

Висновки. Внаслідок експериментальних досліджень отримано регресивні залежності точності пиляння від швидкості подачі та затупленості інструменту для горизонтальної та вертикальної пилок.

Внаслідок аналізу отриманих рівнянь регресії встановлено, що для горизонтальної пилки величина впливу швидкості подачі на поле розсіювання майже в два рази більша від впливу затупленості інструменту, а для вертикальної пилки – майже в чотири рази.

Із аналізу отриманих діаграм динаміки точності за період стійкості інструмента встановлено, що горизонтальна пилка розпилює деревину з меншою точністю, ніж вертикальна через складніші умови її роботи.

На основі виконаних досліджень встановлено, що технологічна точність верстата є низькою і не забезпечує відповідних вимог щодо точності виготовлення обрізних пиломатеріалів, тому конструкція верстата потребує подальшого вдосконалення.

Література

1. Пилипчук М.І. Методика дослідження точності розпилювання колод на круглопилковому верстаті "Ясень-Баракуда" // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць / М.І. Пилипчук, М.Р. Бурдяк. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2009. – Вип. 19.6. – С. 124-129.
2. Пилипчук М.І. Аналіз конструкцій верстатів для ортогонального розпилювання колод круглими пилами // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць / М.І. Пилипчук, П.В. Андрієвський. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2009. – Вип. 19.7. – С. 146-132.
3. Паспорт поздовжнього-обрізного верстата ВПО-1 "Ясень-Баракуда". – 10 с.
4. Манжос Ф.М. Точность механической обработки древесины : учебник [для ВУЗов]. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1959. – 264 с.
5. Комаров Г.А. Точность дереворежущих станков. Размерная настройка : учебн. пособ. [для ВУЗов]. – М. : Изд-во "Наука", 1985. – 56 с.
6. Пилипчук М.І. Основні напрями розвитку теорії точності механічного оброблення деревини та деревних матеріалів // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : УкрДЛТУ. – 2005. – Вип. 15.1. – С. 165-170.
7. Пилипчук М.І. Основи наукових досліджень : підручник / М.І. Пилипчук, А.С. Григор'єв, В.В. Шостак. – К. : Вид-во "Наука", 2007. – 270 с.

УДК 539.3

*Доц. А.Р. Дзюбик, канд. техн. наук; доц. Р.В. Палаш,
канд. техн. наук; доц. І.Б. Назар, канд. техн. наук –
НУ "Львівська політехніка"*

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ІЗ ВИСОКО МІЦНИХ СТАЛЕЙ

Розглянуто можливість застосування пластичних швів під час зварювання магістральних трубопроводів із низьколегованих сталей в термічному або термомеханічному зміцненому стані. Розвинуто експериментально-розрахунковий метод для дослідження напруженого стану зварних з'єднань. Досліджено вплив величин зони пластичних деформацій на величину залишкових зварювальних напружень.

Ключові слова: магістральний трубопровід, низьколегована сталь, експериментально-розрахунковий метод, поле пластичних деформацій.

*Assoc. prof. A.R. Dsjubyk; assoc. prof. R.W. Palash;
assoc. prof. I.B. Nazar – NU "L'vivs'ka Politehnika"*

Providing of technological durability of the welded connections of main pipelines from highly strong steel

In the article possibility of application of plastic stitches is considered at welding of main pipelines from low alloyed steel in thermal or термомеханічному the fixed state. The developed experimentally-calculation method is offered for research of the tense state of the welded connections. Explored influence of sizes of area of plastic deformations on the size of remaining welding tensions.

Keywords: low alloyed steel, experimentally-calculation method, weeds plastic deformations.

Постановка проблеми та аналіз досліджень і публікацій. Новітні тенденції розвитку трубопровідного транспорту потребують застосування труб збільшеного діаметра в діапазоні від 1020 до 1420 мм. При цьому для отримання заданих експлуатаційних властивостей широко застосовують низьколеговані сталі в термічному або термомеханічному зміцненому стані класу міцності X60 – X70, які забезпечують такі механічні характеристики: σ_B , МПа $\geq 420 \dots 600$; σ_T , МПа $\geq 440 \dots 460$; δ_5 , % $\geq 17 \dots 19$. Для отримання рівномірних зварних з'єднань для таких сталей у заводських умовах потрібно вживати комплекс заходів для запобігання утворенню несприятливих структур гартування та технологічних дефектів, передусім тріщин. Однак, для них характерна підвищена енергозатратність та вони не завжди застосовні. Зокрема, під час зварювання магістральних трубопроводів в польових умовах складно забезпечити супутній підігрів та післязварювальне термічне оброблення. Утворення при цьому залишкового напруженого стану, який характеризується значним рівнем та нерівномірністю розподілу в зварному з'єднанні, підвищує ймовірність виникнення технологічних тріщин.

Одним із шляхів забезпечення технологічної міцності таких стиків без додаткових заходів є використання пластичних швів. Це дає змогу отримати рівномірні елементи конструкції та зменшити матеріальні затрати на їх виготовлення [1, 2]. Однак, специфіка формування напруженого стану при цьому пов'язана із утворенням структур гартування в процесі охолодження [3, 4]. Часто картина розподілу напружень ускладнюється здійсненням локального термооброблення або формуванням шва із металом, відмінним від основного. Так, у з'єднаннях з аустенітним швом кінетика формування залишкових напружень ускладнюється через невідповідність закономірностей перебігу об'ємно-структурних змін металу в суміжних шарах з'єднання.

Потреба забезпечення технологічної та експлуатаційної надійності елементів з кільцевими з'єднаннями із високоміцних сталей зумовлює потребу вивчення впливу параметрів режиму зварювання на залишковий напружений стан, що надалі уможливить досягнення його оптимального рівня. Тому потрібний надійний та інформативний спосіб визначення напружень у довільній точці з'єднання.

Мета та задачі досліджень полягають у вивченні можливості забезпечення технологічної міцності з'єднань за зварювання магістральних тру-

бопроводів із низьколегованих сталей в термічному або термомеханічному зміцненому стані на основі оптимізації напруженого стану.

Основний матеріал. Дослідження виконували для кільцевих швів стикових зварних з'єднань труб великих діаметрів із високоміцних сталей, схильних до мартенситного перетворення під дією термодформаційного циклу зварювання. Для розрахунку розподілу залишкових напружень застосовували експериментально-розрахунковий метод умовних пластичних деформацій, що базується на розв'язанні обернених задач механіки напружених деформівних тіл, з використанням експериментальних та теоретичних даних про напруження у зварних з'єднаннях елементів конструкцій з високоміцних сталей [5], модифікований для випадку зварювання високоміцних трубних сталей, схильних до аустеніто-мартенситного й аустеніто-бейнітного перетворень під дією термодформаційного циклу зварювання (ТДЦЗ). Запропоновано множину функцій, яка дає змогу апроксимувати поля залишкових пластичних деформацій для низьколегованих сталей класу міцності Х60 – Х70.

У розрахунковій моделі трубу описуємо як оболонку, яку віднесено до триортогональної системи координат α, β, γ , де $\alpha = z/R$ (z – віддаль вздовж твірної оболонки, R – радіус серединної поверхні оболонки), β – кутова координата, γ – координата вздовж зовнішньої нормалі від серединної поверхні оболонки. На основі аналізу експериментальних даних, наведених в літературі [1, 2], поле власних колових деформацій біля кільцевого зварного шва апроксимуємо виразами:

$$\varepsilon_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) = -\varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha) \cdot S^0(\alpha), \quad (1)$$

$$\varphi(\alpha) = \begin{cases} \varphi_1(\alpha), & \text{якщо } 0 \leq |\alpha| \leq \alpha_m; \\ \varphi_2(\alpha), & \text{якщо } \alpha_m \leq |\alpha| \leq \alpha_0, \end{cases} \quad (2)$$

де: $\varphi^*(\alpha) = \varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha)$, $S^0(\alpha) = 1, |\alpha| \leq \alpha_0$, $S^0(\alpha) = 0, |\alpha| > \alpha_0$, $\alpha_0 = \frac{z_0}{R}$, z_0 – півширина зони пластичних деформацій. Функції $\varphi_1(\alpha)$ та $\varphi_2(\alpha)$ описують виразами:

$$\begin{aligned} \varphi_1(\alpha) &= a_0 + a_1 \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^4 + a_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^6; \\ \varphi_2(\alpha) &= b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} - 2 \frac{\alpha_m}{\alpha_0} \right)^3 + b_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} - 2 \frac{\alpha_m}{\alpha_0} \right)^4 + b_3 \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} - 2 \frac{\alpha_m}{\alpha_0} \right)^6, \end{aligned} \quad (3)$$

Невідомі параметри $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, b_0, b_1, b_2, b_3$ знаходимо під час розв'язання системи рівнянь, що забезпечує умови гладкості функції $\varphi(\alpha)$ на всьому проміжку її існування.

На рис. 1 зображено вигляд функції $\varphi(\alpha)$, що якісно описує поле залишкових пластичних деформацій для випадку кільцевого зварного з'єднання високоміцної гартівної сталі аустенітним швом.

Схильність високоміцних гартівних сталей до мартенситного й бейнітного перетворень під дією ТДЦЗ є одним з чинників, що істотно впливають на характер розподілу поля пластичних деформацій. В математичній

моделі розрахунково-експериментального методу цей вплив виражається через параметри: ε_0^* – максимальна величина пластичних деформацій у з'єднанні, A – величина пластичних деформацій на осі шва, z_m – віддаль від осі шва до місця, в якому найбільші пластичні деформації, z_0 – ширина зони пластичних деформацій.

У разі зміни параметра z_0 , який відтворює вплив особливостей виконання зварного шва, його структури, механічних властивостей, параметрів ТДЦЗ [6], відбувається істотна зміна просторового розподілу напружень. Він залежить від умов тепловідведення із ЗТДВ та погонної енергії зварювання. Його збільшення характерне для пом'якшених режимів зварювання та вищої теплопровідності матеріалу оболонки, зумовлює рівномірне спадання величини та градієнта осевих і кільцевих напружень. Характерно, що біля осі шва вплив параметра z_0 незначний.

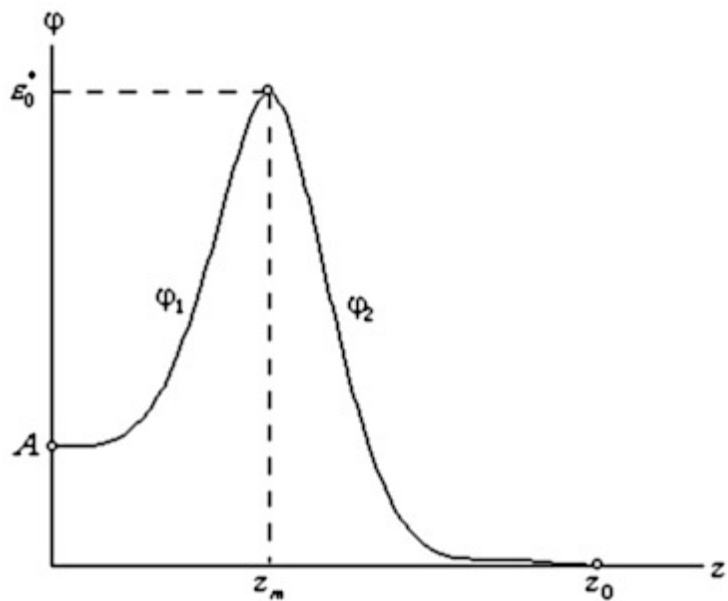


Рис. 1. Загальний вигляд функції, що описує поле пластичних деформацій

Параметр z_m найбільшою мірою залежить від закономірності поширення теплових потоків під час зварювання, потужності режиму та ін. Із зростанням його, на ділянці 5-10 мм від осі шва відбувається певний "стрибок" напружень, більш виражений у кільцевому напрямку, як на осі шва, так і в ділянці максимальних напружень – наявне зростання абсолютної величини напружень.

Характерно, що залишкові напруження істотно змінюються лише в широкому інтервалі значень параметра z_0 . Значно більші зміни напружень спричинює переміщення максимуму пластичних деформацій всього на 2-4 мм. Параметр a_0 складніше піддається зміні, вплив на нього може здійснюватись передусім через склад шва, або – частково – у разі зміни параметрів режиму зварювання, коли насамперед варто звертати увагу на величину z_m . Тому ефективніше керування розподілом залишкових напружень може здійснюватись зміною параметра z_m .

Величину та характер напружень регулюють шляхом застосування швів із різними хімічним складом та структурою – бейніто-мартенситною, ферито-перлітною та аустенітною. Саме застосування швів із аустенітною структурою дає змогу знизити величину параметра A та збільшити z_m .

Розв'язувальне рівняння задачі про визначення залишкових напружень в цьому випадку запишемо у вигляді [6]:

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4a^4 \right) \cdot W = -4a^4 R \varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha) \cdot S^0(\alpha), \quad (5)$$

де W – прогин труби, $a^4 = 3R^2(1 - \mu^2)/4h^2$.

Розв'язок цього рівняння і вирази для визначення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і коло-вих $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень подамо у вигляді:

$$W(\alpha) = \varepsilon_0^* \cdot R \cdot \hat{W}(\alpha), \quad \sigma_{ii}(\alpha, \gamma) = E \cdot c \cdot \hat{\sigma}_{ii}(\alpha, \gamma), \quad i = \alpha, \beta, \quad (6)$$

$$\text{де: } \hat{W}_{\alpha\alpha}(\alpha) = -\frac{a}{2} \cdot \Gamma_1(\alpha), \quad \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = -\frac{a}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} \cdot \Gamma_1(\alpha);$$

$$\hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = \hat{W}(\alpha) + \mu \cdot \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) + \varphi(\alpha) \cdot S^0(\alpha); \quad \Gamma_i(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\xi) \cdot K_i(\xi - \alpha) d\xi,$$

$$K_1(\xi - \alpha) = \exp[-a|\xi - \alpha|] \cdot [\cos a(\xi - \alpha) + \sin a|\xi - \alpha|],$$

$$K_2(\xi - \alpha) = \exp[-a|\xi - \alpha|] \cdot [\cos a(\xi - \alpha) - \sin a|\xi - \alpha|], \quad E - \text{модуль Юнга.}$$

Використавши експериментальну інформацію про напружений стан у зварних з'єднаннях високоміцних низьколегованих сталей [3, 4], розраховано розподіли залишкових напружень у з'єднанні трубних сталей класу Х 60. Досліджено вплив параметру z_0 на вигляді розподілів залишкових напружень (рис. 2).

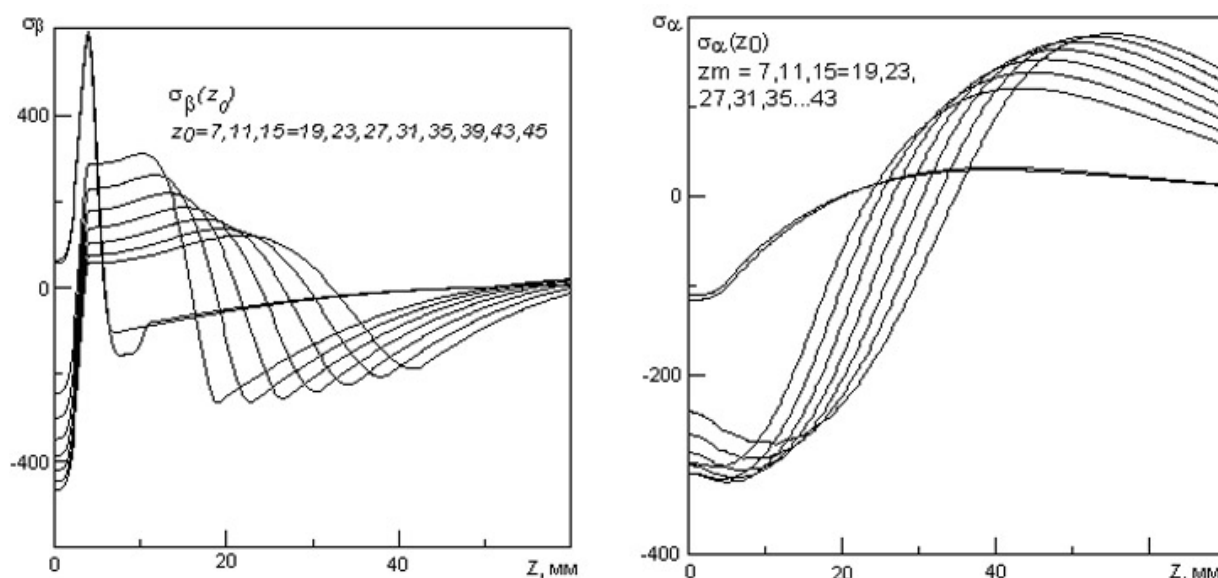


Рис. 2. Залежність розподілів: а) – кільцевих і б) – осьових напружень на зовнішній поверхні труби вздовж її твірної від величини поля пластичних деформацій

Як видно з рис. 3, осьові і кільцеві напруження під час зміни значень півширини поля пластичних деформацій $z_0 = 7 \dots 11$ змінюються незначно, а від 15 до 45 монотонно спадають. Характерно, що у разі збільшення ширини поля деформацій, зменшуються як залишкові напруження в пікових ділянках, так їхній градієнт вздовж осі z .

Таким чином, у роботі проілюстровано можливість використання моделі розрахунково-експериментального методу [1] для розрахунку напружень в з'єднаннях труб, виготовлених зі сталей різних груп міцності; запропоновано функцію $\varphi(\alpha)$ для визначення в межах моделі напружень у з'єднаннях

низьковуглецевих сталей; досліджено закономірності впливу ширини зони пластичних деформацій на розподіл залишкових напружень у кільцевих з'єднаннях високоміцних гартованих сталей.

Застосовуючи шви, які забезпечують отримання пластичної структури, можна регулювати величину та характер залишкових зварювальних напружень в широкому діапазоні. Це дає змогу зменшити рівень напруженого стану зварного з'єднання труб та градієнт його зміни, що позитивно впливає на стійкість до утворення технологічних тріщин під дією ТДЦЗ. Тобто виникає можливість отримувати рівномічні зварні з'єднання без застосування додаткових заходів типу термічного оброблення.

Висновки. Завдяки виконаним дослідженням встановлено закономірності впливу зовнішніх параметрів на залишкові напруження в кільцевому зварному з'єднанні елементів із високоміцних трубних сталей класу Х60 – Х70. Напруження на внутрішній поверхні оболонки в осьовому напрямку є розтягувальними. Кільцеві напруження в середньому в 1,2-1,4 раза вищі за аналогічні на зовнішній поверхні і за різних значень параметрів, що характеризують функцію поля пластичних деформацій та геометричні розміри оболонки, в межах поля умовних пластичних деформацій набувають як додатних, так і від'ємних значень. Доведено можливість застосування пластичних зварних швів для отримання рівномічних зварних з'єднань на основі регулювання залишкових зварювальних напружень.

Література

1. **Осадчук В.А.** Напруження у стикових зварних з'єднаннях кільцевим швом труб, які схильні до гартування / В.А. Осадчук, А.Р. Дзюбик, Р.В. Палаш // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2002. – № 456. – С. 107-111.
2. **Палаш Р.В.** Підвищення технологічної та експлуатаційної міцності зварних деталей машин з високоміцних сталей // Машинознавство. – Львів. – 2005. – № 8. – С. 235-239.
3. **Макаров Э.Л.** Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1981. – 247 с.
4. **Назарчук А.Т.** Оценка технологической прочности соединений толстолистовых закаливающихся сталей с многослойными швами / А.Т. Назарчук, В.В. Снисарь, Ю.А. Забураный // Автоматическая сварка. – 2003. – № 9. – С. 3-11.
5. **Палаш Р.В.** Визначення раціональних факторів впливу на залишкові напруження в зварних з'єднаннях конструкцій із високоміцних сталей // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : УкрДЛТУ. – 2006. – № 16.6. – С. 87-89.

УДК 621.438

Асист. О.Ю. Жулай – Кіровоградський національний технічний університет

РАЦІОНАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОРГАНІЗАЦІЇ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ДИЗЕЛІВ

Обґрунтовано новий підхід до організації робіт під час застосування різних стратегій технічного обслуговування та ремонту дизелів засобів транспорту сільськогосподарського виробництва. Наведено результати його застосування при планово-попереджувальній та адаптивній стратегіях технічного обслуговування та ремонту. Отримані дані дають змогу зробити висновок про певну кориговану структуру