними та розрахунковими значеннями встановлено невідомі параметри функції. Зокрема, визначено, що півширина поля пластичних деформацій 24 мм, а параметр кривини функції для їх відображення 1,515. Проведено розрахунок хімічного складу зварного шва для вибору зварювальних матеріалів та забезпечення необхідної міцності зварного стика. Це дало змогу врахувати вплив на формування зварного шва основного металу труб та взаємовплив окремих валиків. Згідно з отриманими результатами перший та другий валики практично не відрізняються за вмістом вуглецю та марганцю. Це свідчить про правильний вибір режиму зварювання обсадних колон, що дає змогу отримати однорідний за хімічним складом шов.

Ключові слова: обсадна колона, зварювання, залишкові напруження першого роду, зварне з'єднання.

Are analyzed casing columns production peculiarities using welding techniques. Specifically planning of experiments was executed to ensure optimal implementation of the process. The feature of feedback was taken as contents of hardening structures in the thermal compound influence area. The results enabled to set mode options that makes it possible to create high-quality weld in the implementation of the two clad layers. Model sample joints in pipe casing were welded. The experimental structure and

phase composition test of near-joint areas was provided. Metallographic weld analysis showed that the selected mode and method of blending rollers ensure the formation of welded joints without significant hardening content of structures. Welded seams tight, and does not contain any pores and cracks. Determination of welding residual stresses of the first kind was carried out, using destructive and non-destructive methods. It was found that the most dangerous and largest stretching ring tension reaches a maximum value on the axis of the joint (340 MPa). Moving from the axis of suture, tensions decrease, and at the distance of ≈ 170 mm tensions fall to zero. To identify the stress state, mathematical tools have been applied using experimental calculation method of conventional plastic deformation. This feature is applicable to display plastic deformation allowed to take into account the peculiarities of their forming at two-layer welding. As a result of optimizing the functional that sets the smallest difference between the experimental and calculated values, functions have established of parameters unknown earlier. In particular it was determined that the half-width fields plastic deformation is 24 mm and the curvature parameter function to display them 1,515. Our calculation of the chemical composition of the weld was made to select welding materials and ensure the necessary strength of welded joints. This made it possible to take into account the impact on the formation of the weld base metal pipes and interplay of individual rollers. According to the results, first and second rollers do not differ by carbon and manganese. This shows the correct choice of welding casing that provides a uniform chemical composition seam.

Key words: casing columns, welding, residual stresses of the first kind, welded joints.

Вступ. Збільшення обсягів та глибини буріння свердловин потребує застосування високопродуктивних способів отримання обсадних колон, а також спеціальних матеріалів для виготовлення труб. Це зумовлено значною довжиною газової (нафтової) колони та необхідністю забезпечення її міцності на усіх стадіях: від буріння і закріплення до тривалої експлуатації. Процес буріння передбачає послідовне нарощування секцій приєднанням над розтрубом окремих елементів. Тому у випадку зварювання переважно застосовують ручний дуговий спосіб, який найпростіше реалізувати у польових умовах. Однак труднощі забезпечення стабільної якості зварних з'єднань, потреба високої кваліфікації зварника та ймовірність утворення холодних тріщин у металі зони термічного впливу зумовили обмеження застосування дугового зварювання. Потреба застосування труб обсадних колон зі спеціальних високоміцних матеріалів та їх реакція на термічний цикл зварювання також обмежують упровадження цієї технології [1].

Сьогодні широко практично застосовують різьбові з'єднання окремих труб спеціальними муфтами. Проте при цьому зростають трудові та матеріальні затрати на буріння свердловини. Зокрема, доводиться бурити свердловину більшого діаметра (враховуючи діаметр складальної муфти), вага конструкції зростає, збільшується металомісткість. Також є небезпека саморозгвинчування труб та обриву обсадної колони [2]. Тому використання зварювальної технології із забезпеченням необхідної якості з'єднань є продуктивнішим та економічно доцільнішим.

Постановка проблеми. Аналіз зварної конструкції обсадної колони показує, що вона доволі технологічна щодо умов зварювання. Стикові з'єднання зварюють простими за конфігурацією, замкненими кільцевими швами. Проте є певні обмеження. Зокрема, зварний шов виконують на вертикальній площині в горизонтальному напрямку. Тому для автоматизації процесу зварювання над гирлом свердловини варто застосовувати спосіб, що дає змогу формувати з'єднання в цьому просторовому положенні. З'єднання стиків обсадної колони із використанням установки для зварювання колових горизонтальних швів за умови значної товщини стінок труб (до 16 мм) має здійснюватися із забезпеченням оптимального режиму, щоб запобігти утворенню структур гартування. Останні є істотним чинником зародження та розвитку тріщин внаслідок термічного циклу процесу [1, 3].

Аналіз сучасних інформаційних джерел за тематикою статті. Особливості виготовлення, ефективність та надійність експлуатації обсадних колон визначаються навантаженнями, які діють. Вони зумовлені низкою зовнішніх факторів (силові робочі навантаження від ваги метало-конструкції, тиску навколишнього середовища тощо) та технологічних чинників (структурні зміни

в зоні термічного впливу, залишкові зварювальні напруження, нерівномірність зварного шва тощо) [2, 4, 5]. Також можливі інші навантаження на колону, які складно спрогнозувати та врахувати під час виготовлення конструкції. Це – згинальні навантаження під час опускання колони від неспіввісності її секцій та свердловини. Значний температурний градієнт у матеріалі обсадної колони може спричинити виникнення температурних напружень [2]. У результаті одночасної дії різнотипних навантажень знижується працездатність колони. Тому важливим етапом розроблення технологічного процесу зварювання обсадних труб є створення енергоощадних умов із забезпеченням заданих експлуатаційних властивостей з'єднань [1].

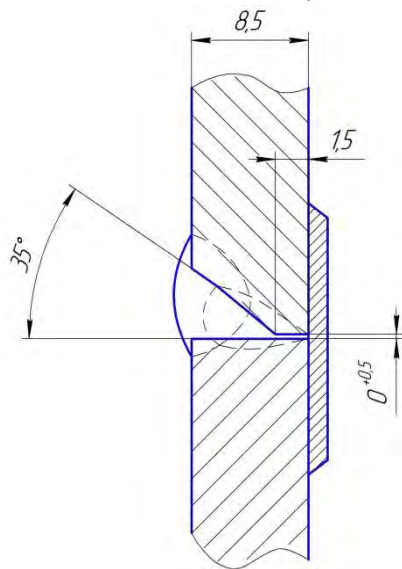


Рис. 1. Одностороння розробка крайок у зварному з'єднанні обсадних труб

конкретної зварної конструкції. Отож важливо оцінити структурно-фазовий склад металу під час виготовленні стиків труб обсадних колон та створити умови для забезпечення їхньої тріщиностійкості. Важливо дослідити залишкові зварювальні напруження та особливості їх розподілу в наволошовних ділянках. Це дасть змогу точніше прогнозувати роботоздатність зварної обсадної колони, адже ці напруження знижують міцність з'єднання і можуть призвести до його руйнування [8].

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – вивчити особливості дугового зварювання труб обсадних колон та умов забезпечення їхньої технологічної міцності. Для цього потрібно змоделювати параметри режиму технологічного процесу, проаналізувати мікроструктуру і визначити залишковий напружений стан у різних ділянках зони термічного впливу зварного з'єднання труб.

Основний зміст. У роботі розглянуто технологічний процес зварювання труб обсадних колон геологорозвідувальних свердловин із конструкційної низьколегованої сталі 18Г2АФ. Діаметр труб – 170 мм, товщина стінки – 8,5 мм. Матеріал характеризується високою міцністю, проте чутливий до термічного циклу зварювання. Тут утворюються структури гартування, а з'єднання схильні до виникнення холодних тріщин. Переважно застосовують ручний дуговий спосіб – простий у використанні та дешевий із погляду устаткування. Однак, використовуючи його, складно регулювати термічний цикл та стабілізувати якісні показники з'єднання. Аналіз особливостей реалізації технологічного процесу показав доцільність упровадження автоматичного зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів [4]. Зважаючи на товщину стінки труби, зварювати шов необхідно за два шари електродним дротом діаметром 1,6 мм. Менший діаметр не забезпечить формування двошарового з'єднання (за більшої кількості шарів зростають

трудозатрати, а один шар не забезпечує необхідного підігрівання зварювальних крайок), більший діаметр дроту спричинить збільшення об'єму рідкого металу в зварювальній ванні, що погіршить формування шва у вертикальному положенні. Використаємо односторонню розробку крайок з підкладкою (рис. 1), де нижня крайка виконує функцію утримувальної основи розплавленого металу та сприяє необхідному формуванню шва.

Визначення оптимальних параметрів режиму здійснювалося на основі планування та реалізації серії окремих експериментів. Вивчали вплив параметрів режиму зварювання на структурно-фазовий склад металу зварного з'єднання, зважаючи на особливості технології та устаткування для зварювання обсадних колон. Використовувалося основне та спеціально сконструйоване допоміжне устаткування. Як фактори вибрано напругу дуги (X_1), швидкість зварювання (X_2) та силу струму (X_3). Параметром оптимізації (Y), величина якого визначається значеннями факторів, прийнято вміст мартенситу в зоні термічного впливу основного металу після накладання другого валика (Y). Однак, досліджуючи зразки, брали до уваги й інші характеристики зварного з'єднання, а саме: рівномірність проплавлення крайок, провар кореня шва, наявність дефектів типу пори, підрізи тощо, які не ввійшли у вигляді функції відгуку, але суттєво впливають на працездатність зварного з'єднання. Для одержання математичної моделі використовували повний факторний експеримент [4]. Аналіз можливих коливань факторів дав змогу визначити межі їх варіювання, а також необхідність дослідження на двох рівнях. Рівні факторів та інтервали їх варіювання подано в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали їх варіювання

Показник	Фактори		
	напруга дуги, В (X_1)	швидкість звар., м/год (X_2)	струм звар., А (X_3)
Основний рівень	22	23	185
Інтервал варіювання (Δx_i)	3	2	20

У дослідженнях застосовано дворівневий трифакторний експеримент з лінійною моделлю першого порядку [4], яка охоплює все поле досліджень. План, що містить запис всіх комбінацій факторів або їх частин у кодованій формі, являє собою матрицю планування (табл. 2).

Таблиця 2

Матриці планування на три фактори

Номер досліджу	X_0	X_1	X_2	X_3	$Y, \%$
1	+1	+1	+1	+1	5.3
2	+1	-1	+1	+1	8.4
3	+1	+1	-1	+1	3.2
4	+1	-1	-1	+1	6.3
5	+1	+1	+1	-1	7.4
6	+1	-1	+1	-1	18
7	+1	+1	-1	-1	5
8	+1	-1	-1	-1	10

Отримана лінійна модель має такий вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3, \quad (1)$$

де b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти лінійної моделі, які визначаються на підставі результатів дослідження структурно-фазового складу отриманих зварних з'єднань ($b_0=7,95; b_1=-2,15; b_2=1,825; b_3=-2,725$).

Результати досліджень відрізняються на певну величину через наявність факторів, які неможливо визначити (коливання напруги в мережі, нерівномірність подавання дроту через проковзування між роликami механізму подавання тощо). Ці похибки оцінювались за допомогою дисперсії відтворюваності. Середньоквадратичне відхилення під час визначення параметра оптимізації допустиме. Перевірка адекватності лінійної моделі, виконана із застосуванням критерію Фішера, підтвердила гіпотезу про адекватність отриманої лінійної моделі.

Результати досліджень показують, що найкраще формування структури, з погляду мінімального вмісту мартенситу, отримано в 1, 3 та 7 дослідях. Однак, якщо брати до уваги формування з'єднання, зовнішній вигляд зварного шва, рівномірність проплавлення крайок та кореня шва, відсутність дефектів типу пор та підрізів, можна зробити висновок, що оптимальними параметрами зварювання є ті, що відповідають досліду 7, а саме: $d_{\text{ел}} = 1,6$ мм; $I_{\text{зв}} = 165$ А; $U_{\text{д}} = 25$ В; $V_{\text{зв}} = 21$ м/год; $V_{\text{пд. др}} = 145$ м/год.

Проведено розрахунок хімічного складу шва для вибору зварювальних матеріалів та забезпечення необхідної міцності стику. Це дало змогу врахувати вплив на формування зварного шва основного металу труб та взаємовплив окремих валиків. Згідно з отриманими результатами перший та другий валики практично не відрізняються за вмістом вуглецю та марганцю. Це свідчить про правильний вибір режиму зварювання обсадних колон, який дає змогу отримати однорідний за хімічним складом шов.

Вплив режиму зварювання на структуру пришовної ділянки зварного з'єднання зі сталі 18Г2АФ розглянуто з використанням діаграми структурного перетворення аустеніту за різних швидкостей охолодження [9, 10]. Розрахунок швидкостей охолодження для першого та другого валиків виконано згідно зі співвідношенням [10]:

$$\omega_{\text{ох}}^{1,2} = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{\frac{q_{\text{ш}}}{V_{\text{зв}}}} \psi, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності ($\lambda = 32$ Вт/(м·град)); T – температура, за якої встановлюємо швидкість охолодження ($T = 500$ °С); T_0 – температура зразка до зварювання ($T_{01} = 20$ °С – перший валик, $T_{02} = 250$ °С – другий валик), ψ – коефіцієнт, який залежить від товщини труби та режиму зварювання, визначається за спеціальною номограмою ($\psi = 0.25$).

У результаті отримано такі швидкості охолодження для окремих валиків: $\omega_{\text{ох}}^1 = 20$ град/с; $\omega_{\text{ох}}^2 = 5.4$ град/с, які нанесли на діаграму структурних перетворень сталі 18Г2АФ (рис. 2) [9].

Згідно з діаграмою (рис. 2), структура пришовної ділянки після повного охолодження першого валика така: мартенсит ≈ 60 %, перліт + бейніт ≈ 40 %. Оскільки вміст мартенситу перевищує допустиму величину (≈ 25 %), це сприяє утворенню тріщин. Щоб запобігти утворенню тріщин у пришовній ділянці та зменшити залишкові напруження першого роду, ми застосували безперервне двошарове зварювання, за якого відбувається підігрівання (відпуск) попередньо накладеного валика та покращення його структури. Пришовна структура другого валика така: мартенсит ≈ 5 %; перліт + бейніт ≈ 88 %, ферит ≈ 7 %. Отже, запропоновані послідовність виконання швів та режими зварювання забезпечують отримання з'єднань, не схильних до утворення тріщин під впливом термічного циклу зварювання.

Дослідження залишкових зварювальних напружень виконано за результатами експериментальних вимірювань та моделювання із використанням математичного апарату методу умовних пластичних деформацій [9, 10]. Він ґрунтується на використанні доступних даних про напруження або їхні характеристики та врахування фізико-хімічних процесів, що відбуваються при цьому. Встановлення характеру та рівня залишкових напружень дає змогу оцінити експлуатаційну надійність зварної конструкції загалом.

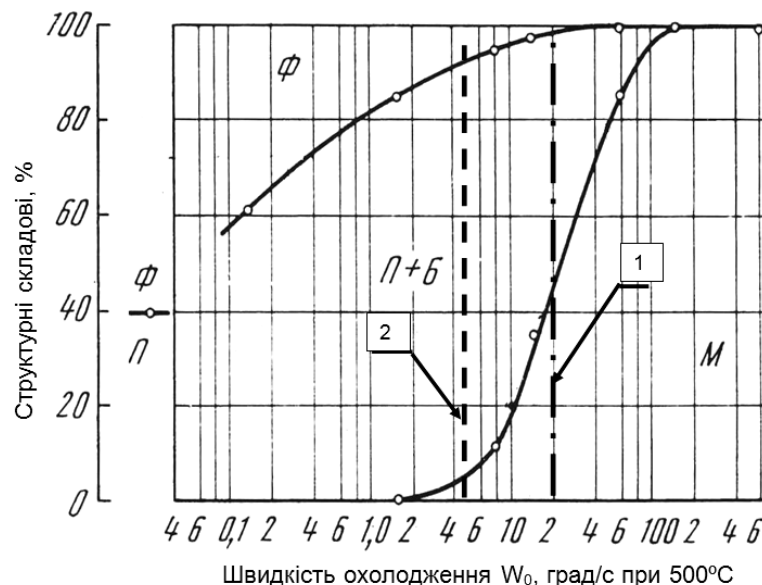


Рис. 2. Діаграма структурних перетворень сталі 18Г2АФ:
1, 2 – структура пришовної ділянки під час виконання першого
та другого валиків відповідно

Аналіз літературних даних показує, що у випадку зварювання стиків труб найбільші значення напружень спостерігаються в околі зварного шва [11, 12], максимальні вони на внутрішній поверхні зварного шва. За напрямком дії більшими за значеннями є кільцеві напруження. Менші за значенням осьові, обернено розподілені на різних поверхнях труби: на внутрішній вони розтягальні, а на зовнішній – стискальні. Напруження є коливними із поступовим згасанням з віддаленням від осі шва. Аналіз літературних даних [4, 7, 12] показує, що для сталей, схильних до гартування, спостерігається складніший розподіл напружень. Часто на осі зварного шва вони є меншими, а збільшуються в околі зони сплавлення та прилеглих ділянках основного металу. За такого зміщення максимальних значень напружень ймовірно прискорене руйнування конструкції через вищу схильність матеріалу до зародження та розвитку тріщин. Тут необхідно застосовувати відповідні представлення для тензора зварювальних деформацій [12, 13].

Експериментальне визначення напружень реалізовано за допомогою комплексного використання руйнівного та неруйнівного методів. У першому випадку використано методику магнітопружної тензометрії із застосуванням приладу SMMT-3, а у другому – визначення напружень за результатами електротензометрії приладом ИДЦ-1. Практику застосування неруйнівного методу доволі добре розкрито в спеціальній літературі [4]. Отримані результати відображають інтегральні значення різниці головних напружень за вимірювальною базою давача пристрою. Тому їх доцільно застосовувати безпосередньо у математичному апараті експериментально-розрахункового методу.

Щодо руйнівного методу, то виконано вимірювання показів тензорезисторів до і після розрізання зварних з'єднань модельних стиків труб обсадної колони на окремі елементи, за методикою, рекомендованою [14].

Отримано добрий збіг експериментальних даних руйнівного та неруйнівного методів. Зокрема, різниця головних напружень на відстані 15 мм від шва, визначена руйнівним методом, становить 175,4 МПа, а магнітопружною тензометрією – 183,9 МПа. Відхилення даних $\approx 5\%$ допустиме.

Однак повнішу та адекватнішу картину напруженого стану можна отримати, використовуючи такі співвідношення методу умовних пластичних деформацій [12]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha) &= \frac{E\varepsilon_0^*}{1-\mu^2} \left[\frac{abm(S+\mu)}{2h} \gamma \Gamma_1(\alpha) - \frac{a^3 \left(1 - \frac{4}{3}m\right)}{R} \gamma \Gamma_2(\alpha) + \sigma_{\alpha\alpha}^*(\gamma) \right]; \\ \sigma_{\beta\beta}(\alpha) &= E\varepsilon_0^* \left\{ \left[-\frac{a}{2} \left(1 - \frac{4}{3}m\right) + \frac{abm\mu(S+\mu)}{2h(1-\mu^2)} \gamma \right] \Gamma_1(\alpha) - \right. \\ &\quad \left. - \left[\frac{Rbm(S+\mu)}{4ah} + \frac{\mu a^3 \left(1 - \frac{4}{3}m\right)}{R(1-\mu^2)} \gamma \right] \Gamma_2(\alpha) + \varphi(\alpha) \left[\frac{mb}{h} \gamma + \left(1 - \frac{4}{3}m\right) \right] + \frac{\sigma_{\beta\beta}^*}{1-\mu^2} \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha)$, $\sigma_{\beta\beta}(\alpha)$ – осьові та кільцеві нормальні напруження відповідно; $\alpha = x/R$ (x – відстань вздовж твірної труби від осі шва); R – радіус серединної поверхні труби; $a = \sqrt[4]{3R^2(1-\mu^2)/(4h^2)}$; μ – коефіцієнт Пуассона; h – півтовщина труби; γ – зміна за товщиною; E – модуль Юнга; S – коефіцієнт, який задає співвідношення між величиною поля пластичних деформацій в осьовому та кільцевому напрямках; m , b – коефіцієнти, які визначаються геометрією крайок; ε_0^* , α_0 , $\varphi(\alpha)$ – максимальні пластичні деформації, півширина їх області та функція, що характеризує зміну деформацій вздовж твірної труби.

Також використано такі скорочення у виразах (3):

$$\Gamma_{1,2}(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\xi) e^{-a|\xi-\alpha|} [\cos a(\xi-m\alpha) + \sin a|\xi-\alpha|] d\xi; \quad \sigma_{\alpha\alpha}^*(\gamma) = -\varphi(\alpha) m \left(\frac{\gamma^2}{h^2} - \frac{1}{3} \right) (S+\mu);$$

$$\sigma_{\beta\beta}^*(\gamma) = \sigma_{\alpha\alpha}^*(\gamma) (1+S\mu)/(S+\mu).$$

Для відображення функції ($\varphi(\alpha)$), яка характеризує зміну пластичних деформацій вздовж твірної стику труб зі сталі, що схильна до гартування під дією термічного циклу зварювання, використано представлення у вигляді системи рівнянь (4) [13], де $\varphi_1(\alpha)$ описує крива на відрітку від осі шва до деякого максимального значення (α_{0m}), а $\varphi_2(\alpha)$ – решта області існування деформацій; α_0 ; $p_1 \dots p_7$ – невідомі коефіцієнти функцій, які визначаються залежно від прийнятого виду поля пластичних деформацій.

$$\varphi(\alpha) = \begin{cases} \varphi_1(\alpha) = p_1 + p_2 \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} + p_3 \frac{\alpha^3}{\alpha_0^3}, & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{0m} \\ \varphi_2(\alpha) = p_4 + p_5 \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} + p_6 \frac{\alpha^3}{\alpha_0^3} + p_7 \frac{\alpha^4}{\alpha_0^4}, & \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_{0m} \\ 0, & \alpha \geq \alpha_0 \end{cases} \quad (4)$$

Для знаходження невідомих параметрів $p_1 \dots p_6$, які задовольняють умови сходження двох функцій та гладкості, використаємо таку систему рівнянь (5) [13]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(0) &= A_3 \\ \varphi_1(\alpha_{0m}) &= \varphi_2(\alpha_{0m}) \\ \varphi_1'(\alpha_{0m}) &= \varphi_2'(\alpha_{0m}) \\ \varphi_2(\alpha_0) &= 0 \\ \varphi_2'(\alpha_0) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де A_3 – величина залишкових деформацій на осі зварного шва. Розв'язуючи систему (6) відносно p_4 можна встановити решту невідомих параметрів (зокрема $A_3=p_1$). Використовуючи доступні дані про напруження або їх співвідношення, будують спеціальний мінімізуючий функціонал, який встановлює найменшу розбіжність між експериментально визначеними та розрахунковими значеннями напружень [4]. Визначені при цьому параметри характеризують залишкові пластичні деформації та застосовуються для обчислення розподілу напружень в околі шва.

На рис. 3 показано характер розподілу залишкових напружень та функції для відображення пластичних деформацій в околі зварного шва стикового з'єднання труб обсадної колони для таких параметрів: $p_1=0,714$; $p_4=1,515$; $\alpha_0=24$ мм; $\alpha_{0\min}=20,8$ мм.

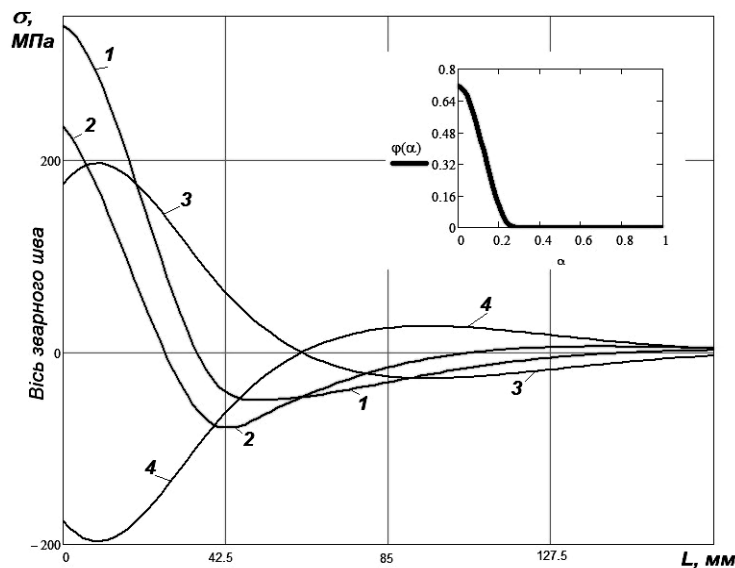


Рис. 3. Залишкові зварювальні напруження у стику обсадних труб:

$\varphi(\alpha)$ – функція для відображення пластичних деформацій;

1, 2 – пунктирні лінії, що характеризують нормальні колові напруження на внутрішній та зовнішній поверхнях відповідно; 3, 4 – суцільні лінії, що характеризують нормальні осьові напруження на зовнішній та внутрішній поверхнях труби

Встановлено, що найнебезпечніші за величиною розтягальні кільцеві напруження досягають максимального значення на внутрішній поверхні на осі зварного шва (≈ 340 МПа) і становлять ≈ 92 % від межі текучості матеріалу (440 МПа). З віддаленням від осі шва кільцеві напруження зменшуються і на відстані ≈ 170 мм дорівнюють нулеві.

Висновки. Отримані результати показують, що для виготовлення обсадних колон геолого-розвідувальних свердловин цілком можливо використовувати технологічний процес зварювання, але необхідно враховувати особливості структурних перетворень під час дії термічного циклу зварювання. Металографічний аналіз зварного з'єднання показав, що вибраний режим та спосіб накладання валиків забезпечують формування зварних з'єднань без значного вмісту структур гартування. Виконано планування та здійснено експерименти для вибору оптимальних параметрів режиму зварювання. Визначено залишкові напруження першого роду в зварних з'єднаннях.

1. Дзюбик А. Р., Дзюбик Л. В. Забезпечення енергоощадних умов формування зварних з'єднань підвищеної міцності // Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції "Енергоощадні машини і технології". – К.: КНУБА, 2015. – С. 78. 2. Еременко Т. Е. Исследование и

расчет обсадных труб. – К.: Гос. изд-во техн. лит. УССР, 1962. – 212 с. 3. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с. 4. Підвищення ефективності зварювання магістральних трубопроводів при їх експлуатації та ремонті: [монографія] / А. Р. Дзюбик, І. Б. Назар, Р. В. Палаш. – Л.: Сполом, 2013. – 251 с. 5. Коцкулич Я. С., Ковбасюк І. М., Марцинків О. Б., Палійчук І. І., Витвицький І. І. Розрахунок обсадних колон при складному навантаженні // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 4(30) – С. 1–6. 6. Касаткин Б. С., Волков В. В., Кратко А. Г. Исследование условий образования поперечных трещин при сварке стали 14Х2ГМР // Автоматическая сварка. – 1979. – № 10. – С. 1–3. 7. Лобанов Л. М., Миходуй Л. И., Васильев В. Г., Позняков В. Д., Миходуй О. Л., Гончар А. К. Особенности протекания термомодеформационных процессов при дуговой сварке высокопрочных сталей // Автоматическая сварка. – 1999. – № 3. – С. 13–17. 8. Dzyubuk A. R., Nykolyshyn T. M., Porokhovs'kyi Yu. V. Influence of Residual Stresses on the Limit Equilibrium of a Pipeline with Internal Crack of Arbitrary Configuration // Materials Science, Vol.5 2, No.1, July, 2016, P. 89 – 98, doi:10.1007/s11003-016-9930-4. 9. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке: атлас. – М., 1972. – 219 с. 10. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов // В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др.; под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. – 559 с. 11. Дзюбик А. Р., Назар І. Б., Палаш Р. В. Метод визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях коловим швом сталей, схильних до гартування // Машинознавство. – 2002. – № 4. – С. 33–36. 12. Осадчук В. А., Дзюбик А. Р., Палаш Р. В. Напруження у стикових зварних з'єднаннях кільцевим швом труб, які схильні до гартування // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2002. – № 456. – С. 107–112. 13. Дзюбик А. Р. Моделювання залишкових пластичних деформацій в зварних з'єднаннях // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2002. – № 467. – С. 123–127. 14. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справ. пособ. / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, П. И. Полухин, Н. А. Чиченев. – К.: Наукова думка, 1981. – 584 с.