УДК 621.721.052:539.4.014

Прохоренко О.В.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Україна, м. Київ

НОВА КОНЦЕПЦІЯ ЗАПОБІГАННЯ ЗАЛИШКОВОГО ПРОГИНУ ХРЕБТОВОЇ БАЛКИ ВАГОНА ВІД ЗВАРЮВАННЯ ПОЗДОВЖНІХ ШВІВ

Анотація

Вперше запропонована нова ідея запобігання утворенню залишкового прогину поздовжньої осі хребтової балки вагона від зварювання поздовжніх швів шляхом створення перед зварюванням за рахунок попереднього вигину балки необхідного об'єму пластичного видовження у верхній полиці і деякій частині стінки двотавра, привареного до двох Z-профілів поперечного перерізу балки.

Ідея полягає у зрівноваженні у поперечному перерізі балки згинальних моментів від залишкової усадкової сили в зоні залишкових поздовжніх пластичних деформацій скорочення, зумовлених зварюванням всіх поздовжніх швів, і розпірної сили в зоні залишкових поздовжніх пластичних деформацій видовження, зумовлених попереднім вигином балки перед зварюванням.

На основі методу складних перерізів [1, 2] запропоновано алгоритм інженерного розрахунку залишкового напружено-деформованого стану хребтової балки від зварювання поздовжніх швів та величини необхідного попереднього прогину поздовжньої осі балки в її середньому поперечному перерізі.

Abstract

The new concept of prevention formation of residual deflection of longitudinal axis of carriage spinal beam welded by longitudinal seams by making before welding owing to the previous bend of beam of needed plastic elongation volume in a top of beam flange and in a certain part of web I-beam welded on to two z-section of cross-section beam is first offered.

An idea was to balance in the beam cross-section of bending moment from residual shrinkage force in the residual longitudinal plastic deformations zone, resize to welding all longitudinal seams, and thrust force in the zone of elongation plastic deformations induced pre-liminary beam bending before welding.

On basis of complex sections method [1, 2] the algorithm of engineering calculations of residual mode of deformation of spinal beam welded by longitudinal seams on condition of preliminary clear deflection under two moments loading pattern on it butt ends before welding seams is proposed.

© Прохоренко О. В.

Вступ

В даній роботі продовжується розгляд теми стосовно прогину хребтової балки вагону від зварювання поздовжніх швів, започаткованої в роботі автора [3]. В згаданій роботі [3] розглянуто розроблений автором алгоритм розрахунку за методом складних перерізів [1, 2] залишкового прогину поздовжньої осі хребтової балки вагону, зумовленого зварюванням поздовжніх швів балки за штатною технологією. Там же було показано, що залишковий прогин балки досягає значної величини і бажано було б технологічним шляхом запобігти його утворенню повною мірою або хоча б його суттєво зменшити.

Постановка задачі

Метою даної роботи є розробка нової концепції запобігання утворенню залишкового прогину поздовжньої осі хребтової балки вагона від зварювання поздовжніх швів шляхом створення до зварювання за рахунок попереднього вигину балки необхідного об'єму пластичного видовження у верхній полиці і прилеглій до неї деякій частині стінки двотавра, який є складовим конструктивним елементом поперечного перерізу балки.

За задумом реалізація такої концепції має забезпечити запобігання утворенню залишкового прогину балки від зварювання поздовжніх швів за рахунок наступних двох механізмів поздовжнього пружно-пластичного деформування у поперечному перерізі балки на етапі технологічного процесу її виготовлення.

По-перше, попередній вигин балки у сторону, протилежну залишковому прогину від зварювання, створює в зонах пластичності зварних швів активне навантаження розтягу деякої величини, яке можна розрахувати за загально відомими залежностями, і це зменшує об'єм залишкового поздовжнього пластичного скорочення від зварювання, з усіма відповідними позитивними наслідками стосовно залишкового прогину.

По-друге, створення попереднім вигином балки об'єму пластичного видовження у верхній полиці двотавра і деякій прилеглій до неї частині стінки зумовлює появу в залишковому стані певної величини розпірної сили з протилежним до усадкової сили напрямком дії і відповідним напрямком її згинального моменту, протилежним напрямку згинального моменту усадкової сили від зварювання.

Величина попереднього прогину балки має бути розрахованою таким чином, щоб згинальні моменти від усадкової сили зварних швів і розпірної сили пластичного видовження від попереднього прогину зрівноважували один одного і залишковий прогин балки від зварювання поздовжніх швів був відсутнім.

Таким чином, до змісту нової концепції входить також і розробка на основі методу складних перерізів [1, 2] алгоритму розрахунку необхідного попереднього прогину хребтової балки, який би забезпечував нульовий залишковий прогин балки від зварювання.

Основна частина

Опис хребтової балки, її довжина і геометрія поперечного перерізу, розрахунок координат центра ваги і моменту інерції поперечного перерізу відносно осі прогину балки, режими зварювання за штатною технологією, матеріал балки, межа текучості, технологічна схема зварювання, припущення стосовно розповсюдження тепла в конструктивних елементах перерізу при зварюванні швів, припущення про збіжність найближчих до джерела нагрівання поперечних перерізів з максимальною в них шириною зон пластичних деформацій вкорочення тощо наведені у попередній роботі автора [3].

В даній роботі на основі методу складних перерізів [1, 2] запропоновано алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану балки для принципово важливих стадій нагрівання і залишкових станів двохетапного зварювання поздовжніх швів за умов попереднього чистого вигину балки відповідно до відомої схеми двомоментного її навантаження заданими зовнішніми моментами M і проаналізовані отримані результати з точки зору обґрунтованості головної ідеї висунутої концепції зменшення залишкового прогину балки, зумовленого зварюванням поздовжніх швів.

Отже, розглянемо хребтову балку вагона (рис. 1), завантажену у вертикальній площині зовнішнім згинальним моментом M, прикладеним з обох її кінців так, що верхня частина поперечного перерізу балки вище осі X знаходиться в стані поздовжнього розтягу, а нижня — поздовжнього стиску. При цьому для будь-якої координати y в кожному з конструктивних елементів поперечного перерізу балки можна визначити поздовжні напруження за загально відомою формулою з опору матеріалів.

Повна деформація $\varepsilon fo(y)$ поперечного перерізу балки від дії згинального моменту M показана на рис. 2 і визначається за залежністю

$$\varepsilon fo(y) = \frac{M \cdot y}{E \cdot I_{XO}}.$$

Якщо значення згинального моменту

$$M \le \frac{\varepsilon_s \cdot E \cdot I_{XO}}{y1}, \qquad (1^*)$$

то повна деформація одночасно є і пружною деформацією $\varepsilon eo(y)=\varepsilon fo(y)$ у поперечному перерізі балки. При більшому значенні M у верхній полиці двотавра та деякій частині прилеглої до неї стінки балки утворюється поздовжня пластична деформація видовження $\varepsilon po(y)$, яка показана відповідною лінією на рис. 2.

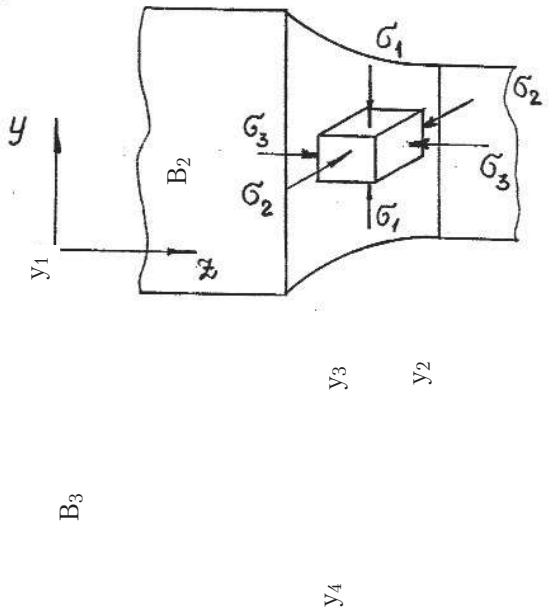

Рис. 1. Поперечний переріз хребтової балки вагона в системі центральних осей координат XOY

За умови несиметричного нагрівання балки на етапах заварювання поздовжніх швів повна деформація поперечного перерізу буде суттєво збільшуватись в ту ж саму сторону, що і від дії згинального моменту M. Тому навіть при виконанні умови (1*) можемо мати пластичну деформацію видовження у верхній полиці і частково у прилеглій до неї стінці двотавра.

За штатною технологією виготовлення балки передбачається виконання швів у дві черги: спочатку одночасно заварюються кутові шви приєднання двотавра до Z-профілів, у другу чергу зварюються між собою стиковим швом Z-профілі. Таким чином, для кожної черги маємо як стадію нагрівання при виконанні швів, так і залишковий стан після повного охолодження балки.

Для оцінки значення залишкового відносного об'єму поздовжнього пластичного вкорочення металу в зонах залишкових пластичних деформацій вкорочення зварних швів як в умовах зварювання балки без попереднього зовнішнього навантаження, так і за наявності зовнішніх згинальних моментів заданої величини, необхідно на кожній із названих вище стадій здійснювати моніторинг і аналіз напружено-деформованого стану на основі математичних розв'язків відповідних задач. У випадку зварювання балки без попереднього

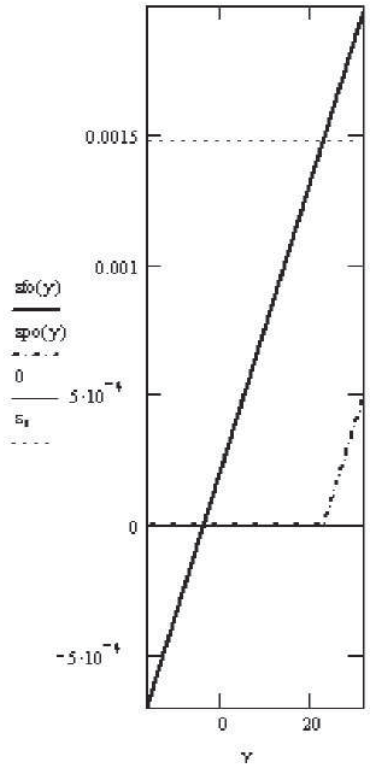

Рис. 2. Повна (водночас і пружна) та пластична поздовжні деформації по координаті y у поперечному перерізі хребтової балки при її чистому вигині за схемою двох моментів

вигину зовнішніми моментами такий аналіз і моніторинг напружено-деформованого стану наведено в роботі [3]. В даній роботі розглядаємо його для випадку зварювання за наявності зовнішнього згинального моменту у порівнянні з випадком в роботі [3]. Таким чином, для наступних чотирьох стадій виготовлення балки запишемо в загальному вигляді відповідні розрахункові системи рівнянь.

Стадія нагрівання при одночасному приварюванні двома швами двотавра до Z-профілів

За наявності зовнішніх згинальних моментів на торцях балки систему визначальних рівнянь за методом складних перерізів [1, 2] у загальному вигляді можна подати подібно до системи (1) роботи [3] зі зміною в ній рівняння *2* і додаванням до неї рівняння *5* системи (1) даної роботи у вигляді:

$$\left.\begin{aligned}
&\int_F \varepsilon eh1(x,y)dF = 0;\\
&E\int_F \varepsilon eh1(x,y)ydF = M;\\
&\varepsilon eh1B4(x = B6 + bn4) + \varepsilon_s = 0;\\
&\varepsilon eh1B6(x = B6 - bn6) + \varepsilon_s = 0;\\
&\varepsilon eh1B2(y = y1 - bn2) - \varepsilon_s = 0;\\
&t1 - \frac{1}{\omega}(\sqrt{a^2 + \omega \cdot bn6^2} - a) = 0.
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Позначення в системі (1) відповідають позначенням в системі (1) роботи [3]. Невідомими системи (1) є параметри g і d повної деформації поперечного перерізу балки, а також ширина зони пластичних деформацій $bn4$, $bn6$ і $bn2$ відповідно у верхніх полицях Z-профілів, нижній полиці двотавра і верхній частині стінки двотавра. Зона пластичних деформацій видовження від зовнішніх моментів охоплює повністю переріз верхньої полиці двотавра і частину його стінки на довжині $bn2$ від точки перетину штрихових середніх ліній контуру згаданих полиці і стінки двотавра.

Останнє рівняння в системі (1) можна записати із заміною $bn4$ на $bn6$. В такий спосіб при розв'язуванні задачі перевіряється попередньо прийняте з метою спрощення розрахунків припущення про незначну відстань між двома поперечними перерізами балки, в кожному з яких досягається значення $bn4$ або $bn6$.

Залишковий стан після одночасного приварювання двома швами двотавра до Z-профілів

Система рівнянь для даного залишкового стану подібна до системи (8) в роботі [3] з необхідною корекцією рівняння *2* у зв'язку з наявністю зовнішнього моменту M. Тоді у загальному вигляді систему можна подати так:

$$\left.\begin{aligned}
&\int_F \varepsilon er1(x,y)dF = 0;\\
&E\int_F \varepsilon er1(x,y)ydF = M;\\
&\varepsilon er1B4(x = B6 + \chi n4) - \varepsilon_s = 0;\\
&\varepsilon er1B6(x = B6 - \chi n6) - \varepsilon_s = 0.
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Всі позначення в системі (2) визначені в роботі [3]. Невідомими системи (2) є параметри m та n повної деформації $\varepsilon fr1(y) = \mathrm{m} \cdot y + n$ поперечного перерізу балки в залишковому стані після приварювання двотавра, а також значення $\chi n4$ та $\chi n6$ ширини зони пластичних деформацій видовження на стадії охолодження після приварювання двотавра.

Залежності для пружних і пластичних деформацій у поперечному перерізі балки у залишковому стані після приварювання двотавра до верхніх полиць Z-профілів наведені в роботі [3]. Залишкові для даного стану повні, пружні і пластичні деформації у частині стінки двотавра, яка є прилеглою до його верхньої полиці, визначаються залежностями:

$$\varepsilon fr1B2(y) = m \cdot y + n,$$

$$\varepsilon er1B2(y) = \begin{cases} m \cdot y + n, \\ if\ y2 + 0,5 \cdot \delta 1 \le y \le y1 - bn2; \\ m \cdot y + n - \varepsilon ph1B2(y), \\ if\ y1 - bn2 \le y \le y1 - 0,5 \cdot \delta 1, \end{cases}$$

$$\varepsilon pr1B2(y) = \begin{cases} 0,\ if\ y2 + 0,5 \cdot \delta 1 \le y \le y1 - bn2; \\ \varepsilon ph1B2(y), \\ if\ y1 - bn2 \le y \le y1 - 0,5 \cdot \delta 1. \end{cases}$$

Стадія нагрівання при заварюванні шва другої черги для з'єднання двох Z-профілів між собою

З урахуванням особливостей розповсюдження тепла при зварюванні даного шва, механізму пружно-пластичного деформування в зонах пластичності швів та прийнятих з цих міркувань припущень [3], систему визначальних рівнянь для даної стадії нагрівання у загальному вигляді можна подати у вигляді:

$$\left.\begin{aligned}
&\int_F \varepsilon eh2(x,y)dF = 0;\\
&E\int_F \varepsilon eh2(x,y)ydF = M;\\
&\varepsilon eh2B4(x = bnZ) + \varepsilon_s = 0;\\
&\varepsilon eh2B6(x = B6 - \varphi n6) + \varepsilon_s = 0;\\
&t2 - \frac{1}{\omega}(\sqrt{a^2 + \omega \cdot bnZ^2} - a) = 0.
\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Повну деформацію поперечного перерізу балки, в якому зона bnZ досягає максимального значення, відповідно до гіпотези плоских перерізів представляємо у вигляді $\varepsilon fh2(y) = u \cdot y + r$. Параметри u, r, bnZ та $\phi n6$ входять до числа невідомих системи (3).

Залишковий стан після зварювання всіх швів балки за наявності прикладеного моменту

Система рівнянь для даного залишкового стану має такий загальний вигляд:

$$\left.\begin{aligned}
&\int_F \varepsilon er2(x,y)dF = 0;\\
&\int_F \varepsilon er2(x,y)ydF = 0;\\
&\varepsilon er2B4(x = snrZ4) - \varepsilon_s = 0.
\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

де *snrZ4* — ширина зони пластичних деформацій видовження на стадії охолодження з кожного боку шва у верхніх полицях *Z*-профілів. Повну залишкову деформацію будь-якого поперечного перерізу балки записуємо у вигляді $\varepsilon fh2(y)=mr\cdot y+nr$. Параметри *mr* та *nr* входять до числа невідомих системи (4).

Залишковий стан після зварювання полиць Z-профілів і розвантаження від зовнішнього моменту.

Система рівнянь для остаточного залишкового стану балки має такий загальний вигляд:

$$\left.\begin{aligned}\int_F \varepsilon er0(x,y)dF = 0;\\ \int_F \varepsilon er0(x,y)ydF = 0.\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

де $\varepsilon er0(x, y)$ — залишкові пружні деформації у перерізі балки після розвантаження від зовнішнього моменту *M*.

Алгебризований вигляд систем (1)...(5) в роботі не наводиться у зв'язку з їх громіздкістю. Системи (1)...(5) розв'язувались в обчислювальному середовищі MathCAD. Режим зварювання наведений в роботі [1], додатково прийнято $M = k_M \cdot E = 1{,}5 \cdot E$.

Розподіл деформацій в елементах поперечного перерізу балки в залишковому стані після звільнення балки від моменту *M* у порівнянні з аналогічним розподілом при зварюванні без попереднього пружного вигину показано на рис. 3 і 4.

Порівняння залишкового напружено-деформованого стану балки на рис. 3 і 4 для випадків її зварювання без попереднього зовнішнього навантаження і з попереднім навантаженням двома згинальними моментами свідчить про позитивний вплив попереднього вигину балки, що проявляється у зменшенні відносного залишкового об'єму поздовжнього пластичного вкорочення, залишкової сумарної усадкової сили, а отже і частини залишкового прогину. Інша частина зменшення залишкового прогину забезпечується утворенням моменту протидії від залишкової розпірної сили, зумовленої відносним залишковим об'ємом поздовжнього пластичного видовження у верхній полиці двотавра та частині його стінки, прилеглої до верхньої полиці. Такий об'єм пластичного видовження утворюється на стадіях нагрівання при зварюванні швів за рахунок прикладених до балки перед зварюванням згинальних моментів. За розрахунками при зварюванні балки без попереднього вигину залишковий прогин становить 12,54 мм, а при зварюванні з попереднім вигином моментами $M = k_M E = 1{,}5\,E - 4{,}19$ мм. Як бачимо, залишковий прогин балки зменшився у три рази, що є суттєвим і переконливо свідчить про обґрунтованість головної ідеї висунутої нової концепції зменшення залишкового прогину хребтової балки, зумовленого зварюванням поздовжніх швів.

Очевидно, що збільшенням *M* шляхом збільшення коефіцієнта k_M можна зменшити залишковий прогин балки практично майже до нуля.

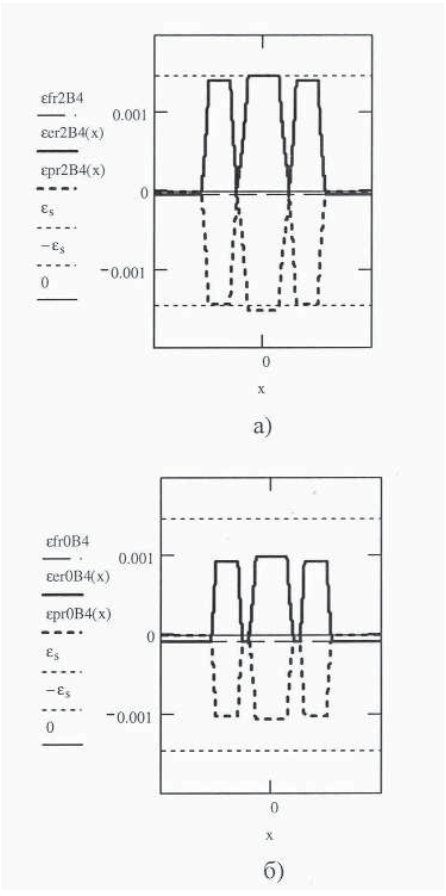

Рис. 3. Розподіл повних, пружних і пластичних деформацій у верхніх полицях *Z*-профілів у залишковому стані після зварювання балки:
а) — без попереднього вигину;
б) — з попереднім вигином

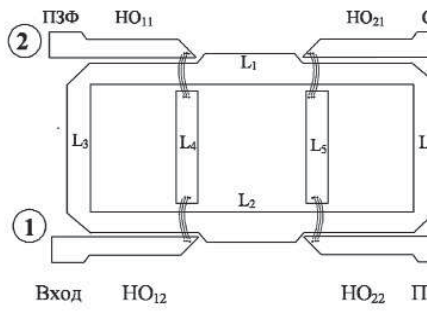

Рис. 4. Розподіл повних, пружних і пластичних деформацій у нижній полиці двотавра у залишковому стані після зварювання балки:
а) — без попереднього вигину;
б) — з попереднім вигином

Цього можна досягти багатократним повтором обчислень задачі при поступовому збільшенні коефіцієнта k_M, однак це не є сучасним підходом до розв'язання такої задачі. Доцільним є постановка задачі оптимізації коефіцієнта k_M за критерієм нульового залишкового прогину балки. Але це вже є тема наступної статті стосовно зменшення залишкового прогину хребтової балки від зварювання поздовжніх швів.

Висновки

1. Розроблена нова концепція зменшення залишкового прогину хребтової балки вагона, зумовленого зварюванням поздовжніх швів, за рахунок попереднього перед зварюванням чистого вигину балки за схемою двомоментного навантаження балки на її торцях. Така схема попереднього навантаження балки ініціює в ній під час зварювання і охолодження два позитивно діючі механізми пластичного деформування балки. По-перше, попередній вигин балки на стадії її нагрівання при зварюванні швів як першої, так і другої черги створює у верхній полиці двотавра і прилеглій до неї частині стінки деформацію пластичного видовження, яка не змінюється в подальшому на стадії охолодження і в залишковому стані зумовлює появу у балці розпірної сили і відповідний їй згинальний момент, протилежний згинальному моменту від залишкової усадкової сили від зварювання поздовжніх швів. По-друге, попередній вигин балки забезпечує зменшення у балці відносного залишкового об'єму поздовжнього пластичного вкорочення у пластичних зонах зварних швів за рахунок пластичного видовження в цих зонах на стадії охолодження після зварювання поздовжніх швів. В результаті маємо меншу величину залишкової усадкової сили від зварювання і відповідно менший згинальний момент, який спричиняє залишковий прогин балки.

2. Відповідно до нової концепції запропоновано і новий алгоритм розрахунку залишкового прогину балки від зварювання поздовжніх швів в умовах попереднього перед зварюванням чистого вигину балки двома моментами на її торцях.

Завдання для подальших досліджень

На думку автора заслуговує на увагу постановка, розв'язання і дослідження задачі оптимізації величини попередньо перед зварюванням прикладеного до балки згинального моменту за критерієм нульового залишкового прогину.

Література

1. *Прохоренко В.М., Прохоренко О.В.* Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях. — К.: НТУУ «КПІ», 2009. — 268 с.

2. *Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В.* Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстродвижущимся линейным источником // Технологические системы. — 2005. — № 4. — С. 49–55.

3. *Прохоренко О.В.* Залишковий прогин хребтової балки вагона від зварювання поздовжніх швів // Технологические системы. — 2009. — № 4(48). — С. 82–93.