

УДК 624.014.072

*В. С. Шебанін, д-р техн. наук,  
І. І. Хилько*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ БІСТАЛЕВИХ СТЕРЖНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ПОНОВЛЕННЯ ОБМЕЖЕНИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ**

В статье рассмотрена методика исследования несущей способности бистальных стержней с использованием метода возобновления пластической составляющей деформации в наиболее деформированном элементе стержня на каждом шаге итерационного процесса.

## **RESEARCH OF BEARING ABILITY BE-STEEL BARS ON THE BASIS THE METHOD OF RENEWAL OF THE LIMITED PLASTIC DEFORMATIONS**

The research method of bearing ability be-steel bars is considered. The method of renewal of plastic deformation in the most deformed element of a core on each step of iterative process is used.

**Постановка проблеми.** Як відомо, практичне застосування сучасних методів розрахунку бисталевих стержнів при одночасному врахуванні фізичної та геометричної нелінійності є питання досить складне. Крім цього, згідно норм проектування БНіП II-23-81 рекомендовано виконувати розрахунок сталевих конструкцій, в основному, тільки з врахуванням непружних деформацій, і тільки при відповідному техніко-економічному обґрунтуванні згідно пункту 1.8 цих норм розрахунок допускається виконувати за деформованою схемою, яка враховує вплив переміщень конструкцій під навантаженням. При цьому розрахунок бисталевих стержнів взагалі не розглядається.

**Стан вивчення проблеми.** Деформаційна теорія більшості граничних станів, включаючи граничний стан за міцністю, вперше встановлена М. С. Стрелецьким [1, 2], в теперішній час визнана за основні положення проектування будівельних конструкцій [3]. Перехід до розрахунку міцності бисталевих стержнів здійснюється, як правило, за критерієм обмежених пластичних деформацій [4]. Для визначення зусиль з урахуванням їх перерозподілу за межею пружності при заданих значеннях граничної пластичної деформації  $\varepsilon_{ip,lim}$  використовується ефективний метод розрахунку, заснований на поновленні величини  $\varepsilon_{ip,lim}$  в найбільш деформованому елементі металевої конструкції на кожному кроці ітераційного процесу. При цьому забезпечується збіжність ітераційного процесу, незначна кількість послідовних наближень та необхідна точність результатів.

**Завдання та методика досліджень.** Ідея методу поновлення обмежених пластичних деформацій полягає у тому, що на кожному кроці ітераційного процесу послідовних наближень напружено-деформований стан стержня по можливості наближається до кінцевого граничного стану, що забезпечує швидку збіжність при малій кількості ітерацій. Для цього в кожному послідовному наближенні змінюються або величини навантажень, або розміри перерізу стержня, таким чином, щоб у найбільш напруженому місці стержня досягалася гранична величина пластичної деформації  $\varepsilon_{ip,lim} = 0,002$ . При розв'язанні прямої задачі підбору перерізів стержнів за

заданим вектором  $\vec{F}$  навантаження величина  $\varepsilon_{ip,lim}$  поновлюється зміною перерізу (наприклад, вибором із заданого сортаменту). При розв'язанні оберненої задачі визначення навантаження заданого виду і співвідношення компонентів вектора  $\vec{F}$  стержня у граничному стані величина  $\varepsilon_{ip,lim}$  у най-

більш деформованому місці поновлюється зміною всіх компонентів  $\vec{F}$  пропорційно одному параметру  $\lambda$ . На кожному кроці ітерацій стержень приймається лінійно деформованим при фіксованих значеннях жорсткостей стержня, зміненого в місцях розвитку пластичних деформацій на попередньому кроці ітераційного процесу.

**Результати досліджень.** Проведені нами дослідження дійсної роботи стиснуто-зігнутих бісталевих стержнів за деформованою схемою у випадках дії на стержень поздовжньої та поперечної сил показали, що врахування деформованої схеми значно впливає на несучу здатність стержня і повинне враховуватися шляхом введення корегуючого коефіцієнта  $\nu = M_d^{max} / M^{max}$ . Розрахунок міцності стержня виконується при збереженні традиційного виду розрахункових формул пружної роботи матеріалу з доповненням системою корегуючих розрахункових коефіцієнтів  $\nu$ .

На рис. 1 показані симетричні моносталеві двотаври та еквівалентні їм симетричні бісталеві двотаври, площі полиць яких обернено пропорційні розрахунковим опорам вказаних моносталевих перерізів. Дослідимо ці перерізи при роботі в граничному стані, коли гранична пластична деформація  $\varepsilon_{ip,lim}$  досягається в нижній частині перерізу. Поздовжню розтягуючу силу, яка утворює додаткові напруження, будемо поступово збільшувати від нульового значення. При невеликих поздовжніх силах, коли текучість досягається в обох полицях і моносталевому і бісталевому перерізах, деформований стан перерізів та епюри напружень у стінці однакові (рис. 1, а, б). При збільшенні поздовжньої сили нейтральна лінія епюри напружень зміщується вгору і, коли напруження  $\sigma_B$  у верхній полиці бісталевого перерізу стає менше його границі текучості  $R_f$ , то текучість у верхній частині перерізу зберігається тільки у стінці (рис. 1, г). В той же час напруження  $\sigma_B$  у верхній по-

лиці моносталевого перерізу не змінюється і залишається рівним границі текучості  $R_w$  (рис. 1, в).

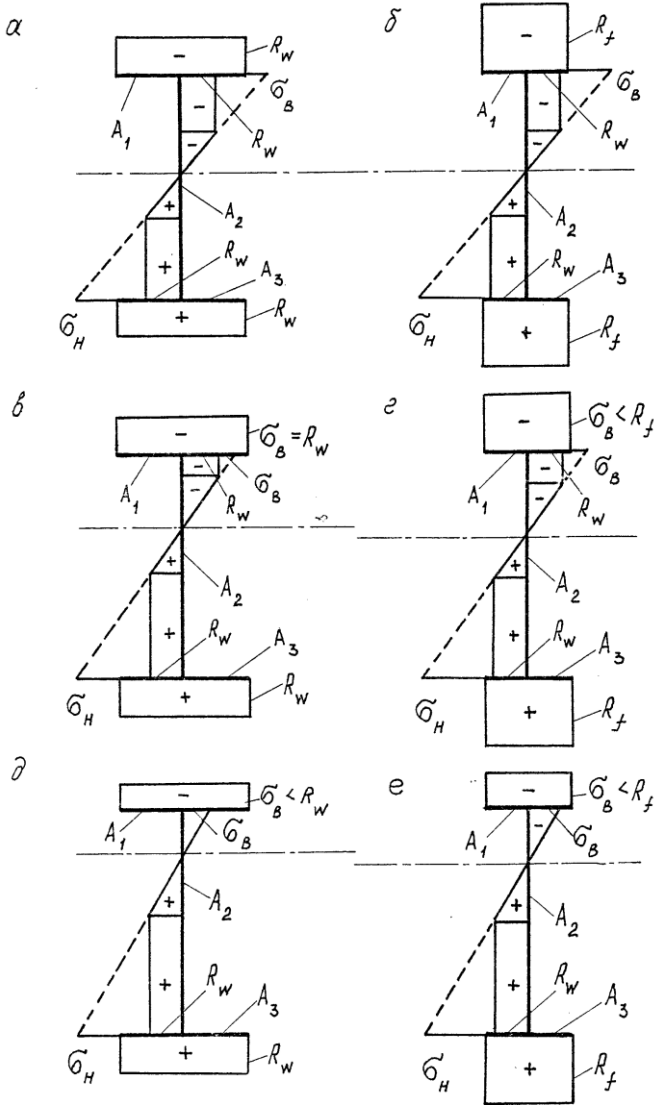


Рис. 1 – Напружено-деформований стан еквівалентних перерізів

Таким чином, у моносталевому та бісталевому перерізах виникають різні випадки напружено-деформованого стану. При цьому, внаслідок того, що зусилля, які отримує верхня полиця бісталевого перерізу менші, ніж зусилля, які отримує верхня полиця моносталевого перерізу, висота зони текучості у верхній частині бісталевого перерізу залишається більшою і нейтральна лінія в ньому розміщується нижче, ніж у моносталевому перерізі. При подальшому зростанні поздовжньої сили текучість припиняється і у верхній полиці моносталевого перерізу (рис. 1,д). Випадки напружено-деформованого стану моносталевого і бісталевого перерізів стають однаковими, але із-за меншої площі верхньої полиці бісталевого перерізу нейтральна лінія в ньому залишається нижче, ніж у моносталевому (рис. 1,е).

Аналіз вказаних випадків, а також аналогічний розгляд асиметричних моносталевих і бісталевих перерізів говорить про те, що поведінка бісталевих перерізів за межу пружності при наявності поздовжньої сили має ряд особливостей у порівнянні з випадком  $N = 0$  і вимагає спеціального дослідження, яке і було виконане.

При дослідженні напружено-деформованого стану бісталевих симетричних і асиметричних двотаврів розглядається п'ять випадків комбінацій текучості та пружної роботи окремих частин перерізу. Відмінність в роботі бісталевих двотаврових перерізів при наявності поздовжньої сили, у порівнянні з моносталевими перерізами, приводить до появи різних кривизн поздовжньої осі стержня і, як правило, до різних прогинів стержнів.

Виникнення різних прогинів позацентрово-стиснутих і позацентрово-розтянутих стержнів, які виконані з однієї чи двох марок сталі, приводить до різної їх поведінки при роботі в області обмежених пластичних деформацій з урахуванням деформованої схеми і показані на рис. 2.

На рис. 2 відображено особливості роботи бісталевого та моносталевого стержнів двотаврового перерізу. Стержні відрізняються один від іншого тільки розрахунковими опорами матеріалів полук:  $R_f$  – для бісталевого стержня,  $R_w$  – для моносталевого, причому  $R_f > R_w$ .

Обидва стержні завантажені однаковими поздовжніми силами (рис. 2,а). Поперечне навантаження визначається з умови розвитку в найбільш напруженому перерізі граничної пластичної деформації  $\varepsilon_{ip,lim}$  з врахуванням деформованої схеми і для бісталевого стержня отримується більше, ніж для моносталевого. Зона розвитку пластичних деформацій в бісталевих (рис. 2,б) і моносталевих (рис. 2,в) стержнях визначається рівнем згинального моменту  $M_{SN}$  – максимального в межах пружності (рис. 2,г). При цьому текучість виникає пізніше в моносталевому стержні і зона пружно-пластичної роботи в ньому значно менша. В результаті цього прогини в бісталевому стержні перевищують прогини моносталевого стержня, що приводить при однакових поздовжніх силах до різних величин моментів  $M_x$ , які визванні викривленням осі стержня і враховують вплив деформованої схеми при розрахунку бісталевого та моносталевого стержнів.

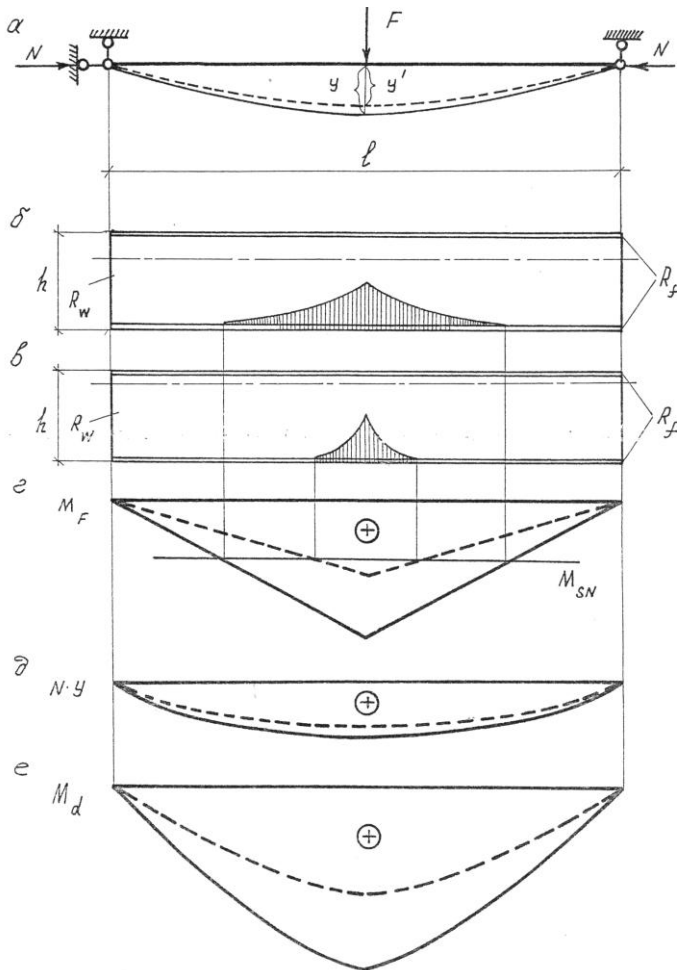


Рис. 2 – Особливості роботи бісталевих і моноталевих стержнів

На рис. 2, д еюра  $N_y$  у моноталевому стержні показана штриховою лінією, у бісталевому – суцільною. Розрахункові еюри згинальних моментів в розглядуваних стержнях, знайдені з урахуванням їх фізичної та геометричної нелінійності, приведені на рис. 2,е (штрихова лінія відповідає еюри в моноталевому стержні, суцільна – у бісталевому).

Відмінності в поведінці моноталевих і бісталевих стержнів вказують на необхідність вивчення роботи бісталевих стержнів в області обмежених пластичних деформацій з урахуванням деформованої схеми.

Для дослідження роботи бісталевих стержнів з урахуванням фізичної і геометричної нелінійності використовується подальший розвиток методики, яка приведена в роботі [5].

Згідно уточненої методики, з урахуванням виконання умов першого та другого граничних станів, було розроблено алгоритм розрахунку міцності бісталевих стержнів, який потім був реалізований у вигляді програми на мові TYRBO C1 на ПЕОМ [6]. В результаті розрахунку були одержані таблиці корегуючих коефіцієнтів  $\nu$  для уточнення формули пружно-пластичного розрахунку міцності стержня за критерієм обмежених пластичних деформацій, отриманої раніше без врахування деформованої схеми, ряд апроксимуючих аналітичних залежностей за результатами статистичної обробки одержаних даних [7, 8] та виконано розмежування розрахунків на міцність та жорсткість бісталевих стержнів з урахуванням деформованої схеми в області обмежених пластичних деформацій [9].

Для перевірки теоретичних результатів були проведені експериментальні випробування дійсної роботи стержневих елементів бісталевих конструкцій, які повністю підтвердили проведені теоретичні дослідження [10, 11].

**Висновки та пропозиції.** 1. Особливістю підбору двотаврових перерізів бісталевих стержнів, на відміну від моносталевих, є те, що при розрахунку їх міцності розвиток пластичних деформацій можна врахувати двома способами, коли при входженні матеріалу стінки в пластичну стадію роботи, матеріал полиць може працювати у пружній стадії, або в них можуть розвиватися пластичні деформації.

2. При згині з поздовжньою силою із збільшенням розрахункового опору сталі полиць  $R_f$  граничний згинальний момент  $M_{lim}$ , що витримує двотавровий переріз бісталевих стержнів, монотонно зростає на всьому проміжку зростання  $R_f$ , при цьому значення поздовжньої сили має більший вплив на величину згинального моменту у порівнянні з моносталевими.

3. Підвищення розрахункової міцності сталі полиць підвищує їх значення в збільшенні несучої здатності перерізу тільки до певного значення поздовжньої сили  $N$ .

4. Відмінності в роботі бісталевих двотаврових перерізів при наявності поздовжньої сили, у порівнянні з моносталевими перерізами, приводять до появи різних кривизн поздовжньої осі стержня і, як правило, до різних прогинів стержнів. Текучість виникає пізніше в моносталевому стержні, тому зона пружно-пластичної роботи в ньому значно менша. В результаті цього прогини в бісталевому стержні перевищують прогини моносталевих стержнів, що приводить при однакових поздовжніх силах до різних величин моментів  $M_x$ , які виникли в результаті викривлення осі стержня і враховують вплив деформованої схеми при розрахунку бісталевих та моносталевих стержнів.

## БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Стрелецкий, Н. С.** Избранные труды [Текст] : сб. статей / под ред. Е. И. Беле-ня. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 242–256.

2. **Стрелецкий, Н. С.** К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям [Текст] // Развитие методики расчета по предельным состояниям: сб. статей/ под ред. Е. И. Беленя. – М. : Стройиздат, 1971. – С. 257–262.

3. СНиП II-A. 10-71. Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 4–9.

4. **Чернов, Н. Л.** Расчет стальных конструкций на прочность по критерию ограниченных пластических деформаций [Текст] / Н. Л. Чернов, Н. Н. Стрелецкий, Б. И. Любаров // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1984. – №7. – С. 1–9.

5. **Шебанин, В. С.** Прочность изгибаемых стальных стержневых конструкций при учете физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций: Дис. ... д-р. техн. наук : 05.23.01. – Одеса, 1993.

6. **Шебанін, В. С.** Міцність бісталевих стержнів при згині з позовжною силою з врахуванням деформованої схеми в області обмежених пластичних деформацій [Текст] / В. І. Шебанін, І. І. Хилько // Вісн. аграрної науки Причорномор'я. – 1998. – Вип. 2. – С. 123–128.

7. **Шебанін, В. С.** Математична модель розрахунку прогинів стержнів в області обмежених пластичних деформацій при складному опорі. Українська асоціація по металевим конструкціям [Текст] / В. І. Шебанін В. Г. Богза, І. І. Хилько // Металеві конструкції. – 2000. – Т. 1, №1. – С. 45–48.

8. **Шебанін, В. С.** Аналітичні залежності розрахунку прогинів стержнів при складному опорі за межею пружності. Українська асоціація по металевим конструкціям [Текст] / В. І. Шебанін, І. І. Хилько // Металеві конструкції. – 2003. – Т. 6, №1. – С. 31–33.

9. **Шебанин, В. С.** Методика определения прогибов и разграничения области расчета на прочность и жесткость стержней при изгибе с продольной силой с учетом деформированной схемы в области ограниченных пластических деформаций [Текст] / В. І. Шебанін, Н. А. Веремеенко, І. І. Хилько // MOTROL. – 2008. – 10В. – С. 230–245.

10. **Шебаніна, Л. П.** Експериментальні дослідження роботи бісталевих стержнів симетричного перерізу за межею пружності [Текст] / В. І. Шебанін, І. І. Хилько // Вісн. аграрної науки Причорномор'я. – 2007. – Вип. 1(39). – С. 229–234.

11. **Шебанін, В. С.** Експериментальні дослідження роботи бісталевих стержнів асиметричного перерізу за межею пружності [Текст] / В. І. Шебанін, І. І. Хилько // Вісн. аграрної науки Причорномор'я. – 2008. – Вип. 2(45). – С. 186–192.

*Миколаївський державний аграрний  
університет, Миколаїв, Україна*

*Надійшла до редколегії 01.02.2009*

УДК 539.3

*В. П. Шевченко, академик НАН Украины, д-р физ.-мат. наук,  
Н. В. Дергачева*

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРТОТРОПНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ТЕРМОУПРУГОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВИМ НАГРЕВЕ

Отримано розв'язок задачі про локальний тепловий нагрів ортотропної оболонки для термопружних сил та моментів і досліджено вплив геометричних параметрів на отримані розв'язки. Локальний термопружний стан визначався за допомогою фундаментального розв'язку рівняння термопружної рівноваги пластин та оболонок і формул зворотки. Інтегрування проводилось на основі метода Файлона.

## THE INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE ORTHOTROPIC'S SHELL ON THE TERMOELASTIC STATUS UNDER LOCAL THERMAL HEATING

The decision of a problem on local thermal heating orthotropic shells for thermoelastic and the moments is received. Local thermoelastic the condition was defined with use of the fundamental decision of the equations thermoelastic balance of plates and environments and the formula of convolution. Integration was carried out by Filon's method.

**Введение.** В связи с необходимостью расчета элементов тонкостенных конструкций при тепловых нагревах во время сварки [4] в последние годы интенсивно развиваются методы исследования термоупругого состояния таких элементов. В данной работе проводится исследование напряженного состояния оболочек произвольной гауссовой кривизны, которые находятся под действием теплового нагрева, распределенного по круговой области. Исследуется влияние геометрических параметров оболочки и размеров площадки на поведение усилий и моментов в оболочке. В данной статье решение задачи проводится с помощью методов на основе фундаментального решения, которые развиты в работах [2, 5–7].

**Постановка задачи.** Рассмотрим тонкую пологую оболочку толщиной  $2h$  произвольной гауссовой кривизны, площадка  $S$  которой нагревается заданной распределенной температурой. Определение термоупругого состояния заданной оболочки сводится к решению системы уравнений [6, 7]

$$\sum_{j=1}^3 L_{ij} u_j = -X_i \quad (i = \overline{1,3}), \quad (1)$$