

**УДК 624.074.5**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАНЬ СТІЙКОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
СТРИЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ УСТОЙЧИВОСТИ  
СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**INVESTIGATION OF STABILITY OF COMPOSITE STEEL AND  
REINFORCED CONCRETE ROD STRUCTURE**

**Стороженко Л.І. д.т.н., проф., Лапенко О.І. д.т.н., Мурза С.О. к.т.н.,  
Школяр Ф.С. асп.** (Національний авіаційний університет, м.Київ  
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м.  
Полтава)

**Стороженко Л.И. д.т.н., проф., Лапенко О.И. д.т.н., Мурза С.А.,  
Школяр Ф.С. асп.** (Национальный авиационный университет, г. Киев,  
Полтавский национальный технический университет имени Юрия  
Кондратюка, г. Полтава)

**L.I. Storozhenko, Dr. The. Sc., Prof., O.I. Lapenko Dr. The. Sc., S.A. Murza  
Ph.D., F.S. Shkolyar PhD student** (National Aviation University, Kyiv, Poltava  
National Technical University named after Yuri Kondratyuk, Poltava)

**У статті наведено результати дослідження аналізу стійкості  
сталезалізобетонної конструкцій, виділені переваги і недоліки існуючих  
на сьогоднішній момент методик розрахунку втрати стійкості.**

**В статті приведені результати дослідження аналізу устійкості  
сталезалізобетонних конструкцій, виділені переваги і недоліки існуючих  
на сьогоднішній момент методик розрахунку втрати устійкості.**

**The article presents the results of a study analyzing the stability of composite  
steel and reinforced concrete structure. Advantages and disadvantages of  
existing methods for calculating the moment of stability loss are highlighted.**

**Ключові слова:**

**Стійкість, сталезалізобетонні стрижневі конструкції.**

**Устойчивость, сталезалізобетонные стержневые конструкции.**

**Stability, composite steel and reinforced concrete rod structure.**

**Постановка проблеми.** Сталезалізобетонні конструкції отримали широке розповсюдження в усьому світі. Уже доведено, що їх раціонально застосовувати для перекриття великих прольотів (плити, балки, ригелі, ферми і т.д.), стійок, які сприймають великі навантаження (колони промислових та цивільних будівель, стояки різного призначення, опори ЛЕП і т.д.), в інженерних спорудах. Поперечні перерізи таких конструкцій можуть бути найрізноманітніші. При використанні сталезалізобетонних конструкцій зменшується маса будівель, дуже часто можна обійтися без опалубки, закладних деталей.

Сталезалізобетонні конструкції мають багато переваг, але, на нашу думку, основна з них – це можливість виробляти та будувати залізобетонні конструкції без використання опалубки, тому що її функції може успішно виконувати арматура зі сталевих профілів [4]. Значення розрахунку на стійкість для вказаних конструкцій в загальному циклі розрахунків на міцність та жорсткість істотно зросло, оскільки руйнування сталезалізобетонних конструкцій найчастіше пов'язане з втратою загальної стійкості або їх окремих конструктивних елементів в наслідок місцевої втрати стійкості.

**Аналіз останніх досліджень.** При проектуванні сталезалізобетонних конструкцій ставиться завдання позбутися недоліків сталевих і залізобетонних конструкцій. однією з основних конструктивних задач є така, щоб в сталезалізобетонній конструкції бетон працював на стиск, а сталь – на розтяг. Як показує досвід проектування сталезалізобетонних конструкцій, у багатьох випадках цю вимогу вдається задовольнити. І дійсно, незважаючи на прогрес у розвитку, залізобетонні конструкції завжди будуть залишатися важкими, а сталеві конструкції відрізнятимуться підвищеною металоємністю. Багато видів сталезалізобетонних конструкцій можна виготовляти без опалубки, тому що її роль виконує профільна чи листовая арматура.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Арматура у вигляді сталевих листів та прокатних профілів дозволяє ефективно використовувати сталезалізобетонні конструкції з великим відсотком армування при обмежених розмірах перерізу. Ці конструкції мають суттєві переваги при проектуванні та будівництві різних будівель і споруд [2]. Недостатньо дослідженою є проблема втрати місцевої стійкості сталевих листів або прокатного профілю, що входить до конструкції. В деяких випадках розміри перерізу сталезалізобетонного елемента є такими, що при навантаженні елемент може втратити не тільки місцеву, але й загальну стійкість.

**Мета даної статі.** На основі проведеного аналізу існуючих типів сталезалізобетонних стрижневих конструкцій, оцінити й провести аналіз питань їх стійкості.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Норми розрахунку стрижневих конструкцій на стійкість завжди

базувались на експериментах, у яких, у переважній більшості, випробуванню піддавалися стрижні, закріплені за шарнірною схемою обпирання. Поширення теорії на складніші випадки закріплення стрижнів здійснювалося по теорії так названого "еквівалентного" стрижня. Тобто, кожному конкретному стрижню ставився у відповідність шарнірно обпертий стрижень того ж перерізу, довжина якого визначалась таким чином, щоб обидва стрижні втрачали стійкість при тому самому значенні зусилля. Фактично, незважаючи на прийняту природність такої аналогії, варто відзначити, що в даному підході до рішення проблеми стійкості стрижневих конструкцій є достатнє теоретичне обґрунтування.

Відповідно до сформованого в цей час поняття про природу втрати стійкості стрижневих систем в цілому, так і окремих конструкцій зокрема, є те, що стрижневі елементи конструкцій втрачають стійкість при поздовжніх зусиллях менших, чим це припускає теорія Ейлера, є наявність малих початкових випадкових викривлень та ексцентриситетів при закріпленні стрижнів. Тому, навіть якщо стрижень центрально стиснутий, у ньому виникають згинальні моменти й, якщо фіброві напруження в якийсь момент перевищують границю текучості матеріалу, процес втрати стійкості починає розвиватися з катастрофічною швидкістю.

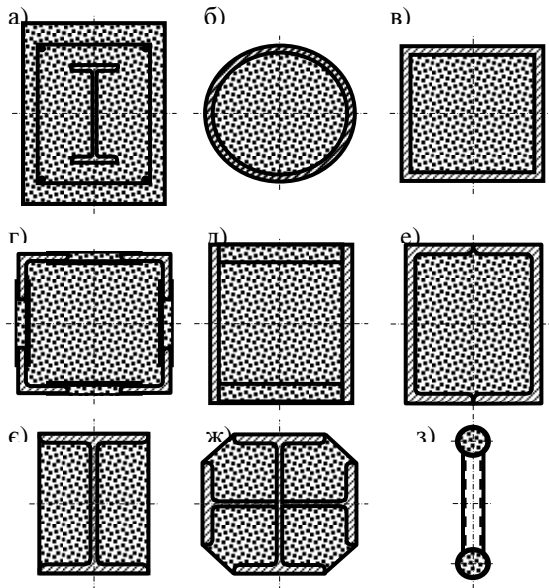


Рисунок 1.5 – Поперечний переріз сталезалізобетонних стрижневих конструкцій: а) із внутрішнім жорстким армуванням; б), в) трубобетонні з круглих і квадратних труб; г), д) із кутниками й листами вповдовж граней; е), е), ж) у вигляді сталевих профілів із заповненими бетоном міжпоясними порожнинами; з) складені зі сталезалізобетонних гілок

Питання стійкості сталезалізобетонних конструкцій є ще більш складною задачею, оскільки до складу таких конструкцій, окрім бетону, входять і листові арматури і прокатні профілі. Таким чином задача вирішення стійкості сталезалізобетонних конструкцій є неоднозначною. В ряді випадків такі конструкції можуть втрачати місцеву стійкість, яка в свою чергу призводить до втрати загальної стійкості.

Найбільш розповсюдженими серед сталезалізобетонних конструкцій є трубобетонні конструкції. При розрахунках таких конструкцій на стиск важливим питанням є врахування стійкості стрижневих елементів конструкцій. При розрахунку трубобетонних елементів на осевий стиск ексцентриситет, який урахується, не повинен перевищувати величини випадкового ексцентриситету поздовжнього зусилля, визначеного відповідно до вказівок нормативних документів. При цьому гнучкість елемента повинна бути  $l_0/i_{red} \leq 14$  або  $l_0/i_{red} \leq 5$ , де  $l_0$  – розрахункова довжина елемента;  $i_{red}$  – приведений радіус інерції перерізу трубобетонного елемента.

Розрахунок перерізів позацентрово стиснених трубобетонних елементів при  $l_0/i_{red} \leq 5$  рекомендується робити з умови:

$$N_{shl} \leq \frac{d_t}{d_i + 4e_0} (R_b^* A_b + \gamma_{s2} R_s A_s) \quad (1)$$

де  $e_0$  – ексцентриситет поздовжнього зусилля щодо центра ваги приведенного перерізу, визначений як сума ексцентриситетів – отриманого зі статичного розрахунку і випадкового;

$d_i$  – внутрішній діаметр труби (діаметр бетонного ядра).

При гнучкості позацентрово стиснених трубобетонних елементів  $l_0/i_{red} > 5$  необхідно враховувати вплив на їх несучу здатність прогинів у площині ексцентриситету поздовжнього зусилля, що є функцією приведеної гнучкості  $\lambda_{red}$  та приведенного ексцентриситету  $e_{red}$ .

Розрахунок гнучких позацентрово стиснених елементів повинен виконуватися з урахуванням сумісної роботи бетону і труби з умови

$$N \leq \varphi N_{red} \quad (2)$$

де  $N_{red}$  – найбільша несуча здатність трубобетонного елемента при осьовому стиску, визначена з умови (3.15) при  $\lambda_{bs} = 1,0$ ;

$\varphi$  – коефіцієнт поздовжнього вигину при позацентровому стисненні, визначений залежно від коефіцієнтів приведеної гнучкості  $\lambda_{red}$  за формулою (3) і приведенного ексцентриситету  $e_{red}$  за формулою (4).

Коефіцієнт приведеної гнучкості  $\lambda_{red}$  визначається з формули:

$$\lambda_{red} = \frac{2l_0}{d_i \cdot \sqrt{0,5 - \frac{0,25}{1 + \mu_{pl}} \frac{\psi}{\chi}}}, \quad (3)$$

величина відносного ексцентриситету визначається за формулою:

$$e_{red} = \frac{2e_0}{d_i \cdot \left( 0,5 - \frac{0,25}{1 + \mu_{pb}} \frac{\psi}{\chi} \right)}, \quad (4)$$

де  $l_0$  – розрахункова довжина елемента;

$\psi; \chi$  – коефіцієнти, що враховують співвідношення механічних властивостей бетону і сталі в граничному стані.

У сталезалізобетонних конструкціях з листовим армуванням сталеві листи можуть втратити стійкість раніше, ніж відбувається втрата стійкості конструкції в цілому. Втрата стійкості одним із елементів перерізу конструкції (місцева втрата стійкості) та вихід його з роботи різко послаблюють конструкцію, часто роблячи недеформовану частину перерізу несиметричною, оскільки центр згину при цьому зміщується, балка починає закручуватись та швидко втрачає стійкість.

Для того, щоб одержати більш надійний висновок із погляду стійкості стінки, повинна бути розглянута теорія стійкості (випучування) тонкої пластинки, що завантажена нормальними напруженнями в її площині. Для того щоб отримати раціональну основу для проектування, необхідно провести вивчення пружної стійкості тонких стінок.

При вирішенні задач місцевої стійкості вважають, що окремі елементи, з яких складається переріз балки, працюють, як пластинки, що з'єднані між собою шарнірно, пружно або жорстко [2, 3].

Критичну силу втрати стійкості пластини за методикою Б.М. Броуде знаходять використовуючи метод інтегрування диференціального рівняння рівноваги пластинки, що має вигляд:

$$D \left( \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) + \sigma t \left( 1 - \alpha \frac{y}{b} \right) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + p(x, y) t \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - 2\tau t \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = 0, \quad (5)$$

де  $p(x, y)$  вказує на те, що місцеві напруження є функцією обох координат.

Також критичну силу можливо обчислювати за допомогою відшукування максимуму потенціальної енергії за допомогою наближеного виду викривленої поверхні (метод Ритца-Тимошенко).

Паралельно з теоретичними, на даний момент, є методи розрахунково-теоретичного аналізу міцності й стійкості будівельних конструкцій є метод кінцевих елементів (МКЕ). Більшість сучасних програм, що використовують

МКЕ, вирішують завдання стійкості в припущенні про лінійно-пружну роботу матеріалу системи, у той час як у реальних конструкціях у критичному стані по тим або інших причинах, як правило, виникають фізично-нелінійні процеси [1]. Тому такий підхід у багатьох випадках може привести до істотних помилок. При цьому критичне навантаження завищується, що приводить до неправильної оцінки надійності конструкції. Рішення фізично нелінійних завдань із урахуванням геометричної нелінійності за допомогою спеціальних алгоритмів дозволяє одержати результат, що досить адекватно відображає процес втрати стійкості. Однак такий підхід є досить емним за машинним часом й у ряді випадків приводить до погано обумовлених систем.

У роботі [2] на основі використання концепції Шенли, був запропонований алгоритм коректування модулів (АКМ), що дозволяє звести завдання стійкості фізично нелінійної конструкції до послідовного рішення завдань лінійної стійкості з коректуванням на кожному кроці модулів пружності. Цей алгоритм добре описує стійкість конструкцій зі стислих стрижнів, але не враховує впливи згинальних моментів (або ексцентриситетів прикладеного навантаження), що приводить до зниження значень критичних параметрів навантаження. В [5] запропоновано для рішення завдань стійкості стрижневих сталевих конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності використати підхід, заснований на чисельному інтегруванні диференціальних рівнянь нелінійного деформування стрижнів і пошуку максимальних значень параметрів навантаження, при яких конструкція перебуває в стані рівноваги (стан з "нульовим відпором"). При такому підході можна врахувати як вплив всіх внутрішніх силових факторів, так і різних недосконалостей. У дійсній роботі алгоритм коректування модулів узагальнений для використання підходу, заснованого на пошуку станів "нульового відпору", як для сталевих, так і для залізобетонних стрижневих конструкцій.

1. Городецкий А.С., Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – К.: издательство "Факт", 2005. – 344с.
2. Грудев И.Д. Устойчивость стержневых элементов в составе стальных конструкций. – М.: МИК, 2005. – 320 с.
3. Стороженко Л.І., Лапенко О.І. Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці: Монографія.– Полтава: ПолтНТУ, 2008. –312с.
4. Стороженко Л.І., Лапенко О.І. Проектування й будівництво сталезалізобетонних конструкцій в незнімній опалубці //Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» – вип. 67. – Київ, НДІБК, 2007. – С. 750 -758.5.
5. Улитин В.В. Физически нелинейный анализ устойчивости конструкций. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 96 с.