

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Запропоновано методику чисельного дослідження несучої здатності сталезалізобетонних позацентрово стиснутих елементів. Наведено результати апробації для стійки з обетонованого сталевого двотавра.

Ключові слова: сталезалізобетонні стійки, позацентровий стиск, несуча здатність, крива рівноважних станів, безрозмірні параметри.

Вступ. Перспективним напрямом розвитку сталезалізобетону є використання сталевих двотаврів з порожнинами, заповненими бетоном. Подібні конструкції дозволяють значно зменшити металоємність, вартість і трудомісткість будівництва за рахунок таких переваг сталезалізобетону, як спрощення технології виготовлення, відсутність тимчасової опалубки та закладних деталей, спрощення ремонту й підсилення конструкцій, підвищена вогнестійкість та опір агресивності середовища. Наявність обойми в сталезалізобетонних колонах обумовлює збільшення міцності бетону; у свою чергу бетон гарантує підвищення місцевої стійкості сталевій оболонки без додаткових конструктивних заходів. Бетон і сталь при такому сполученні дають найбільш сприятливі умови для сумісної роботи. Ці конструкції добре себе зарекомендували в практиці зарубіжного й вітчизняного проектування, отримали значне розповсюдження та вважаються досить перспективними для нового будівництва, а також при виконанні підсилення існуючих будівель.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. У європейських та вітчизняних нормах проектування [1] наведено загальні основи розрахунку сталезалізобетонних конструкцій. З іншого боку, при застосуванні в конструкціях будівель стиснутих гнучких сталезалізобетонних елементів несиметричного перерізу зі складною схемою навантаження виникає ряд питань при розрахунках на стійкість. На сьогоднішній день до кінця не вивчено вплив бетону на поведінку стиснутих гнучких елементів довільного перерізу при несиметричному навантаженні. Розрахунок таких елементів рекомендується виконувати з використанням редуційованих (приведених) параметрів перерізу [3], або ж задача зводиться до простих випадків завантаження елементів й урахування дійсної роботи конструкцій [4, 5].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Отже, дійсна робота гнучких сталезалізобетонних стиснутих елементів при несиметричному навантаженні малодосліджена і потребує подальшого вивчення.

Постановка завдання. Завдання полягає в розробленні чисельного методу дослідження дійсної роботи та визначенні несучої здатності сталеве-тонних колон двотаврового перерізу з порожнинами, заповненими бетоном.

Основний матеріал і результати. Розрахунок за стійкістю та проектування сталезалізобетонних колон двотаврового перерізу з порожнинами, заповненими бетоном, є теоретично складним завданням. Основні проблеми такі:

- робота стиснутих елементів можлива в умовах розвитку пружно-пластичних деформацій, що пов'язано з фізичною нелінійністю матеріалу;
- замкнуте аналітичне рішення для таких елементів можна отримати лише для обмеженого класу задач із симетричним навантаженням;
- при несиметричному навантаженні епюра початкових моментів не враховує дійсну форму деформування осі елементів, що важливо для стиснутих стержнів із довільним навантаженням.

У зв'язку із цим для теоретичного дослідження роботи подібних елементів необхідно використовувати чисельні методи, які дозволяють урахувати дійсну форму згину осі елемента, фізичну нелінійність матеріалів, різні умови спирання кінців стержня та схеми завантаження.

Особливістю методу, що пропонується для розв'язку задачі, є використання дискретних розрахункових моделей для окремих елементів, перерізів, а також для дійсних діаграм роботи матеріалів та інших вихідних даних.

Розрахункова схема стиснутого стержня наведена на рисунку 1, а; розрахункова несуча здатність прийнята такою, що дорівнює максимальному значенню стискаючої сили, котра може бути сприйнята стержнем (див. рис. 1, б).

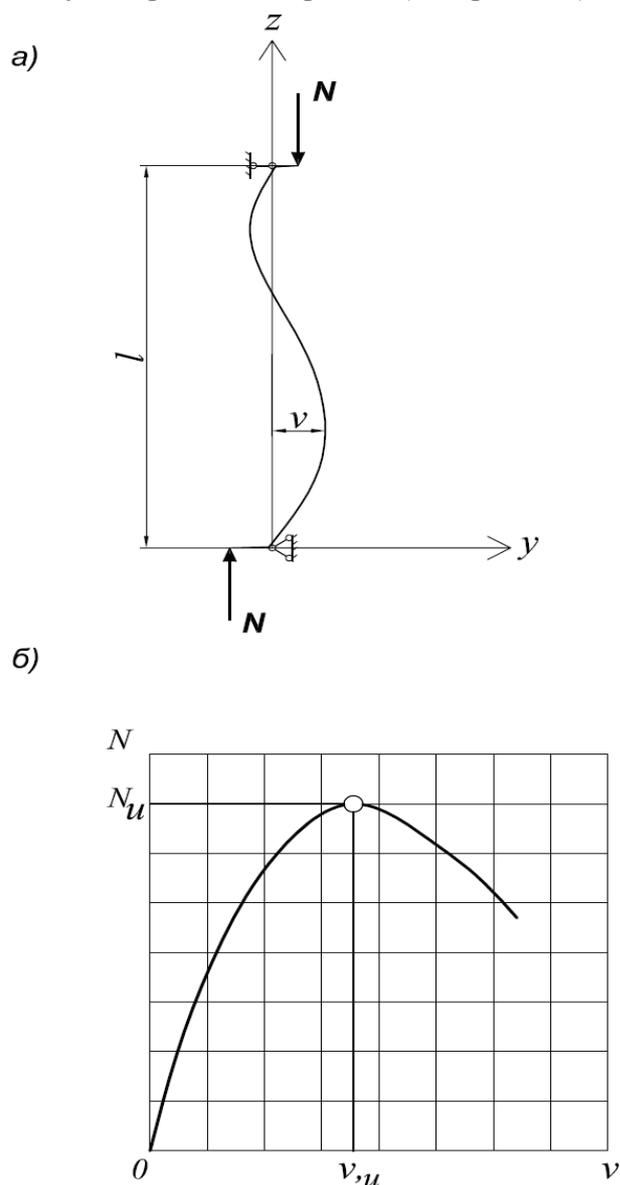


Рисунок 1 – Розрахунок стиснутого стержня при несиметричному навантаженні: а – схема стержня; б – крива стану рівноваги

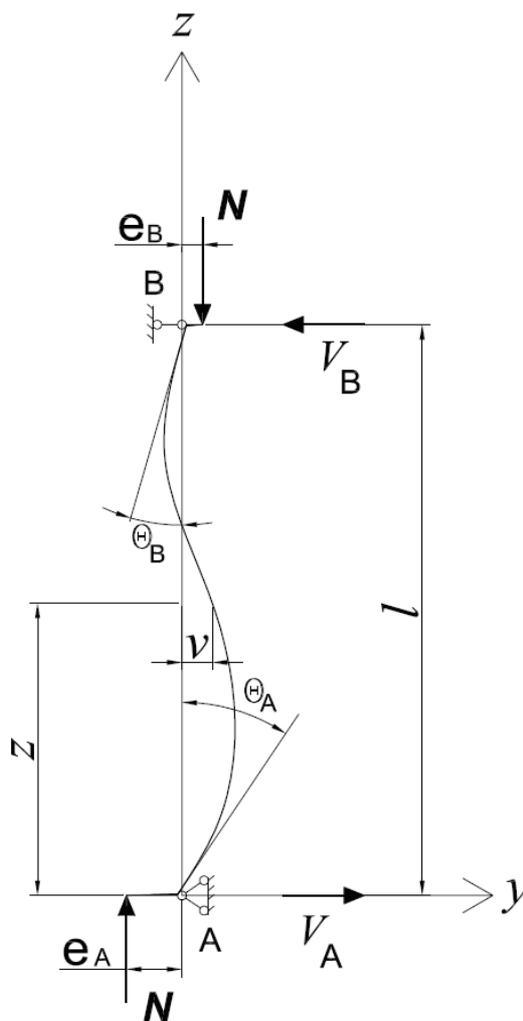


Рисунок 2 – Розрахункова схема стержня

При розв'язанні задачі розглядається плоска форма деформування елемента, а також використовуються загальновідомі гіпотези та припущення, а саме: малі переміщення, гіпотеза плоских перерізів, пружно-пластична робота сталі, забезпечення сумісної роботи сталі й

бетону, дійсна форма деформованої осі стержня. При цьому передбачається, що діаграми роботи (деформування) $\sigma=f(\varepsilon)$ для сталі та бетону відомі й задані табличними законами.

Задачу рівноваги стиснутого стержня з довільними граничними умовами, який працює в пружно-пластичній стадії, можна описати нелінійним диференціальним рівнянням

$$EI(z) \cdot y''(z) + F \cdot y(z) = -M(z), \quad (1)$$

де $ei(z)$ – згинальна жорсткість з урахуванням текучості в перерізі z ; n – поздовжня сила; $m(z)$ – балковий згинальний момент у перерізі.

Чисельне інтегрування такого рівняння виконується методом рунге – кутта в комбінації з методом стрільби.

Для цього стержень умовно розбивається по довжині на довільну кількість ділянок. На кінцях кожної ділянки (у вузлових точках) з використанням основних залежностей метода рунге – кутта послідовно вираховуються прогин та кут повороту перерізу:

$$\begin{aligned} v_n &\approx v_{n-1} + \delta \cdot \theta_{n-1} + \frac{\delta}{2} \cdot \rho_{n-1}^*; \\ \theta_n &\approx \theta_{n-1} + \delta \cdot \rho_{n-1}^*, \end{aligned} \quad (2)$$

де v_n , θ_n – відповідно прогин та кут повороту перерізу в точці n ; v_{n-1} , θ_{n-1} – ті ж величини в точці $n-1$ (їх значення вже відомі з розрахунків на попередній ділянці); δ – довжина ділянки; ρ_{n-1}^* – кривизна осі стержня для середини ділянки між точками n та $n-1$.

Значення початкових параметрів (v_n , θ_n , m_a , v_a) для першої вузлової точки на опорі а попередньо знаходиться з лінійного рішення диференціального рівняння у формі методу початкових параметрів або приймається з попереднього ступеню навантаження. Таким чином, для заданого навантаження можна отримати форму вигину осі стержня, котра буде відповідати заданим початковим параметрам. Далі шляхом послідовного корегування значень початкових параметрів на одному кінці стержня за допомогою ітерацій досягається виконання граничних умов на іншому його кінці. У цьому й полягає основна ідея методу стрільби.

Значення кривизни у виразі (2) визначається з умов рівноваги зовнішніх і внутрішніх сил у перерізі стержня при розвитку пружно-пластичних деформацій з урахуванням сумісної роботи сталі та бетону. Задача розв'язується з використанням загальних прийомів урахування фізичної нелінійності. При цьому розглядаються дискретні розрахункові моделі для перерізів, діаграм роботи матеріалів й інших експериментальних даних з урахуванням вищенаведених гіпотез та допущень.

На основі описаної методики для кожного кроку зміни параметра зовнішнього навантаження визначається стан рівноваги стержня. При цьому його деформація обчислюється як функція зовнішнього навантаження, приріст якого зменшується з наближенням до граничної точки m_i (див. рис. 1, б). Це дозволяє визначати несучу здатність стержня з необхідною точністю.

З метою забезпечення систематизації й узагальнення результатів проведених досліджень були запропоновані підходи, що базуються на основних положеннях теорії розмірностей та подібності [2]. Безрозмірна форма запису забезпечує високу ефективність розрахунків та дозволяє використовувати їх результати для безлічі конкретних випадків, котрі характеризуються коефіцієнтами й параметрами подібності.

Такий підхід дає можливість використовувати чисельні методи розв'язання диференціальних та інтегральних рівнянь у дискретному вигляді. Кількість елементарних

ділянок n у дискретно представленому перерізі, яка забезпечує необхідну точність рішення, встановлюється шляхом порівняльних розрахунків і зазвичай складає 20 ... 50.

Для прикладу наведемо форму запису умови рівноваги зовнішніх та внутрішніх силових факторів у довільному перерізі позацентрово стиснутого стержня

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \frac{N}{A \cdot \sigma_y} = \int_A \bar{\sigma} \cdot d\bar{A} = \sum_1^n \sigma_i \cdot \Delta \bar{A}_i; \\ \bar{M} &= \frac{M}{A \cdot h \cdot \sigma_y} = \int_A \bar{\sigma} \cdot y_0 \cdot d\bar{A} = \sum_1^n \sigma_i \cdot y_{0i} \cdot \Delta \bar{A}_i,\end{aligned}\quad (3)$$

де n – кількість елементарних ділянок у перерізі.

Для чисельного розв'язання системи рівнянь використовується ітераційний метод. Початкові параметри деформацій приймаються безрозмірними за результатами розрахунку в пружній стадії роботи матеріалів

$$\bar{\varepsilon}_0 = \bar{N}; \quad \bar{\rho} = \bar{M} \cdot \frac{\bar{A}}{J}, \quad (4)$$

де $\bar{\varepsilon}_0$, $\bar{\rho}$ – відповідно деформації на лінії центра ваги й кривизна осі стержня.

Діаграми роботи матеріалів приймаються в табличній формі також в узагальнених параметрах. Наприклад, для сталі характеристики можна записати у такому вигляді:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \frac{E}{\sigma_y}; \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_y}. \quad (5)$$

Застосування безрозмірних параметрів дозволяє зберігати загальний підхід та єдині принципи побудови алгоритмів для простих і більш складних випадків розрахунку стиснутих елементів за межею пружності, а також значно спрощує впровадження результатів досліджень у рекомендації й норми проектування.

За запропонованою методикою та алгоритмами було розроблено програму в середовищі visual basic.net.

Для дослідження сталезалізобетонних елементів вищенаведена методика була доповнена алгоритмами, які враховують сумісну роботу сталі й бетону в перерізі. Так, у рамках використання дискретних розрахункових моделей і безрозмірних параметрів представлення даних в алгоритм було введено додатковий параметр – приведена площа бетону

$$\alpha_{\beta em} = \frac{A_{\beta em}}{th} = \frac{(B-t)h}{th} = \frac{B}{t} - 1. \quad (6)$$

Тоді дискретна модель перерізу має вигляд, як на рисунку 3.

Виходячи з рівності деформацій бетону та сталі, для кожної точки дискретного перерізу визначаються дотичні (миттєві) модулі пружності сталі e_{cm} і бетону $e_{\beta em}$ та обчислюються зусилля, котрі сприймаються сталеву частиною перерізу:

$$N_{cm} = N \cdot \frac{\left| \frac{(EA)_{cm}}{(EA)_{\beta em}} \right|}{1 + \left| \frac{(EA)_{cm}}{(EA)_{\beta em}} \right|}; \quad M_{cm} = M \cdot \frac{\left| \frac{(EI)_{cm}}{(EI)_{\beta em}} \right|}{1 + \left| \frac{(EI)_{cm}}{(EI)_{\beta em}} \right|}, \quad (7)$$

де $M = M_{ст} + M_{бет}$, $N = N_{ст} + N_{бет}$ – значення зовнішніх зусиль для розрахункового перерізу.

Подальші розрахунки виконуються вже для розвантаженої бетоном сталевій частині перерізу.

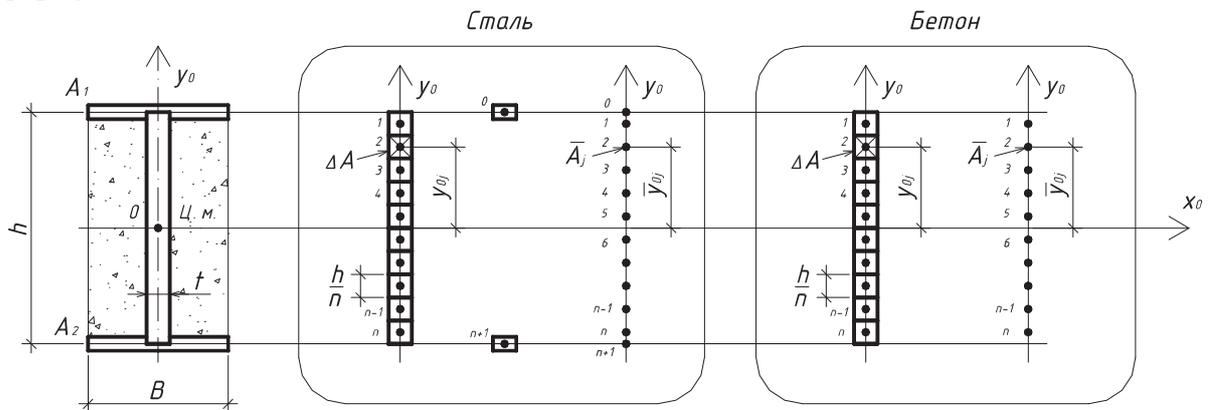


Рисунок 3 – Дискретна модель сталезалізобетонного перерізу

На рисунку 4 наведені результати чисельного розрахунку у вигляді кривих критичних напружень для сталевого й обетонованого двотаврів №30Ш1 при значенні відносного ексцентриситету $m = 0,5$.

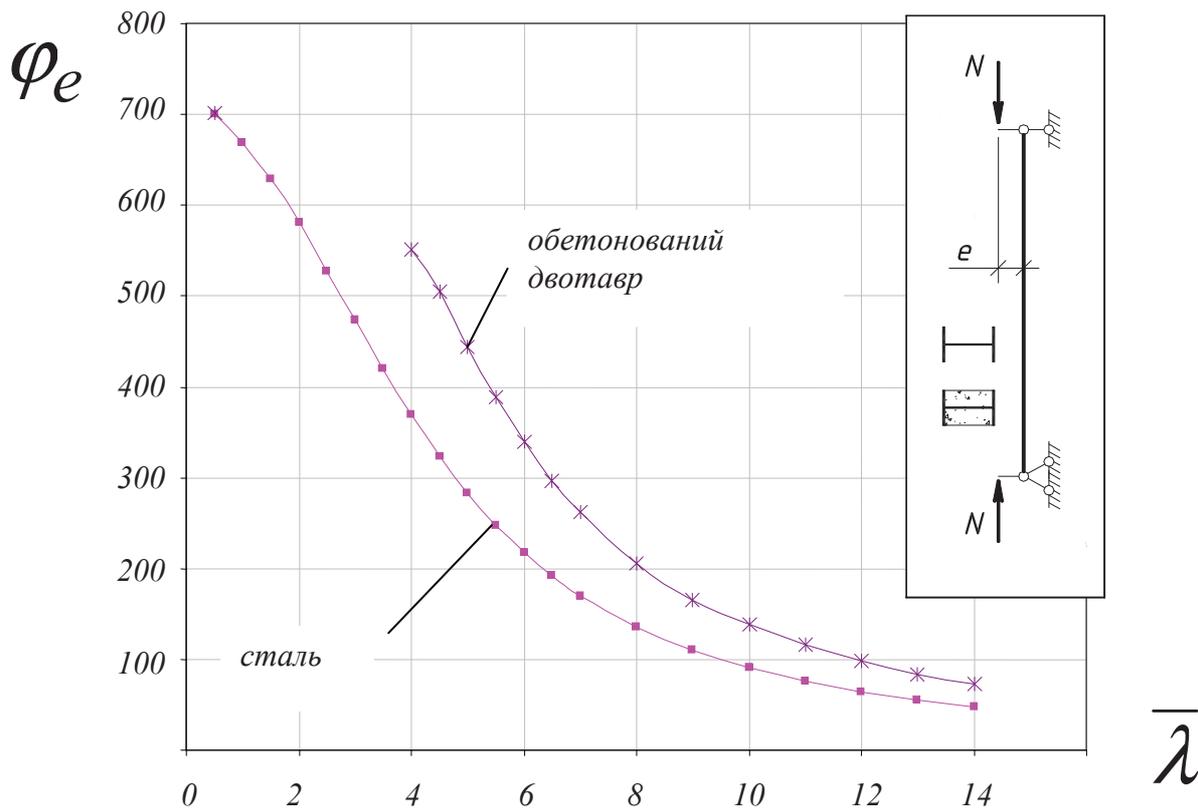


Рисунок 4 – Криві критичних напружень Для сталевого й обетонованого двотаврів №30ш1 ($m=0,5$; бетон в20; значення ϕ_e збільшені в 1000 разів)

Висновки. Запропонований чисельний метод дозволяє визначати несучу здатність та характер роботи стиснутих сталезалізобетонних елементів з урахуванням дійсних умов роботи конструкцій. Результати дослідження можуть бути наведені у вигляді таблиць ϕ_e для стиснутих двотаврів з порожнинами, заповненими бетоном.

Література

1. ДБН В.2.6-160:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення / Видання офіційне. – Чинні з 01.09.2011. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 55 С.
2. Бельский Г. Е. Основы унификации расчетов металлических конструкций за пределом упругости / Г. Е. Бельский // Строительная механика и расчет сооружений. – 1985. – № 3. – С. 12 – 15.
3. Стороженко Л.І. Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці: монографія / Л.І. Стороженко, О.І. Лапенко. // – Полтава: АСМІ, 2008. – 312С.
4. Myoung-Ho Oh. Structural Performance of Steel-Concrete Composite Column Subject to Axial and Flexural Loading / Myoung-Ho Oh, Young-Kyu Ju, Myoung-Han Kim, Sang-Dae Kim. // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. May, 2006. – P.160.
5. Dario, J. Aristizabal-Ochoa. Static Stability of Beam-Columns under Combined Conservative and Non-conservative End Forces, Effects of Semirigid Connections / J. Dario // Journal of Engineering, 2005. – P. 473 – 483.
6. Трусов Г.М. Стійкість сталебетонних стійок при несиметричному навантаженні / Г.М. Трусов, І.В. Атаманенко. // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського, К., 2010. – Вип. 5. – С. 230 – 236.
7. Трусов Г.Н. Численное исследование несущей способности стоек рам переменного по длине сечения / Г.Н. Трусов, В.П. Рубан // Новые идеи нового века – 2013: материалы Тринадцатой международной научной конференции. Том 2. – Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск, 2013 – С. 457 – 462.

Г.Н. Трусов, к.т.н., доцент

В.П. Рубан, аспірант

І.В. Атаманенко, інженер

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Предложена методика численного исследования несущей способности сталежелезобетонных внецентренно сжатых элементов. Приведены результаты апробации для стойки из обетонированного стального двутавра.

Ключевые слова: сталежелезобетонные стойки, внецентренное сжатие, несущая способность, кривая равновесных состояний, безразмерные параметры.

G. Trusov, Ph.D., Associate professor

V. Ruban, postgraduate student

I. Atamanenko, eng.

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

STUDY OF STABILITY OF COMPOSITE STEEL AND CONCRETE COMPRESSED COMPOSITE ELEMENTS

There is suggested the method of numerical research of critical flexural buckling load of composite steel and concrete member for variable cross-section. There are shown results of approbation for steel elements with constant cross-section and preliminary results of researches for composite steel and concrete elements.

Keywords: composite steel and concrete member, flexural buckling, critical load, buckling resistance of columns, numerical methods

Надійшла до редакції 07.10.2014

© Г. М. Трусов, В.П. Рубан, І.В. Атаманенко