

УДК 624.072.014

МІЦНІСТЬ СТЕРЖНЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ПОВТОРНО-ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

*Ценуріт О.В., ст.викладач кафедри вищої та прикладної математики
Миколаївського національного аграрного університету*

Розглянуто методику розрахунку прогинів стержневих елементів моно- и бісталевих конструкцій в області пластичних деформацій при дії різних комбінацій зовнішніх зусиль, зокрема, при дії повторно-змінного навантаження.

There is a description of calculation methods of bar's selection solidness of one- and twosteel elements in the part of sags forming under pressure plastic deformation with different combinations of outward efforts with operation of repeated-variable loading.

Проводився розрахунок міцності бісталевих стержнів різної довжини при навантаженні зосередженою силою при стискувальній або розтягувальній поздовжній силі N для різних величин граничної пластичної деформації $\varepsilon_{ip,lim}$ та різним ступенем асиметрії перерізу A_3 / A_1 - від 0,5 до 1.

Проводився розрахунок бісталевого стержня з прольотом $l = 1200$ см.. Асиметричний переріз прийнято з наступними вихідними даними

$$A_1 = 100 \text{ см}^2, A_2 = 120 \text{ см}^2, A_3 = 50 \text{ см}^2, h = 100 \text{ см}, E = 2100000 \text{ кгГ / см}^2,$$

$$R_w = 2350 \text{ кГ / см}^2, R_f = 4350 \text{ кГ / см}^2.$$

Порівнюючи напружено-деформований стан бісталевого стержня з моносталевим, можна відмітити, що характер епюр згинальних моментів і деформацій є подібним. Відмінність полягає у тому, що для моносталевих перерізів обмежені пластичні деформації виникають у верхній частині стінки та у верхній полці, для бісталевих утворюється ділянка пластичної роботи верхньої частини стінки, причому верхня полка працює пружно.

При розрахунку за деформованою схемою величина прогинів на першому етапі навантаження склала $y_{\max} = 4,54 \text{ см}$, пружна його частина $y = 3,22 \text{ см}$, залишковий прогин набув значення $y_{\text{зал}} = 1,32 \text{ см}$.

На другому етапі навантаження аналогічною комбінацією зусиль прогин у найбільш навантаженому перерізі досяг значення $y_{\max} = 4,58 \text{ см}$, залишковий прогин $y_{\text{зал}} = 1,36 \text{ см}$. На третьому етапі навантаження максимальне значення прогину досягло $y_{\max} = 4,60 \text{ см}$, залишковий прогин склав $y_{\text{зал}} = 1,38 \text{ см}$. На четвертому та наступних етапах навантаження істотного росту прогинів за рахунок використання деформованої схеми не спостерігається, тобто процес накопичення прогинів має затухаючий характер.

Виходячи з вищенаведеного аналізу, видно, що особливістю розрахунку міцності складених перерізів бісталевих балок, на відміну від моносталевих, є те, що при цьому розвиток пластичних деформацій можна враховувати двома способами:

1) пластичні деформації враховуються тільки в стінках балок за рахунок різниці границь текучості матеріалів стінок і полок при збереженні роботи матеріалу полок в пружній стадії, що відповідає нормам граничних величин інтенсивностей пластичних деформацій.

2) розвиток пластичних деформацій дозволяється не тільки в стінках, але і в полках, які виконані при цьому із сталі більш високої міцності в порівнянні із стінкою, що відповідає, згідно рекомендацій.

Другою особливістю використання викладеної методики розрахунку складених перерізів бісталевих стержнів, не зважаючи на аналогічність умов і методики компонування із моносталевими, є те, що вона дозволяє розв'язати проблему вибору марок сталей, або співвідношень розрахункових міцностей матеріалу стінки і полок. Виходячи із доцільності врахування розвитку пластичних деформацій, який забезпечує виконання умови максимально повного використання несучої здатності сталі полок і стінки, та зважаючи на спільність деформацій в місці з'єднання полки із стінкою, гранична величина пружної деформації полки повинна бути меншою або рівною граничного значення повної деформації стінки, тобто до досягнення у верхній і нижній частинах стінки (точки 1 і 4, рис.3.1,є) граничних інтенсивностей пластичних деформацій, полки повинні ввійти в пластичну стадію роботи. Вище приведену умову можна записати в такому виді:

$$\frac{R_f}{E} \leq \frac{R_w}{E} + \varepsilon_{ip, \text{lim}}$$

Ця залежність дає можливість визначити максимально допустиме значення розрахункової міцності полки R_f , при якому можливий перехід в пластичну стадію роботи, при відомому значенні R_w і $\varepsilon_{ip,lim}$. Теоретичні розрахунки показали, що при складному опорі з ростом розрахункового опору R_f сталі полок граничний згинаючий момент M_{lim} , що витримує двотавровий переріз бісталевого стержня, монотонно зростає на всьому проміжку зростання R_f , при цьому значення поздовжньої сили має більший вплив на величину згинаючого моменту в порівнянні із моносталевими.

Для перевірки та удосконалення методики розрахунку міцності стержневих елементів металевих конструкцій при повторно-змінних навантажуваннях у області обмежених пластичних деформацій з урахуванням деформованої схеми виконано експериментальні дослідження дійсної роботи стержнів за межею пружності з метою з'ясування можливості підвищення навантажень, які сприймаються і зниження витрати сталі при використанні методики, яка пропонується.

З урахуванням теореми про пружний характер розвантаження розглянуто характерні випадки залишкового напружено-деформованого стану перерізу при дії різних комбінацій зовнішніх зусиль та наступному розвантаженні.

Для дослідження міцності стержневих елементів використовувалась методика врахування фізичної та геометричної нелінійності та побудова матриць жорсткості моно-і бісталевих стержнів з використанням метода змінних параметрів, а також методи апроксимації при знаходженні аналітичних залежностей, які характеризують величину прогинів відповідно до точки прикладення зосередженої сили. Як відомо, для практичного розрахунку стержнів, які працюють з поздовжньою силою та згинальним моментом, потрібно виконання перевірки міцності та стійкості.

Перша умова перевірялась згідно нерівності

$$\frac{N}{A} \pm \frac{M v}{C_N I} \leq R_y \gamma_c,$$

де C_N - коефіцієнт врахування обмеженого розвитку пластичних деформацій,

γ_c - коефіцієнт умов роботи стержня,

$$v = \frac{M_{dlim}}{M_{max}}, \text{ де}$$

M_{dlim} - максимальне значення моменту, знайдене за деформованою схемою, M_{max} - максимальне значення моменту, знайдене без урахування деформованої схеми.

Для виконання ітераційним методом розрахунку значень прогинів у стержні при дії заданої поздовжньої сили N та граничного згинального моменту M_{lim} за вихідні дані взято:

- довжину стержня l та число $m = 2n$ розбиття вісі стержня на відрізки,
- висоту стінки стержня h ,

- площини стінки A_2 , більшої (верхньої) полки A_1 і меншої (нижньої) полки A_3 ,
- розрахунковий опір матеріалу стінки і полок,
- схему навантаження з визначенням величини навантаження N і F ,
- величину обмеженої пластичної деформації $\varepsilon_{ip,lim}$.

Для побудови вихідної епюри згинальних моментів з пружно-пластичного розрахунку перерізу стержня при заданій поздовжній силі N визначається максимальний згинальний момент M_{lim} у найбільш навантаженому перерізі стержня, у якому величина пластичних деформацій набуває значення $\varepsilon_{ip,lim}$. На першому кроці епюра згинальних моментів за деформованою схемою M_d приймається рівною граничній епюрі моментів M , яку одержано за недеформованою схемою за умовою, що $M_{max} = M_{lim}$, та виконуються наступні дії. Визначаються перерізи, у яких величина згинального моменту перевищує значення найбільшого моменту M_s , який відповідає пружній роботі матеріалу за умовою $M_s < M_{di} < M_{lim}$, де i - номер перерізу стержня. За одержаними епюрами нормальних напружень у кожному з перерізів знаходяться повні кривини $\chi_i = (\varepsilon_{Bi} - \varepsilon_{Hi})$, де ε_{Bi} і ε_{Hi} - крайові відносні здовження відповідно у верхній та у нижній частинах перерізу, які беруться зі своїми знаками. При роботі матеріалу стержня у межах пружності, тобто при $M_{di} \leq M_s$, повна кривизна у перерізі $\chi_i = M_{di} / (EI)$. За формулою Мора обчислюються величини прогинів $y_i = \int_0^l \overline{M}_i \chi dl$, $i = 1, 2, \dots, m-1$, де \overline{M}_i - згинаючий момент від одиничного навантаження, яке прикладене у i -му перерізі стержня у напрямку прогину, причому ці інтеграли можуть бути обчисленими за відомими наближеними методами, наприклад за формулою Симпсона, яка з урахуванням того, що $\overline{M}_{i,0} = \overline{M}_{i,m} = 0$ надає наступні вирази для обчислення повних прогинів

$$y_i = \frac{2\Delta l}{3} \left(\sum_{k=1}^{n-1} \overline{M}_{i,2k} \chi_{2k} + 2 \sum_{k=1}^n \overline{M}_{i,2k} \chi_{2k-1} \right),$$

$$\text{Де } \Delta l = l/m \quad (m = 2n), \quad i = 1, 2, \dots, m-1, \quad y_0 = y_m = 0$$

За приведеним алгоритмом було виконано розрахунки для випадків прикладення зосередженої сили з переміщенням вздовж стержня та поздовжньої сили

$$N = 0; \pm 0,1; \pm 0,2; \dots; \pm 0,9 N_{lim},$$

$$N_{lim} = (A_1 + A_2 + A_3) R_w,$$

та одержано значення прогинів у i у кожній точці розбиття стержня за умовою досягнення у найбільш навантаженому перерізі граничної пластичної деформації $\varepsilon_{ip,lim}$.

При використанні різних форм кривих, рівняння яких було одержано із застосуванням метода найменших квадратів та інших чисельних методів, було

виявлено, що найбільш точну математичну модель стержня надає крива, яка має аналітичне відображення у виді

$$y = \begin{cases} y_{\max} \sin \frac{\pi x}{2x_m}, & \text{при } x \leq x_m \\ y_{\max} \sin \frac{\pi(l-x)}{2(l-x_m)}, & \text{при } x \geq x_m \end{cases},$$

де y_{\max} - максимальне значення прогину у стержні,

x_m - відстань від лівого кінця стержня до точки, у якій досягнуто найбільший прогин. Встановлено, що значення $k_m = \frac{x_m}{l}$ не залежить від довжини стержня та набуває значення відповідно точці $k_p = \frac{x_p}{l}$ прикладення зосередженої сили. Для визначення відповідної аналітичної залежності $k_m = f(k_p)$ проводилось умовне розбиття стержня з кроком, рівним 0,05 довжини стержня та розрахунок прогинів у перерізах, викликаних прикладенням зосередженої сили у цих точках у сполученні з поздовжньою силою $N = 0; \pm 0,1; \pm 0,2; \dots; \pm 0,9 N_{\text{lim}}$. Одержані чисельні значення з'явилися вихідним матеріалом для знаходження рівняння вказаної функціональної залежності.

Для визначення величини максимального прогину, наданої у рівнянні, застосовувались відомі залежності для визначення максимальних прогинів при пружній роботі елементів конструкцій.

При цьому використовувався корегуючий коефіцієнт, для визначення якого було проведено аналіз характеру зміни величини відношення

$$\mu_i = \frac{y_{pi}}{y_{di}}$$

де y_{pi} - прогин у i -му перерізі, який обчислено при умові пружно-пластичної роботи матеріалу при прикладенні зовнішніх зусиль за вказаною схемою, y_{di} - прогин у i -му перерізі, який обчислено за умовою необмежено пружної роботи матеріалу.

Основна відмінність розрахунку міцності бісталевих стержнів від моносталевих полягає у визначенні напружено-деформованого стану перерізів:

- для бісталевих стержнів можливі п'ять випадків напружено - деформованого стану перерізів, для моносталевих - три;
- розвиток граничної пластичної деформації для бісталевих стержнів досягається у верхній та нижній частинах стінки, для моносталевих - у нижній або верхній полці;
- при обчисленні значень прогинів у бісталевому стержні враховуються початкові напруження σ_H^0 і σ_B^0 .

ЛІТЕРАТУРА

1. Бурковский И.Д., Веремеенко Н.А., Лутченко С.А., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Методика расчета прочности стальных стержней с учетом

деформированной схемы // Информационный листок о научно техническом достижении №87 - 1256. - М.: ВИМИ, 1987.

2. Чернов Н.Л., Шебанин В.С, Бурковский И.Д. Расчет бистальных элементов стержневых конструкций при учете ограниченных пластических деформаций и деформированной схемы // Строительная механика корабля.

Сб. научных трудов / Николаевский кораблестроительный институт. - Николаев, 1987. -С. 91-98.

3. Рекомендации по расчету стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций. - 2-е изд. -М.: ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова, 1985. - 48 с.

4. СНИП П-23-81*. Строительные конструкции. Нормы проектирования. - М.: Стройиздат, 1982. - 93 с.

5. СНиП П-А. 10-71. Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования. -М.: Стройиздат, 1975. -С. 4-9.