

УДК 539.3

А.Р. Дзюбик

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра “Зварювальне виробництво, діагностика та відновлення металоконструкцій”**МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ
В ЗВАРНИХ З’ЄДНАННЯХ**

© Дзюбик А.Р., 2002

На основі узагальнення відомих експериментальних даних і отриманих числовими методами результатів розподілу зварювальних напружень запропоновано множину тензорних функцій для описання поля залишкових пластичних деформацій.

In article the kind of functions for the description of plastic welding deformations for different classes of steel is analysed. Suggested function for field description of residual plastic deformations in steels liable to temper.

Широке застосування зварних з’єднань в сучасному машинобудуванні зумовлює необхідність в постійному удосконаленні методів діагностики їх працездатності. Відомо [1], що із зварними швами пов’язано 70–80 % усіх відмов конструкцій. Тому однією з найважливіших проблем є оцінка напруженого стану зварних з’єднань, оскільки останній може істотно впливати на їх технологічну та експлуатаційну міцність.

Для визначення залишкових зварювальних напружень використовуються розрахункові, експериментальні та експериментально-розрахункові методи. Перші є більш застосовними на стадії проектування та розробки металоконструкції, коли непередбачувані монтажні та експлуатаційні навантаження не змінили загального напруженого стану. Експериментальні методи дають повнішу інформацію про конструкцію, однак руйнівні мають високу вартість та передбачають часткове чи повне руйнування зварного з’єднання, а неруйнівні є недостатньо інформативні про розподіл напружень по об’єму елемента конструкції, потребують наявності зразків-свідків. Тому стосовно реальних зварних з’єднань, з урахуванням різних форм і розмірів, конструктивних і технологічних особливостей, широко використовують розрахункові методи, які ґрунтуються на попередніх експериментально встановлених закономірностях [2]. Розповсюдженим прийомом при визначенні залишкових напружень є введення в розрахунок як відомі значення компонентів залишкових деформацій. Завдання зводиться до відшукування напружень, що відповідають заданим залишковим деформаціям.

Однією з перших робіт, де використовуються методи розрахунку зварювальних напружень і деформацій на основі функцій усадження, є робота Є. О. Патона та його учнів [3]. У ній проведено комплексне дослідження зварювальних напружень у циліндричних оболонках від кільцевих і поздовжніх швів. Запропонована тут ідея розрахункової оцінки методами теорії пружності залишкових напружень за заданою величиною усадних поздовжніх деформацій, що визначаються із простих дослідів, знайшла застосування в багатьох подальших працях. Звичайно, що дослідники по-різному підходять до описання усадних явищ, викликаних зварюванням, відповідно є і різні назви запропонованих ними методик: метод фіктивної усадної сили [4, 5], метод умовних пластичних деформацій [2, 6], метод заданих зон рівномірного усадження [7], метод заданих об’ємів укорочення [8] тощо.

Широке застосування в промисловості отримав експериментально-розрахунковий метод визначення залишкових напружень, який ґрунтується на розв'язанні обернених задач механіки деформованих тіл із залишковими деформаціями і використанні експериментальної інформації, отриманої за допомогою неруйнівних фізичних методів [4–6]. Базовими є рівняння деформованих твердих тіл, які враховують наявність умовних пластичних деформацій, що описуються тензорним полем. Із врахуванням апріорної інформації про розподіл цих деформацій будується розв'язок прямої задачі і записуються вирази для напружень, у які входять невідомі параметри цього поля. Для їх знаходження використовується експериментальна інформація про поле напружень (зокрема про усереднені характеристики компонентів тензора напружень) і будується функціонал, мінімізація якого забезпечує мінімальне відхилення теоретично обчислених від експериментальних характеристик полів напружень. Після знаходження параметрів, що описують поля, обчислюються напруження у довільній точці елемента конструкції. Зручність і досконалість методу полягає в тому, що він дає можливість використовувати будь-яку корисну експериментальну інформацію і при цьому точність отриманих результатів лише зростає. Особливо це важливим стає у випадку дослідження напруженого стану реальних об'єктів, які перебувають в експлуатації.

Отже, одним з головних завдань є правильне (з фізичної та математичної точки зору) задання компакту множини функцій, що описують поле залишкових зварювальних пластичних деформацій, які для різних класів сталей можуть істотно відрізнятися між собою.

Так, для низьколегованих та низьковуглецевих сталей вони мають такий вигляд, як це показано на рис. 1.

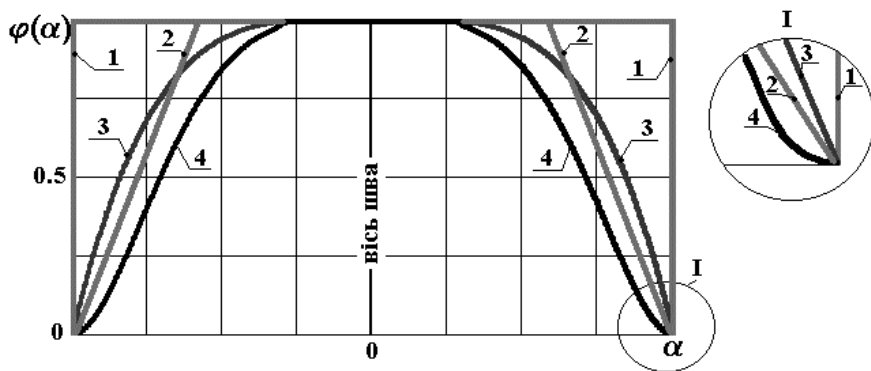


Рис. 1. Поле пластичних деформацій:

1 – метод Трочуна І. П. [5]; 2 – метод Ніколаєва Г. А. [4];
3 – метод Підстригача Я. С. і Осадчука В. А. [2, 9]; 4 – згідно з [10]

Однак для отримання спеціальних властивостей металоконструкцій широко використовуються високоміцні сталі, які при зварюванні схильні до утворення структур гартування, або структурні перетворення в яких проходять при низьких температурах [12]. Залишкові напруження, які при цьому виникають, мають значні градієнти, є різні за знаком в околі зварного шва. Для вибору множини компонент поля пластичних деформацій, яке виникає при зварюванні труб і локалізоване в околі шва, можна скористатись рівнянням узагальненого закону Гука та доступною інформацією про їх розподіл. При цьому апріорно приймається, що у випадку плоского напруженого стану дорівнює нулю одна, а одновісного

дорівнюють нулю дві компоненти пластичних деформацій. На основі вищевикладеного, отримано апроксимації полів пластичності у сталях, схильних до гартування, їх графічне відображення показано на рис. 2 і подано у [2–8, 11, 12].

Зображена на рис. 2 крива, відображає та узагальнює характер можливих полів пластичних деформацій для швів із різними структурами гартування. Останні, при інших рівних умовах, для швів із бейніто-мартенситною та ферито-перлітною структурами за значеннями максимальної деформації ϵ_{\max}^0 і розміром $\alpha_{0\max}$ є значно вищі, за значенням А – співрозмірні, а за розміром поля α_0 – менші порівняно із аустенітним швом. Однак найбільш характерною (із зміною від розтягуючих за знаком деформацій на шві (А) до стискаючих (В) на деякій відстані $\alpha_{0\min}$ від нього) є ця крива саме для такого типу швів. На деякій відстані від осі шва α_0 пластичні деформації дорівнюють нулю. Ця крива є симетричною відносно осі шва.

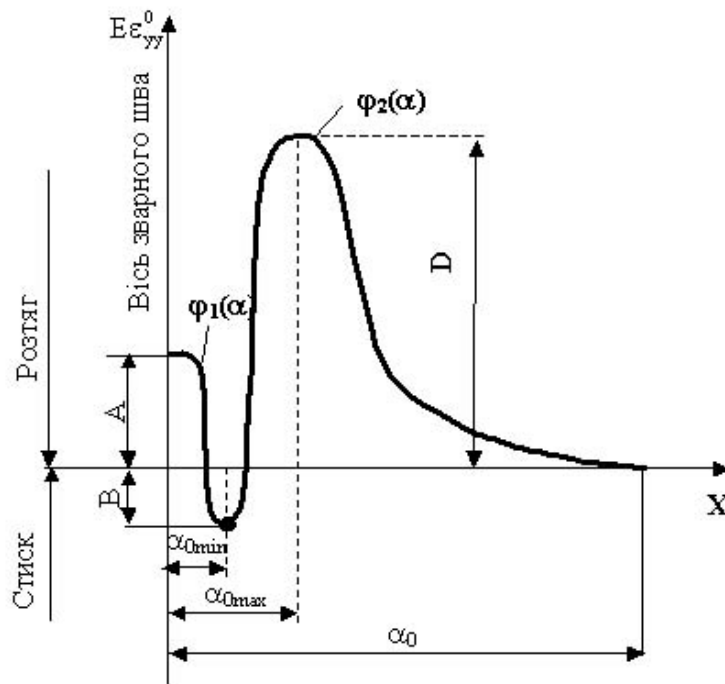


Рис. 2. Залишкові пластичні деформації у зварному з'єднанні сталей, схильних до гартування

Для отримання функції, яка характеризує зміну деформацій вздовж твірної труби, розділимо криву (рис. 2) в точці $\alpha_{0\min}$ на дві функції $\phi_1(\alpha)$ і $\phi_2(\alpha)$ та запишемо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \phi_1(\alpha) = p_1 + p_2 \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} + p_3 \frac{\alpha^3}{\alpha_0^3} \\ \phi_2(\alpha) = p_4 + p_5 \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} + p_6 \frac{\alpha^3}{\alpha_0^3} + p_7 \frac{\alpha^4}{\alpha_0^4} \end{cases}, \quad (1)$$

де $\phi_1(\alpha)$ – описує криву на відрізьку від осі шва до $\alpha_{0\min}$; $\phi_2(\alpha)$ – описує криву на відрізьку від $\alpha_{0\min}$ до α_0 ; $p_1 \dots p_7$ – коефіцієнти функцій.

Для знаходження невідомих параметрів $p_1 \dots p_7$, які задовольняють умови сходження двох функцій та гладкості на краю поля, запишемо таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(0) &= A \\ \varphi_1(\alpha_{0\min}) &= B \\ \varphi_1(\alpha_{0\min}) &= \varphi_2(\alpha_{0\min}) \\ \varphi_1'(\alpha_{0\min}) &= \varphi_2'(\alpha_{0\min}) \\ \varphi_2(\alpha_0) &= 0 \\ \varphi_2'(\alpha_0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Розв'язуючи систему (2) відносно p_7 , отримаємо такі значення невідомих параметрів:

$$\begin{aligned} p_1 = A, \quad p_6 &= \frac{B - p_7 \cdot (1 - \xi^2)^2}{0.5 - \xi^2 \cdot (1.5 - \xi)}, \quad p_5 = -1.5 \cdot p_6 - 2p_7, \quad p_4 = 0.5p_6 - 2p_7, \\ p_3 &= -\frac{2}{\xi^3} \cdot (B - A) + 3 \cdot p_6 \cdot \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) + 4 \cdot p_7 \cdot \left(\xi - \frac{1}{\xi}\right), \quad p_2 = \frac{(B - A)}{\xi^2} - p_3 \cdot \xi, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\xi = \alpha_{0\min} / \alpha_0$.

В результаті підстановки розв'язків системи (3) в (1) отримаємо формулу для задання функції поля пластичних деформацій (4). Тут невідомими є такі параметри поля, а саме: ширина (α_0), коефіцієнт (p_7), що задає кривину графіка функції поля, величина деформацій на осі шва (A) та стискаючих (B), відстань від осі шва до мінімальних значень поля ($\alpha_{0\min}$).

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

Для знаходження невідомих параметрів (α_0 , $\alpha_{0\min}$, p_7 , A , B) будується спеціальний функціонал, який являє собою суму середньоквадратичних відхилень між величинами теоретично розрахованих характеристик поля напружень та відповідними їм комбінаціями напружень, які можна отримати експериментальним шляхом [2, 10].

За наближений розв'язок оберненої задачі приймаються величини, які забезпечують найменше значення функціонала. Підставивши їх у відповідні формули, знайдемо розподіл напружень в зварному з'єднанні для кожного конкретного випадку.

На основі проведеного аналізу літературних та експериментальних даних можна зробити такі висновки. Внаслідок процесу зварювання сталей, схильних до гартування, в з'єднанні виникають залишкові напруження, які мають значну величину та складний характер. Для їх визначення доцільно застосовувати експериментально-розрахункові методи, які ґрунтуються на введенні в розрахунок як відомі значення компоненти залишкових деформацій, які визначаються із доступної експериментальної інформації про поле напружень. На основі узагальнення експериментальних даних і результатів, отриманих

числовими методами, запропоновано множину тензорних функцій для описання поля зварювальних пластичних деформацій.

1. Патон Б. Е. *Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций* // *Автоматическая сварка*. – 2000. – № 9–10. – С. 3–9. 2. Подстригач Я.С., Осадчук В.А., Марголин А.М. *Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций*. – К., 1991. – 296 с. 3. Усадкові напруги при зварюванні циліндричних посудин / Є.О. Патон, Б.М. Горбунов, Д.І. Берштейн, К.І. Дзевалтовський; Під ред. Є.О. Патона. – К., 1936. – 166 с. 4. Винокуров В.А. *Сварочные деформации и напряжения (методы их устранения)*. – М., 1968. – 236 с. 5. Трочук И.П. *Внутренние усилия и деформации при сварке*. – М., 1964. – 247 с. 6. Недосека А. Я. *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. – К., 2001. – 815 с. 7. Талыпов Г.В. *Сварочные деформации и напряжения*. – Л., 1973. – 278 с. 8. Окерблом Н. О. *Расчет деформаций металлоконструкций при сварке*. – М. – Л., 1955. – 214 с. 9. Осадчук В. А., Шелестовська М.Я. *Розподіл залишкових зварювальних напружень у товстих плитах з круговими швами* // *Фіз.-хім.механіка матеріалів*. – 1998. – № 3. – С. 31–35. 10. Дзюбик А. Р. *Вплив параметрів зварювання на напружений стан стиків трубопроводів* // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2000. – № 412 – С. 75–78. 11. Лобанов Л.М., Миходуй Л.М., Васильев В.Г., Позняков В.Д., Миходуй О.Л., Гончар А.К. *Особенности протекания термометформационных процессов при дуговой сварке высокопрочных сталей*. – К., 1999. – № 3. – С. 3–11. 12. Махненко В.И, Великованенко Е.А., Махненко О.В., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. *Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых стыков труб* // *Автоматическая сварка*. – 2000. – № 5. – С. 3–9.