

**ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НА
ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ ЗВАРНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ**

Досліджено вплив параметрів, що описують поле пластичних деформацій на розподіл залишкових напружень на внутрішній поверхні кільцевих з'єднань пластичним швом оболонок із високоміцних сталей, схильних до мартенситного перетворення під дією термічного циклу зварювання.

Doctorate R.V. Palash – NU "Lvivska politechnica"

**Forming of the remaining tense state on the internal surface of the welded
cylinder elements of constructions too from strong steel**

Influencing parameters, that describe.; a field of plastic deformations on distributing remaining tensions on the inlying surface of the circular halving by the plastic stitch of high-durability steel, inclined to the martensyt transformation under action of thermal cycle of welding is explored.

У теперішній час у машинобудуванні та інших галузях промисловості і будівництва все більше зварних конструкцій та деталей машин з кільцевими з'єднаннями виготовляють із високоміцних сталей з межею міцності $\sigma_B > 850$ МПа і межею плинності $\sigma_{0,2} > 550$ МПа. Це: елементи реакторів та обладнання, ємності та трубопроводи, вали турбін, важконавантажені елементи механізмів і машин, тощо. Однак використання високоміцних сталей пов'язане з проблемою утворення технологічних і експлуатаційних тріщин. Їх виникнення зумовлене значними за величиною та нерівномірно розподіленими напруженнями першого та другого родів в зварному з'єднанні. Зважаючи на визначальний вплив залишкових напружень на технологічну й експлуатаційну міцність з'єднань, важливим є вибір таких параметрів режиму зварювання, що забезпечать якнайбільш сприятливий залишковий напружений стан. У зв'язку з цим, необхідний надійний та інформативний спосіб визначення напружень у довільній точці з'єднання.

Підвищення тріщиностійкості й експлуатаційної надійності таких з'єднань без попереднього підігріву та завершального термічного оброблення забезпечують різними технологічними заходами, серед яких раціональним є використання аустенітних швів [1-3 та ін.]. Хоча для такого випадку одержані експериментальні дані про розподіли залишкових напружень, проте методи комплексного визначення повного поля напружень розглянуті недостатньо повно.

Мета роботи – дослідити закономірності розподілу залишкових напружень на внутрішній поверхні кільцевих з'єднань аустенітним швом деталей машин і конструкцій із високоміцних сталей та вплив на них параметрів, що описують поля власних залишкових деформацій.

Дослідження проводились для класу кільцевих з'єднань деталей машин і конструкцій з високоміцних сталей, схильних до мартенситного пере-

¹ Наук. керівник: проф. І.В. Кузьо, д-р техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

творення під дією термодеомаційного циклу зварювання (ТДЦЗ). Вивчено вплив параметрів, що визначають характер поля пластичних демацій у з'єднанні, на величину залишкових напружень.

Для визначення залишкового напруженого стану використано математичну модель, що ґрунтується на розв'язанні обернених задач механіки деформівних тіл з власними напруженнями [4, 5]. За допомогою даної моделі можна розраховувати просторові залишкові напруження в осьовому і кільцевому напрямках оболонкових елементів конструкцій.

Поле власних колових демацій в кільцевому зварному з'єднанні виражається як:

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

де: $\varphi^*(\alpha) = \varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha)$, $S^0(\alpha) = 1$, $|\alpha| \leq \alpha_0$; $S^0(\alpha) = 0$,

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

$$\varphi_1(z) = a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^4 + a_2 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^6,$$

$$\varphi_2 = b_0 + b_1 \left(\frac{z}{z_0} - 2 \cdot \frac{z_m}{z_0}\right)^3 + b_2 \cdot \left(\frac{z}{z_0} - 2 \cdot \frac{z_m}{z_0}\right)^4 + b_3 \cdot \left(\frac{z}{z_0} - 2 \cdot \frac{z_m}{z_0}\right)^6. \quad (3)$$

Невідомі коефіцієнти a_n , b_n знаходять з умов гладкості функцій і краєвих умов; z_0 – півширина зони пластичних демацій, a_0 – значення пластичних демаційна осі шва, z_m – віддаль від осі шва до місця, в якому є найбільші пластичні демації, $\varepsilon_0^* = \alpha_m$ – максимальні значення пластичних демацій, $\alpha = z / R$, z – віддаль від осі шва, мм [6,7].

Залишкові осьові $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцеві $\sigma_{\beta\beta}$ напруження визначаються таким чином:

$$\sigma_{ii}(\alpha, \gamma) = E \cdot \varepsilon_0^* \cdot \bar{\sigma}_{ii}(\alpha, \gamma), \quad i = \alpha, \beta; \quad (4)$$

$$W(\alpha) = \varepsilon_0^* \cdot R \cdot \hat{W}(\alpha) - \text{функція прогину}, \quad \hat{W}_{\alpha\alpha}(\alpha) = -\frac{a}{2} \cdot \Gamma_1(\alpha);$$

$$\bar{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = \hat{W}(\alpha) + \mu \cdot \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) + \varphi(\alpha) \cdot S^0(\alpha) \quad \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = -\frac{a}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} \cdot \Gamma_1(\alpha),$$

$$\Gamma_i(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\xi) \cdot K_i(\xi - \alpha) d\xi; \quad K_{1,2}(\xi - \alpha) - \text{спрощувальні коефіцієнти.}$$

Аналіз наведених формул показує, що функція $\varphi(\alpha)$, яка описує поле повних пластичних демацій, має змінний характер. Від осі шва вона зростає до деякого значення (α_m) на ділянці, що включає область структурних перетворень, котрі відбуваються під впливом ТДЦЗ. Після досягнення свого максимуму α_m на віддалі z_m , функція плавно спадає до нуля (на віддалі, рівній ширині поля пластичних демацій z_0). Параметри, які визначають кривину

функції (на ділянці зростання від осі шва до максимальних значень, це – α_1 і α_2 , а на проміжку спадання – параметри b_1, b_2, b_3), виражаються через величини α_m, a_0, z_0, z_m . Вони дають змогу з достатньою точністю описати функцію $\varphi(\alpha)$ не лише для випадку сталей, схильних до мартенситного та бейнітного перетворень, але й для інших класів сталей.

Нижче проаналізовано вплив цих факторів на залишкові напруження у з'єднанні. Розподіли залишкових напружень розглядалися при різних значеннях параметрів, що описують геометрію та поле пластичних деформацій. Як видно з рис. 1, осьові напруження на осі шва є розтягувальними та плавно знижуються в міру віддалення від неї. На межі поля пластичних деформацій вони переходять у стискальні, але не досягають значних величин.

Кільцеві напруження на осі шва і в ділянці максимальних значень є також розтягувальними. Крім того, вони в середньому на 30...40 МПа вищі за аналогічні на зовнішній поверхні, які досліджувались раніше [6].

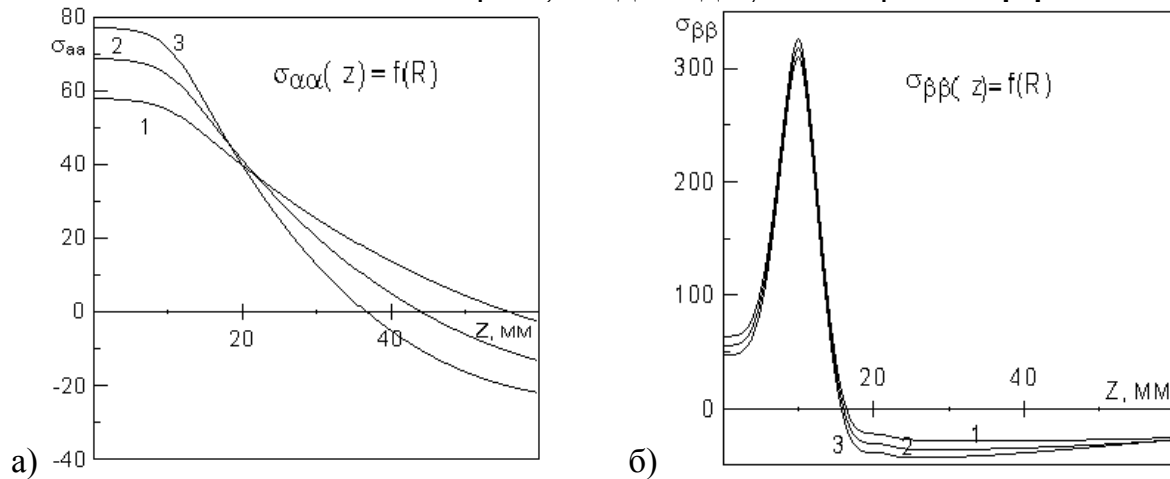


Рис. 1. Розподіл осьових (а) і кільцевих (б) залишкових напружень на внутрішній поверхні оболонки в напрямку від осі шва залежно від її радіусу (1 – 1000 мм, 2 – 600 мм, 3 – 400 мм)

При зростанні радіусу оболонки від 400 до 1000 мм напруження змінюються незначно: осьові зменшуються від 80 до 60 МПа на осі шва, а кільцеві – зростають від 50 до 65 МПа на осі шва й від 305 до 330 МПа в ділянці максимуму.

Вплив параметру a_0 , який залежить від особливостей виконання зварного шва, його структури, механічних властивостей та параметрів ТДЦЗ [7], є досить істотним (рис. 2).

Як видно з рис. 2, осьові напруження, розтягувальні в колошовній ділянці, із збільшенням віддалі від осі шва зменшуються, потім переходять через нуль в область стискання, де їх градієнт значно зменшується, і вони плавно затухають. На осі шва вплив значення a_0 на величину напружень істотніший для кільцевих аніж для осьових, (в діапазоні значень a_0 0,05...0,95 – їх зміна становить 275 МПа для перших порівняно із 120 МПа для других). Значення напружень в кільцевому напрямку істотніші в ділянці максимуму (240...290 МПа), ніж на осі шва (–50...230 МПа), де кільцеві напруження неістотно відрізняються від осьових (60...180 МПа).

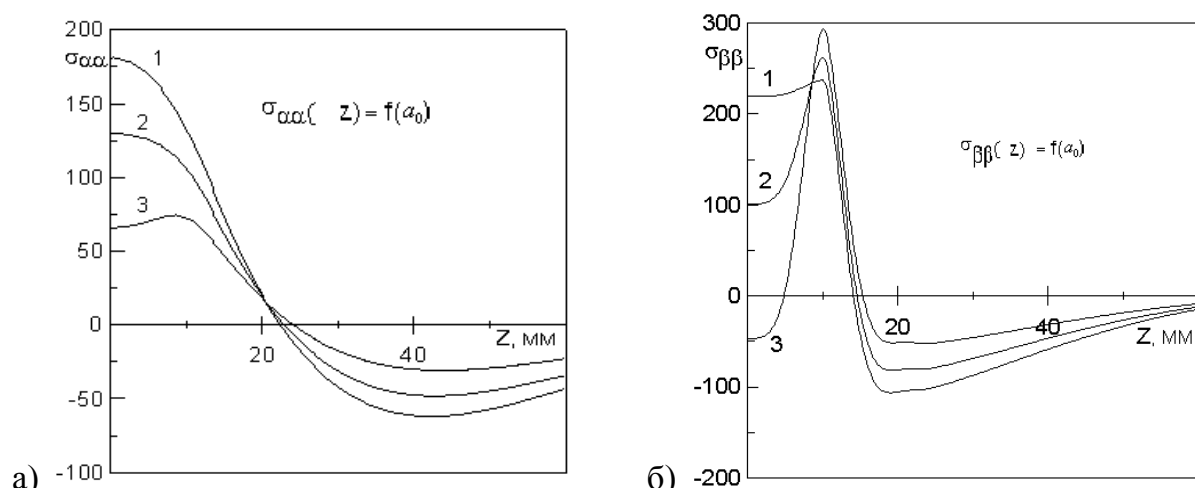


Рис. 2. Розподіл осевих (а) і кільцевих (б) залишкових напружень залежно від параметру a_0 (1 – 0,95; 2 – 0,75; 3 – 0,35; 4 – 0,05)

Необхідно зазначити, що крива "1" відповідає з'єднанням із швами, близькими за механічними властивостями до основного металу, в той час як крива "3" – з'єднанням із швами, пластичнішими за основний метал. Вплив на залишкові напруження параметра z_0 , який залежить від умов тепловідведення та погонної енергії зварювання, графічно зображено на рис. 3.

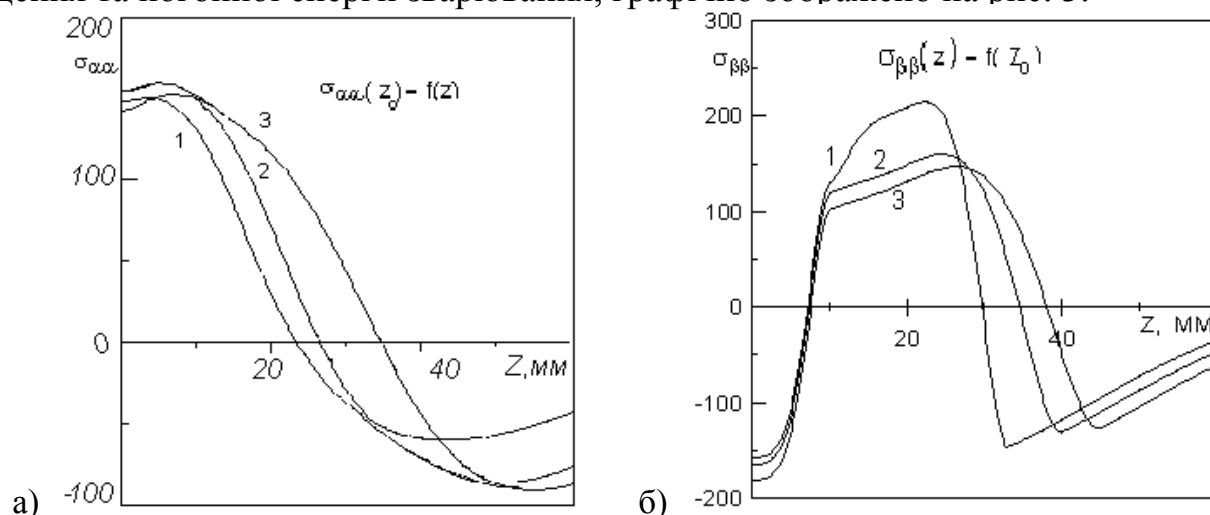


Рис. 3. Розподіл осевих (а) і кільцевих (б) залишкових напружень на внутрішній поверхні оболонки залежно від ширини поля пластичних деформацій (1 – 33 мм; 2 – 40 мм; 3 – 45 мм)

Осьові розтягувальні напруження знижуються зі збільшенням віддалі до осі шва. Згодом, на ділянці 25...35 мм, вони переходять через нуль і згасають у зоні стискання. При зростанні ширини поля пластичних деформацій залежність осевих напружень, аналогічно кільцевим на ділянці спадання, проявляється у зменшенні градієнтів напружень та зміщенні кривих від осі шва. Характерно, що біля осі шва вплив параметра z_0 практично не проявляється як для осевих, так і для кільцевих напружень.

Стискальні на осі шва, кільцеві напруження в діапазоні з $z_0 = 33...45$ мм змінюються незначно (155...185 МПа) і на стадії зростання практично від нього не залежать. Перейшовши через нуль, вони досягають свого максимуму, де залежність від z_0 виражена істотніше (150...220 МПа). Після цього відбувається спадання, криві напружень переходять через нуль і, досягнувши мінімуму, поступово затухають.

На рис. 4 наведено залежність залишкових напружень по твірній оболонки від параметру z_M .

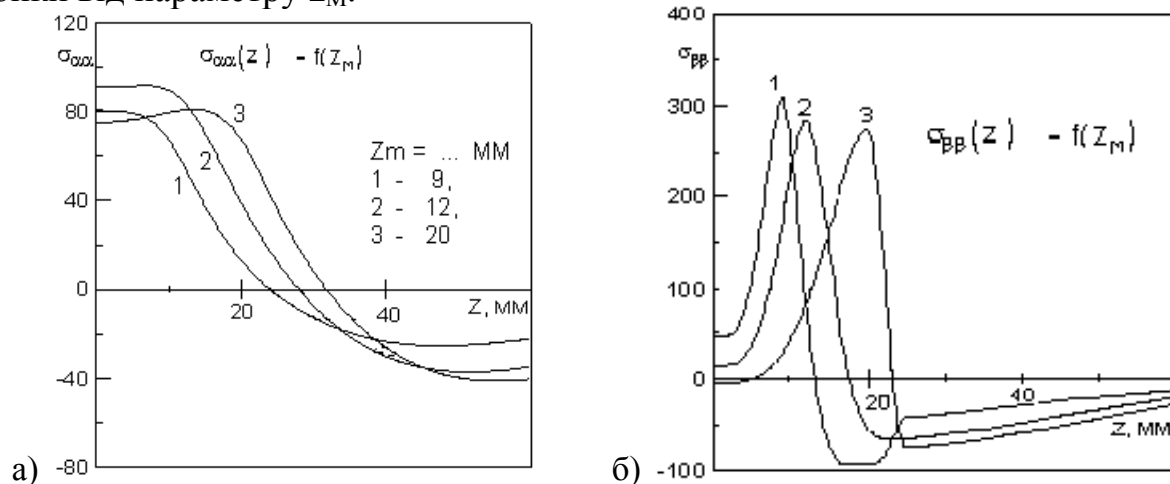


Рис. 4. Розподіли кільцевих і осевих напружень залежно від розміщення максимуму пластичних деформацій (z_M : 1 – 9 мм; 2 – 12 мм; 3 – 20 мм)

Криві розподілів осевих і кільцевих напружень зі збільшенням параметру z_M зміщуються від осі шва. У колошовній ділянці вплив z_M на осеві напруження менш істотний (75...90 МПа при зміні z_M від 9 до 20 мм). Кільцеві напруження більш чутливі до зміни z_M коло осі шва (-5...50 МПа), ніж в ділянці максимуму (275...305 МПа).

Із виконаного аналізу видно, що залишкові напруження на внутрішній поверхні оболонки в осьовому напрямку розтягувальні. Кільцеві напруження в середньому в 1,2...1,4 раза вищі за аналогічні на зовнішній поверхні і при різних значеннях параметрів, що характеризують функцію $\phi(\alpha)$ та геометрію оболонки, в межах поля пластичних деформацій, набувають як додатних, так і від'ємних значень. При цьому, ті самі параметри по-різному впливають на значення напружень в осьовому й кільцевому напрямках на осі шва і в ЗТДВ.

Висновки

Розподіли залишкових напружень можна регулювати зміною наступних факторів: віддаллю від осі шва до максимуму пластичних деформацій z_M , півшириною зони пластичної деформації z_0 , величиною пластичних деформацій на осі шва α_0 , серединним радіусом оболонки R . Найбільш ефективно впливати на залишковий напружений стан можна зміненням параметру z_M , шляхом регулювання термодеторматійного циклу зварювання.

При проектуванні технологічних процесів виготовлення кільцевих з'єднань конкретних деталей машин та конструкцій необхідно враховувати, окрім умов роботи, зокрема величини та характеру експлуатаційних навантажень, особливості розподілу залишкових напружень на внутрішній поверхні.

Література

1. Готальский Ю.Н., Новикова Д.П. О механизме предотвращения околошовных трещин при сварке закаливающихся сталей с использованием аустенитных материалов// Автоматическая сварка. – 1992, № 2. – С. 21-25.
2. Назарчук А.Т., Снисарь В.В., Забуранный Ю.А. Оценка технологической прочности соединений толстолистовых закаливающихся сталей с многослойными швами// Автоматическая сварка. – 2003, № 9. С. 3-11.

3. Лобанов Л.М., Миходуй Л.И., Васильев В.Г., Позняков В.Д., Миходуй О.Л., Гончар А.К. Особенности протекания термдеформационных процессов при дуговой сварке высокопрочных сталей// Автоматическая сварка. – 1999, № 3. – С. 13-17.

4. Осадчук В.А., Палаш Р.В. Визначення залишкових напружень у тонких пластинах з прямолінійними швами/ Вісник ДУ "Львівська політехніка": Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів: ДУ "Львівська політехніка". – 2000, № 396. – С. 91-95.

5. Палаш Р.В. Вплив величини зони пластичних деформацій на залишкові напруження в кільцевих з'єднаннях обсадних труб// Вісник НУ "Львівська політехніка": Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів: НУ "Львівська політехніка". – 2004, № 509. – С. 99-104.

6. Исследование остаточных напряжений в кольцевых соединениях из высокопрочных сталей. Кузьо И., Палаш Р./ IV Міжнар. конгрес "Машиностроительные технологии": 36 доповідей. – Варна, 2004, т.1. – С. 83-85.

7. Палаш Р.В. Вплив величини зони пластичних деформацій на залишкові напруження в кільцевих з'єднаннях обсадних труб// Вісник НУ "Львівська політехніка": Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів: НУ "Львівська політехніка". – 2004, № 509. – С. 99-104.

УДК 630.31 Проф. М.П. Мартинців, д-р техн. наук; доц. О.М. Удовичий,
канд. техн. наук; аспір. В.В. Барияк – УкрДЛТУ

РОБОТА ТЯГОВО-ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ КАНАТІВ ПРИ БАГАТОШАРОВОМУ НАВИВАННІ ЇХ НА БАРАБАНИ ПРИВОДІВ ПІДВІСНИХ ЛІСОТРАНСПОРТНИХ УСТАНОВОК

Запропоновано залежності для визначення радіального тиску між витками канатів при багатошаровому навиванні його на барабан лебідки. Встановлено умови, за яких відсутній тиск між витками, що дає змогу вибрати відповідні оптимальні параметри барабанів та режими роботи лебідки.

Prof. M.P. Martynciv; doc. O.M. Udovickij; doctorate V.V. Baryliak – USUFWT

The work of pulling-lifting cables at multilevel winding of them on the drums of the suspended timbertransporting plants

There are offered the dependences for determination of radial pressure between the coils of cables at multilevel of hit on the drum of winch. Terms are set at which pressure between coils is absent, that gives the possibility to choose the proper optimum parameters of drums and modes of winch operations.

Тягові та вантажопідіймальні канати значною мірою визначають безпеку роботи установки, особливо при підйманні та опусканні вантажу, коли робітники знаходяться в безпосередній близькості з установкою, а їх довговічність в 3-4 рази тяжча за довговічність несучих канатів [1, 2]. Тому підвищення довговічності таких канатів є значним резервом збільшення ефективності використання установки в цілому.

Основною причиною руйнування тягових та вантажопідіймальних канатів є максимальні згинання $\sigma_{зг\max}$ та знакозмінні $\sigma_{зг}$ – напруження, що виникають у канатах при навиванні їх на барабани лебідки [1, 2].

Приводи канатних лісотранспортних установок відрізняються від приводів інших вантажопідіймальних машин тим, що тяговий і вантажопідіймальний канати мають значну довжину, до 1200 м, та швидкості навивання,