

УДК 539.3

І. Кузьо, докт. техн. наук; Р. Палаш

Національний Університет "Львівська політехніка"

РОЗПОДІЛ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В СТИКОВОМУ ЗВАРНОМУ З'ЄДНАННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

Розглянуто можливість використання розрахунково-експериментального методу для моделювання напружень у кільцевих з'єднаннях високоміцних сталей, схильних до мартенситного перетворення під дією термічного циклу зварювання аустенітним швом. Вивчено вплив параметрів, що описують поле пластичних деформацій на розподіл залишкових напружень у з'єднанні.

Умовні позначення

z_0 - півширина зони пластичних деформацій;

z_m - віддаль від осі шва до місця, в якому є найбільші пластичні деформації;

E - модуль Юнга;

$K_1(\xi - \alpha)$, $K_2(\xi - \alpha)$ - коефіцієнти, введені для спрощення обчислень.

У сучасному машинобудуванні широко застосовуються високоміцні сталі з межею міцності >850 МПа і межею плинності >550 МПа. Приклади їх застосування для виготовлення деталей машин і елементів конструкцій циліндричної форми легко знайти в хімічній (елементи реакторів та обладнання), енергетичній (ємності та трубопроводи, вали електростанцій), машинобудівельній (важко навантажені елементи механізмів і машин), гірничій, нафтогазовидобувній та геологорозвідувальній (обсадні труби) галузях. Їх використання при виготовленні зварних конструкцій пов'язане з проблемою підвищеного ризику утворення технологічних (холодних та гарячих) і експлуатаційних тріщин. Виникнення як перших, так і других, зумовлене утворенням нерівномірно розподілених і значних за величиною напружень першого роду та несприятливої структури у шві та зоні термодформаційного впливу (ЗТДВ) із наявними в ній значними напруженнями другого роду під дією термодформаційного циклу зварювання (ТДЦЗ). Зважаючи на визначальний вплив залишкових напружень на технологічну й експлуатаційну міцність з'єднання, важливим є вибір таких параметрів режиму зварювання, при яких залишковий напружений стан – найсприятливіший. Для успішного моделювання напруженого стану у з'єднанні при різних умовах зварювання необхідний надійний спосіб визначення напружень у довільній точці ЗТДВ.

З метою підвищення тріщиностійкості й експлуатаційної надійності з'єднань високоміцних сталей без попереднього підігрівання та завершальної термообробки використовуються різноманітні технологічні заходи, серед яких слід відзначити використання аустенітних і аустенітно-мартенситних швів [1, 2, 3 та ін.]. Хоча для таких випадків існують експериментально одержані дані про розподіли залишкових напружень, проте можливість їх комплексного визначення та моделювання з використанням розрахунково-експериментальних методів розглянута недостатньо.

Метою роботи було дослідження закономірностей розподілу залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях циліндричних деталей машин із високоміцних сталей аустенітним швом залежно від параметрів, що описують поля власних залишкових деформацій, котрі зумовлюють формування напруженого стану.

Дослідження проводились для класу кільцевих з'єднань деталей машин і конструкцій з високоміцних сталей, схильних до мартенситного перетворення під дією ТДЦЗ.

Для визначення розподілів залишкових напружень використано математичну модель, створену на основі часткового розв'язку розрахунково-експериментального методу, що ґрунтується на розв'язанні обернених задач механіки деформівних тіл з власними напруженнями [4].

Експериментальні дані про напружений стан у такому з'єднанні, використані в розрахунковій моделі, взяті з опублікованих результатів дослідження [5].

В роботі вивчався вплив на розподіл залишкових напружень параметрів, що характеризують розподіл поля пластичних деформацій у з'єднанні. Для цього використано розрахункову модель методу умовних пластичних деформацій для випадку кільцевого з'єднання пластичним швом високоміцної сталі [6].

З допомогою розрахункової моделі, що використовується в даній роботі, можна розраховувати залишкові напруження в осьовому й кільцевому напрямках на площині, що розташована будь-де по товщині металу – від зовнішньої до внутрішньої поверхні оболонки. В даній роботі розглядали розподіли напружень на зовнішній поверхні оболонки.

Математичний апарат розрахункової моделі базується на наступних рівняннях.

Поле власних колових деформацій біля кільцевого зварного шва апроксимується як:

$$\varepsilon_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) = -\varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha) \cdot S^0(\alpha), \quad \varphi(\alpha) = \begin{cases} \varphi_1(\alpha), & 0 \leq |\alpha| \leq \alpha_m, \\ \varphi_2(\alpha), & \alpha_m \leq |\alpha| \leq \alpha_0, \end{cases} \quad (1)$$

де $\varphi^*(\alpha) = \varepsilon_0^* \cdot \varphi(\alpha)$, $S^0(\alpha) = 1, |\alpha| \leq \alpha_0$, $S^0(\alpha) = 0, |\alpha| > \alpha_0$, $\alpha_0 = \frac{z_0}{R}$.

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

$$\sigma_{ii}(\alpha, \gamma) = E \cdot c \cdot \bar{\sigma}_{ii}(\alpha, \gamma), \quad i = \alpha, \beta, \quad W(\alpha) = \varepsilon_0^* \cdot R \cdot \bar{W}(\alpha) \quad (2)$$

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

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

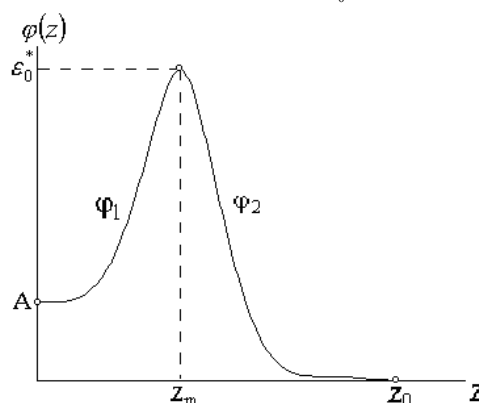


Рис. 1. Загальний вигляд функції, $\varphi(z)$ для випадку кільцевого з'єднання високоміцної гартівної сталі аустенітним швом

Суттєвий вплив на формування поля пластичних деформацій мають: параметри ТДЦЗ, умови відведення тепла із зони зварювання та ЗТДВ, особливості структурних перетворень у шві та ЗТДВ, геометричні параметри з'єднання. В математичній моделі

розрахунково-експериментального методу вплив цих та інших факторів виражається через параметри, які описують розподіл функції поля пластичних деформацій: ε_0^* - значення пластичних деформацій у точці максимуму, A – величина пластичних деформацій на осі шва, z_m – віддаль від осі шва до максимуму функції поля пластичних деформацій та z_0 – півширина зони пластичних деформацій.

Розглянемо вплив цих факторів на розподіл залишкових напружень у з'єднанні. Вплив серединного радіусу оболонки добре прослідковується з рис. 2.

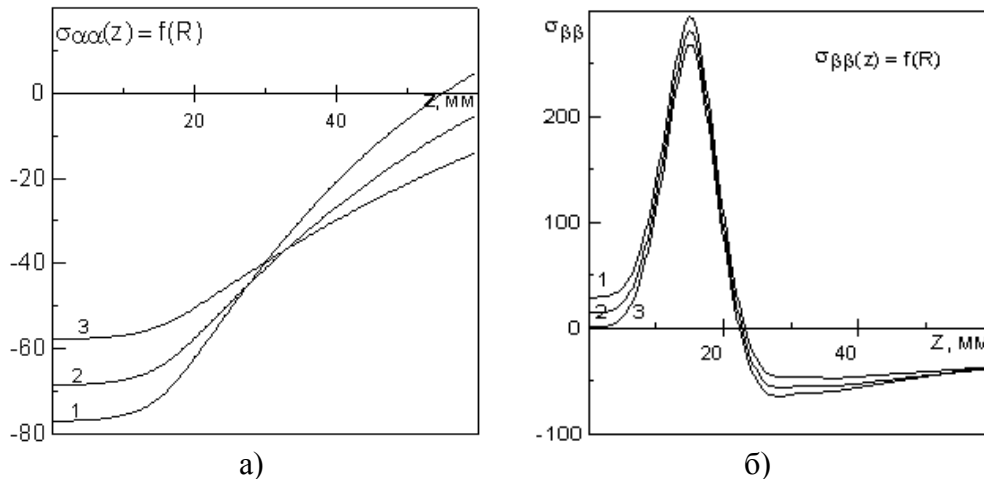


Рис. 2. Розподіл осевих а) і кільцевих б) залишкових напружень на зовнішній поверхні оболонки залежно від її радіусу (1 – 1000 мм, 2 – 600 мм, 3 – 400 мм)

Як видно, максимальні значення напружень в осьовому напрямку, на 75% менші за такі у кільцевому напрямку. Абсолютні значення та градієнт осевих та кільцевих напружень на ділянці до 10 мм, що відповідає віддалі до максимуму пластичних деформацій (ділянка шва і зони сплавлення), знижуються із зменшенням радіусу оболонки.

Вплив радіуса на зміну залишкових напружень в кільцевому напрямку виражений суттєвіше – при зміні радіуса оболонки в інтервалі 400...1000 мм, осеві напруження в ділянці шва змінюються на ≈ 20 МПа, а кільцеві на ≈ 50 МПа.

До параметрів, що прямо не залежать від геометрії зварюваної оболонки, належать A , z_m та z_0 . При зміні параметру A , який характеризує максимальні значення повних пластичних деформацій на осі шва і залежить від особливостей виконання зварного шва, його структури, механічних властивостей, параметрів ТДЦЗ – відбувається суттєва зміна типу розподілу напружень (рис. 3).

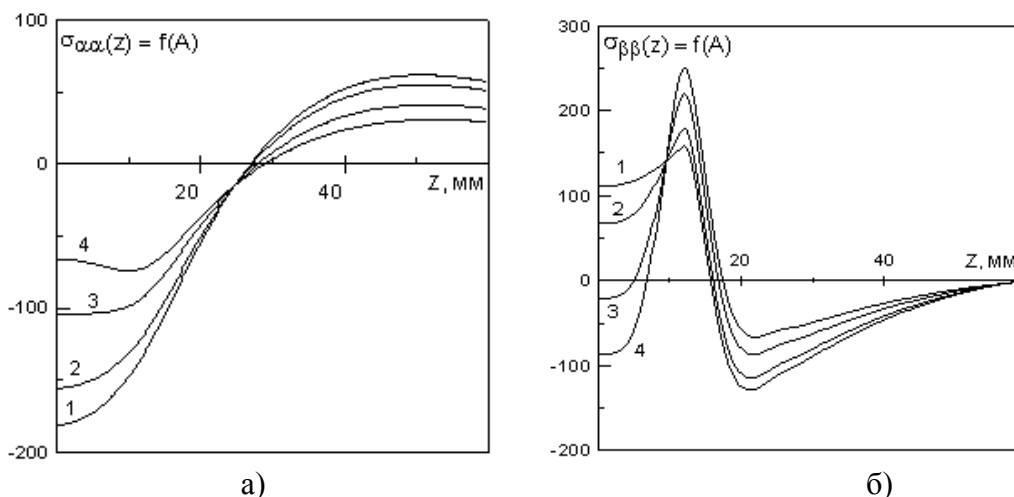


Рис. 3. Розподіл осевих а) і кільцевих б) залишкових напружень на зовнішній поверхні оболонки залежно від параметру A (1 – 0,95; 2 – 0,75; 3 – 0,35; 4 – 0,05)

Характерно, що залежність осьових напружень порівняно з кільцевими від параметру A виражена менш помітно – при однаковій зміні A , інтервал даних для осьових напружень в початковій ділянці розподілу приблизно на 50 МПа менший. Криві 1, 2, швидше за все, відповідають з'єднанням із швами, близькими за механічними властивостями до основного металу, в той час як криві 3, 4 – характерні для з'єднань із швами, пластичнішими за основний метал [6].

Параметр z_0 характеризує ширину поля пластичних деформацій і залежить від умов тепловідведення із ЗТДВ і погонної енергії зварювання. Зростання цього параметра, характерне для більш “м'яких” режимів зварювання та вищої теплопровідності матеріалу, викликає рівномірне спадання величини та градієнта осьових та кільцевих напружень (рис. 4).

Як видно із рис.4, розподіли і осьових, і кільцевих напружень при збільшенні ширини поля пластичних деформацій характеризуються зниженням як градієнтів, так і напружень в цілому на ділянці півшириною до 30 мм. При цьому для кільцевих напружень характерна більш суттєва зміна напружень на осі шва (≈ 100 МПа) при зміні z_0 на 28 мм, ніж для осьових (≈ 50 МПа). Характерно, що в ділянці максимальних значень кільцеві напруження більш чутливі до зміни ширини поля пластичних деформацій (≈ 130 МПа).

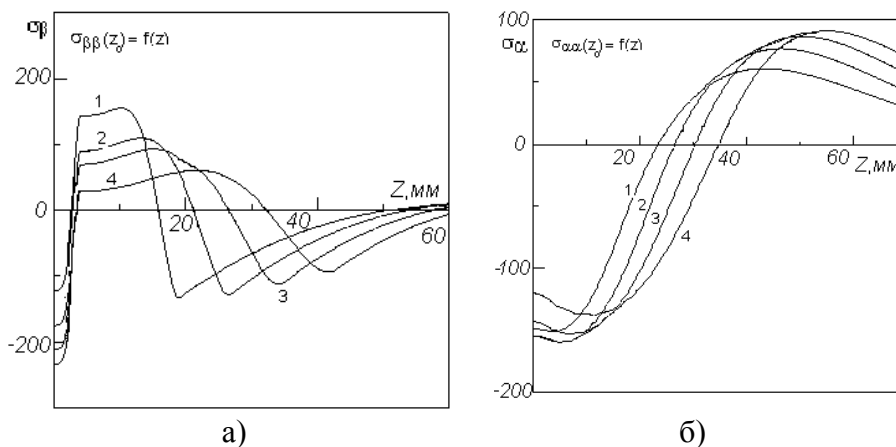


Рис. 4. Залежність розподілів а) – кільцевих і б) – осьових напружень на зовнішній поверхні оболонки вздовж її твірної від величини поля пластичних деформацій (z_0 : 1 - 15 мм; 2 – 23 мм; 3 – 35 мм; 4 – 43 мм)

На рисунку 5 зображено залежність поля пластичних деформацій від віддалі Z_M від осі шва до максимуму пластичних деформацій – параметра, що – очевидно – найбільш залежить від закономірності поширення теплових потоків при зварюванні, потужності режиму та ін.

Як бачимо, із зростанням Z_M на ділянці 6...9 мм відбувається певний “стрибок” напружень – у кільцевому напрямку як на осі шва, так і в ділянці максимальних напружень, має місце зростання абсолютної величини напружень на 100...110 МПа. В осьовому напрямку таке явище спостерігається лише на осі шва й виражене дещо слабше (80...90 МПа).

Проаналізувавши всі параметри, що характеризують розподіл поля пластичних деформацій, робимо висновок, що реально впливати на нього можна лише змінюючи параметри Z_M і Z_0 шляхом підбору параметрів ТДЦЗ (погонної енергії зварювання).

Але слід прийняти до уваги, що залишкові напруження суттєво змінюються лише в широкому інтервалі (до 30 мм) значень параметра Z_0 . Значно більші зміни напружень викликає переміщення максимуму пластичних деформацій всього на 2-4 мм. Тому ефективніше керування розподілом залишкових напружень може здійснюватись, орієнтуючись на зміну параметра Z_M .

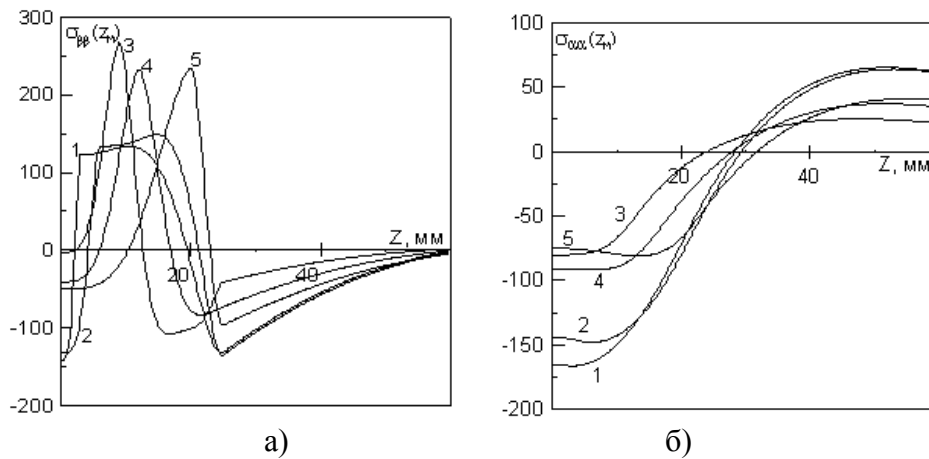


Рис. 5. Залежність розподілу кільцевих і осьових напружень від розміщення максимуму пластичних деформацій (Z_M : 1 – 3 мм; 2 – 6мм; 3 – 9мм; 4 – 12мм; 5 – 20 мм)

При проектуванні технологічних процесів виготовлення нероз'ємних з'єднань конкретних деталей машин та конструкцій, окрім розподілу залишкових напружень, слід враховувати також умови роботи, зокрема величину та характер експлуатаційних навантажень.

Висновки:

1. В роботі проаналізовано закономірності розподілу залишкових напружень у зварному кільцевому з'єднанні аустенітним швом високоміцної сталі, схильної до мартенситного перетворення.
2. Показано вплив на розподіли напружень параметрів, що характеризують поле пластичних деформацій.
3. Встановлено, що найбільш ефективно впливати на розподіл напружень можна через зміну розташування максимуму пластичних деформацій.

Possibility of use of computation-experimental method is considered for determination of tensions in the circular halving of high-durability steels, inclined to the martensite transformation under action of thermal cycle of welding by the high-manganese austenite seam. Conformities to the law of distributing remaining tensions are explored depending on parameters, that describe detail geometry and field type of plastic deformation.

Література

1. Готальский Ю.Н., Новикова Д.П. О механизме предотвращения околошовных трещин при сварке закаляющихся 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 закаляющихся 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 термометформационных 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 “ЛП” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. Львів. 2000 - № 396. - С. 91-95.
5. Лобанов Л.М., Миходуй Л.И., Миходуй О.Л. Залишкові напруження в зварних з'єднаннях високоміцних сталей // Праці міжнародної конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Том 1. – Випуск 2. – Львів: Каменяр. – 1999. – С. 21– 31.
6. 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”. – 2004. - № 509. - С. 99-104.

Одержано 27.05.2005 р.