

УДК 624.075:624.016

Ю.О. Авраменко, к.т.н.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

## **ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ ТА НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ КОРОТКИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З РІЗНИМИ КРАЙОВИМИ УМОВАМИ СТАЛЕВИХ СКЛАДОВИХ**

*Проаналізовано напружено-деформований стан та місцеву стійкість коротких сталезалізобетонних елементів з різними крайовими умовами сталевих складових. Порівняно експериментальні та теоретичні результати.*

*Ключові слова:* несуча здатність, місцева стійкість, сталезалізобетонні конструкції.

УДК 624.075:624.016

Ю.А. Авраменко, к.т.н.

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

## **ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОРОТКИХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С РАЗНЫМИ КРАЕВЫМИ УСЛОВИЯМИ СТАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

*Проанализированы напряженно-деформированное состояние и местная устойчивость коротких сталежелезобетонных элементов с различными крайевыми условиями стальных составляющих. Сравнены экспериментальные и теоретические результаты.*

*Ключевые слова:* несущая способность, местная устойчивость, сталежелезобетонные конструкции.

UDC 624.075:624.016

Y.A. Avramenko, PhD

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

## **DEFORMATION FEATURES AND BEARING CAPACITY OF SHORT COMPOSITE STEEL AND CONCRETE ELEMENTS WITH DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS OF STEEL COMPONENTS**

*This publication analyzed the stress-strain state and local stability of short composite steel and concrete elements with different boundary conditions of steel components. The experimental results were compared with theoretical results.*

*Keywords:* bearing capacity, local stability, composite steel and concrete structures.

**Вступ.** Розвитку науково-технічного прогресу в будівельній галузі сприяє підвищення ефективності використання матеріалу в несучих конструкціях. Завдання зниження матеріаломісткості може бути розв'язано завдяки пропозиціям щодо вдосконалення відомих, а також розробленні нових конструктивних рішень і методів розрахунку з урахуванням збільшених вимог за найбільшим економічним ефектом і широким можливостям чисельних методів [1, 4, 9].

Високу ефективність і раціональність використання як частини несучих сталезалізобетонних конструкцій показали тонкостінні сталеві елементи в поєднанні з легкими бетонами завдяки відносно низькій питомій вазі, простоті виготовлення та достатній несучій здатності [6, 10].

Ефективність підвищення несучої здатності запропонованих конструкцій за допомогою конструктивних прийомів очевидна. Однак рішення про їхню реалізацію, що вимагає відповідних витрат у рамках робіт зі швидкого зведення та реконструкції будівель та споруд, приймається на основі встановлення реальної несучої здатності, характеру роботи сталезалізобетонних елементів конструкцій.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Значна зацікавленість вітчизняних та зарубіжних учених у теорії тонкостінних стрижнів [1, 5, 9] обумовлена широким застосуванням їх у різних галузях сучасної техніки як основних несучих конструкцій типу колон і балок у промисловому й цивільному будівництві, трубчастих пілонів і балок у мостобудуванні, силових каркасних апаратів у машинобудуванні, так і у вигляді допоміжних елементів типу підкріплювальних ребер пластин та оболонок у літальних апаратах, суднах, вагонах, у металевих конструкціях підйомно-транспортних машин і т.д.

Перші питання стійкості тонкостінних стрижнів були поставлені ще наприкінці минулого століття. Починаючи з 20-х років, теорія розрахунку тонкостінних стрижнів отримала подальший істотний розвиток під впливом запитів будівельної практики і значною мірою авіабудування. Завдяки творчим зусиллям вітчизняних учених сформовано технічну теорію розрахунку тонкостінних стрижнів. Велика заслуга в розробленні теорії загальної стійкості пружних тонкостінних стрижнів належить авторам робіт [1, 4, 5].

Однак є ще низка питань, що досить мало вивчені та потребують подальшого дослідження. До таких належать питання несучої здатності тонкостінних стрижнів з різного роду недосконаlostями (у вигляді геометричних недосконаlostей, неоднорідності матеріалу, початкових напружень) при одночасному врахуванні їх місцевої втрати стійкості. Дослідження недосконалих систем важливе перш за все з практичної точки зору, оскільки дозволяє наблизити розрахункову схему до реальних конструкцій.

Доцільність і практична значимість такого підходу до сталезалізобетонних конструкцій відзначається авторами робіт [1, 2, 5, 8, 9], які висвітлюють результати розрахунково-теоретичних досліджень, досвід впровадження, рекомендації нормативно-технічної літератури.

**Постановка завдання.** Метою роботи є врахування дійсної схеми деформування сталезалізобетонних елементів з різними крайовими умовами сталевих складових та реальних властивостей матеріалу, що дозволяє правильно оцінити наявні в них запаси й запроектувати найбільш оптимальну конструкцію.

**Основний матеріал і результати.** Вітчизняні норми будівельного проектування [3], як і аналогічні нормативні документи більшості інших країн та міжнародних співтовариств, ґрунтуються на використанні методу розрахункових граничних станів (методу часткових коефіцієнтів надійності). У цьому випадку основну роль відіграє визначення поняття граничного стану, одним з можливих проявів якого є втрата стійкості.

Слід звернути увагу на те, що в одному з основних стандартів [2] втрата стійкості входить до переліків ознак як першої (повна непридатність до експлуатації), так і до другої (значні ускладнення нормальної експлуатації) груп граничних станів. Це пов'язано з тим, що сам по собі факт втрати стійкості в загальному випадку ще не є достатнім критерієм відмови, оскільки різною може бути закритична стадія роботи.

У згаданому стандарті [2] розмежовуються поняття стійкості положення (проти перекидання і ковзання) і стійкості форми (наприклад, випинання). Саме втрата стійкості форми (загальна) належить до першої групи граничних станів, у той час як місцева втрата стійкості форми може бути віднесена до другої групи граничних станів.

Можливість віднесення місцевої втрати стійкості до другої групи граничних станів викликала свого часу різке заперечення деяких фахівців (Б.М. Броуде, І.А. Біргера та інших), які вважали, що можлива локальна втрата стійкості окремих елементів і частин загального конструктивного комплексу не призводить до повної непридатності до експлуатації (ознака першого стану), швидше за все не викличе і значних труднощів у нормальній експлуатації (ознака другого стану). Якщо згадати, наприклад, що обмеження прогинів може бути пов'язано не тільки з технологічними або конструктивними, але також і з естетико-психологічними вимогами (забезпечення сприятливого враження від зовнішнього вигляду конструкції, запобігання відчуттю небезпеки), то напевно, ці твердження були хибними.

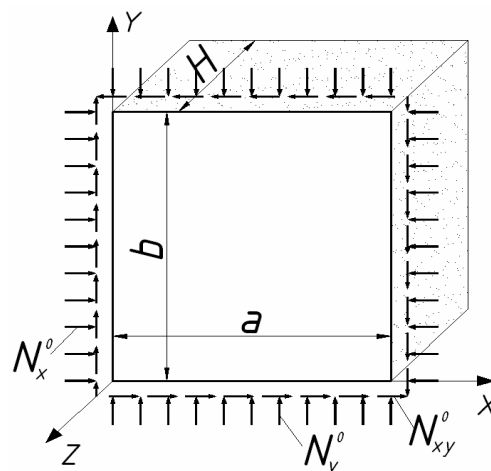
Явище втрати стійкості може виступати в ролі одного з граничних станів конструкції. Однак порівняно з іншими критеріями граничних станів тут спостерігаються певні специфічні риси, в першу чергу слід зазначити раптовість відповідної відмови, труднощі, а часто – неможливість її визначення за якими подіями або діагностичними ознаками. Це підвищує небезпеку настання граничного стану.

Друга відмітна особливість втрати стійкості як граничного стану – це підвищена чутливість до незначних недосконалостей конструкції. Останні мають характер випадкових явищ, але, на відміну від інших випадкових параметрів (характеристик навантаження, міцності матеріалу), малий розкид яких може бути врахований відносно малою зміною розрахункових характеристик навантаження або міцності, тут може мати місце непропорційно великий вплив на поведінку системи в цілому. Тому при перевірці місцевої стійкості металеві конструкції прийнято розмежовувати на прямокутні відсіки (пластинки).

При виділенні зі сталевих елементів конструкції окремих пластинок (відсіків), що підлягають розрахунку, зазвичай уводяться спрощення, які полягають в ідеалізації умов закріплення країв пластинки й у схематизації контурних навантажень. Оскільки в більшості наявних досліджень розглядаються переважно вільно оперті пластинки, в практичних розрахунках, як правило, передбачається вільно опертий контур. Дійсні умови закріплення можуть займати будь-яке проміжне положення між вільним обпиранням і жорстким защемленням, при цьому різниця у величині критичного навантаження може бути досить значною. Не менш важливо було забезпечити вибір пружного матеріалу заповнювача, який мав ефективні характеристики поєднання зі сталевими тонкостінними пластинами [6].

Оскільки класична теорія оболонок нехтує врахуванням реакції пружної основи, то це вимагало відмови від традиційних розрахункових схем і розроблення уточнених математичних моделей деформування тонкостінних шаруватих систем (рис. 1).

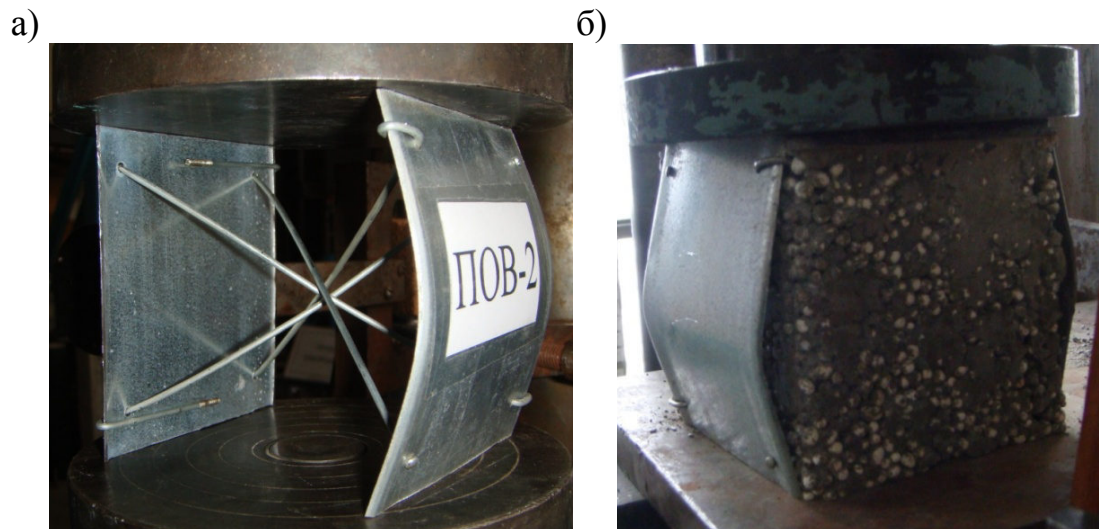
З урахуванням вищесказаного для підтвердження розрахункової методики шаруватих ізотропних пластин і оболонок, їх апробації та визначення меж застосування були експериментально досліджені короткі сталезалізобетонні елементи з різними крайовими умовами сталевих складових.



**Рис. 1. Початковий напружений стан пластини на пружній основі**

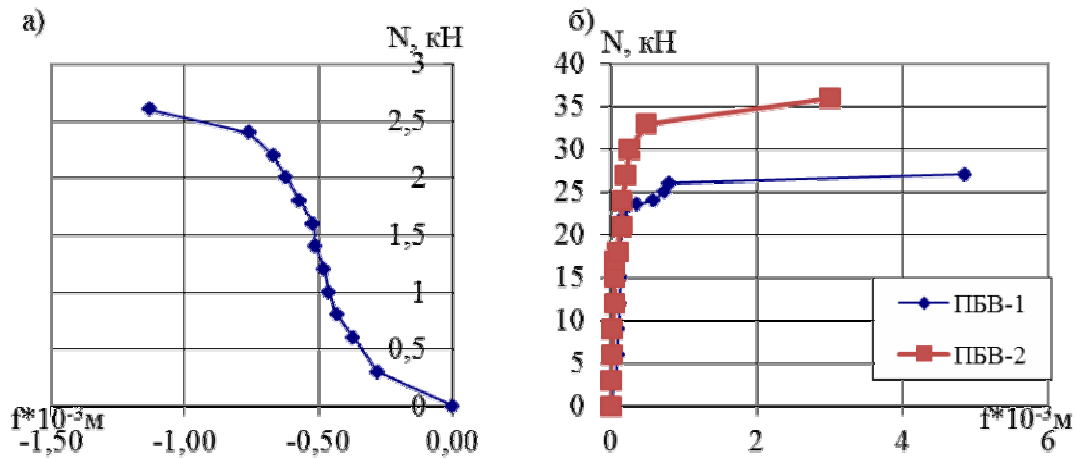
Згідно з програмою експерименту для запропонованої групи зразків відносні деформації всіх випробуваних зразків на межі текучості сталеві пластинки майже не відрізнялись і склали  $\epsilon = (80...135) \times 10^{-5}$ . Залишкові деформації зразків дещо відрізнялись. Найменшими вони були для зразків, виконаних без бетонної складової – близько 1%. Для зразків із заповнювачем залишкові деформації склали 1,8...2,3%. Це свідчить про те, що обрані для теоретичних досліджень конструктивні елементи не мають значних пластичних деформацій, а руйнування відбувається внаслідок втрати місцевої стійкості сталевих складових.

Великі значення залишкових деформацій недопустимі при звичайній експлуатації конструкцій, причому був відмічений незначний розкид значень залишкових деформацій. Це викликано особливостями роботи коротких стиснутих сталезалізобетонних елементів з різними крайовими умовами закріплення сталевих складових. Руйнування сталевих тонкостінних пластин відбувалося аналогічно до прийнятих передумов хвилеутворення [7] (рис. 2).

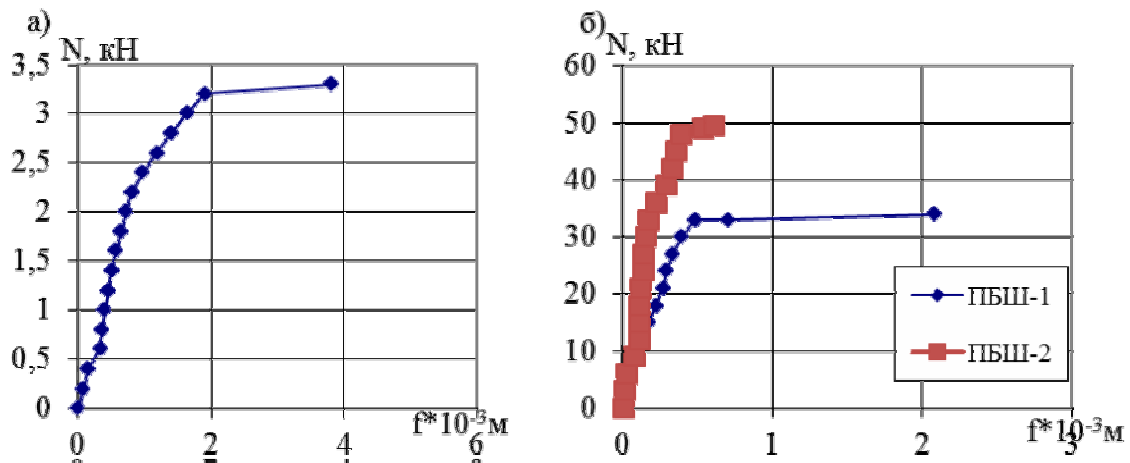


**Рис. 2. Характер руйнування зразків з вільно обпертими ненавантаженими кромками прямокутної пластини:  
а) без бетону; б) з легким полімер бетоном**

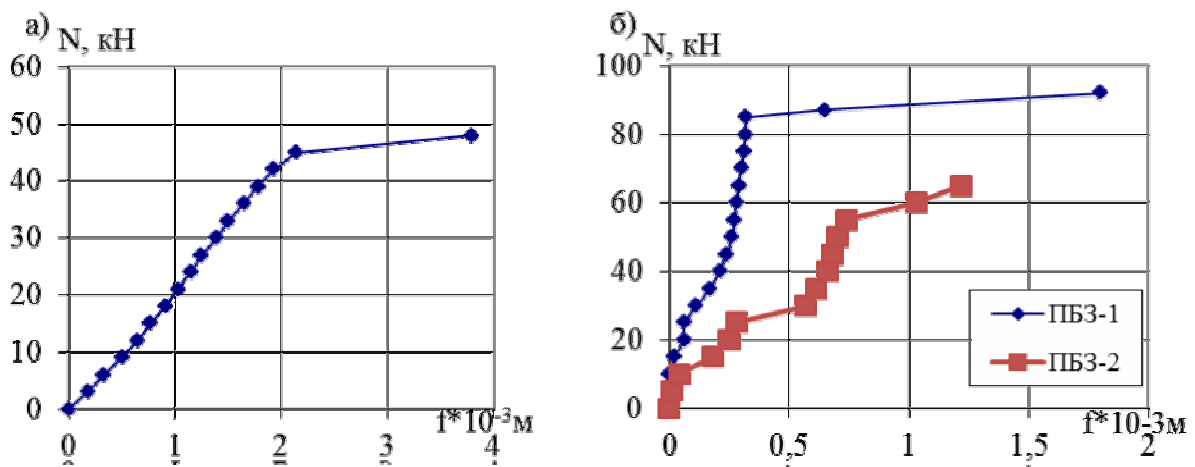
Як видно з наведених графіків (рис. 3 – 5), якщо сили, що стискають пластини, невеликі, то первісна форма рівноваги залишається стійкою. При зростанні величин прикладених сил досягається стан «байдужої» рівноваги, при якому поряд із прямолінійною формою пластини можливі суміжні з нею злегка викривлені форми рівноваги. При подальшому найбільш незначному збільшенні навантаження характер деформації елемента різко змінюється: пластина згинається, прямолінійна форма рівноваги перестає бути стійкою. Це означає, що навантаження перевищили критичне значення.



**Рис. 3. Залежність прогинів від навантаження для зразків з вільно обпертими ненавантаженими кромками прямокутної пластини:**  
**а) без бетону; б) з легким полімербетоном**



**Рис. 4. Залежність прогинів від навантаження для зразків із шарнірним обпиранням по контуру:**  
**а) без бетону; б) з легким полімербетоном**



**Рис. 5. Залежність прогинів від навантаження для зразків із жорстким защемленням поздовжніх сторін:**  
**а) без бетону; б) з бетоном**

Характер роботи конструкцій серій ПБВ, ПБШ, ПБЗ схожий з описаним вище, але в цьому випадку на місцеву втрату стійкості сталевих елементів значною мірою впливає бетонна складова.

Руйнуванням елемента вважався момент різкого збільшення вигину при незначному перевищенні величини прикладеного навантаження.

Відмінність у роботі на останньому графіку (рис. 5 б) обумовлена початковою недосконалістю конструкції, а саме незначним перевищенням висоти сталевих пластин легким бетоном, що спричинило обтиск останнього і деякі відхилення в деформуванні.

Можна стверджувати, що досягнення навантаженнями критичних значень рівносильне руйнуванню конструкції, тому що нестійка форма рівноваги неминуче буде втрачена, що пов'язано з практично необмеженим зростанням деформацій і напружень. Особлива небезпека руйнування внаслідок втрати стійкості полягає в тому, що зазвичай вона відбувалася раптово та при низьких значеннях напружень, коли міцність елемента ще далеко не вичерпана з одночасним відставанням від бетону.

До моменту настання критичного стану пружні деформації за величиною дуже незначні й наростання їх відбувається майже непомітно для ока. Але з моменту настання критичного стану до моменту руйнування залишкові деформації наростають дуже швидко, і практично немає часу вжити заходів щодо запобігання неминучій відмові.

Усі значення критичних навантажень наведено у таблиці 1.

**Таблиця 1. Несуча здатність коротких сталезалізобетонних елементів з різними крайовими умовами сталевих складових**

Зразки серії*	Несуча здатність, кН		
	Легкі сталеві тонкостінні елементи		
	Експериментальні значення	За теорією пружності	За запропонованою теорією
ПОВ	2,5	3,04	3,34
ПОШ	14,05	17,57	17,54
ПОЗ	43,50	42,96	37,52
	Тонкостінні сталеві елементи, підкріплені легким полімербетоном		
ПБВ	29,50	-	28,23
ПБШ	41,50	-	52,34
ПБЗ	78,50	-	74,87

\*Зразки з різними умовами закріплення ненавантажених кромки тонкостінної пластинки: ПОВ та ПБВ, ПОШ і ПБШ, ПОЗ та ПБЗ – вільний край, шарнірне обпирання, затиснення відповідно

**Висновки.** На підставі експериментально і теоретично отриманої схеми руйнування розроблено методику оцінювання несучої здатності з урахуванням місцевої втрати стійкості сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій. Поєднання тонкостінних сталевих елементів з легким полімербетоном дає приріст несучої здатності: для вільного опирання ненавантажених кромок в 11 разів, для шарнірного спирання по контуру – в 3 рази та для жорсткого защемлення – майже вдвічі, що свідчить про доцільність таких конструктивних елементів. Виконані дослідження дозволяють установити вплив різних граничних умов пластинчатого елемента конструкції та їх вплив на несучу здатність, що потрібно враховувати при проектуванні.

#### *Література*

1. Гузь, А.Н. *Трехмерная теория устойчивости стержней, пластин и оболочек* / А.Н. Гузь, И.Ю. Бабич. – К.: Вища школа, 1980. – 167 с.
2. ДБН В.1.2-14-2009. *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ* / Міненергобуд України. – К., 2011. – 49 с.
3. ДБН В.2.6-163:2010. *Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу* / Міненергобуд України. – К., 2010. – 225 с.
4. Ильгамов, М.А. *Расчет оболочек с упругим заполнителем* / М.А. Ильгамов, В.А. Иванов, Б.В. Гулин. - М.: Наука, 1987. – 133 с.
5. Перельмутер, А.В. *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа* / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – К.: Компас, 2001. – 448 с.
6. Семко О.В. *Легкий бетон для заповнення порожнин сталевих тонкостінних конструкцій* / О.В. Семко, Д.М. Лазарєв, Ю.О. Авраменко // *Будівельні конструкції. Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: міжвід. наук.-техн. зб.* – К.: ДП НДБІК, 2011. – Вип. 74. – С. 659 – 666.
7. Семко О.В. *Стійкість тонкостінних сталевих елементів, підкріплених легким полімербетоном* / О.В. Семко, О.П. Воскобійник, Ю.О. Авраменко // *Зб. наук. праць.* – К: УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського, 2012. – Випуск 10. – С. 52 – 64.
8. *Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація* / Л.І. Стороженко, В.М. Сурдин, В.І. Єфименко, В.І. Вербицький. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – 446 с.
9. Mohammad, R.K. *A comparative study on three different construction methods of stiffened plates-strength behaviour and ductility characteristics* / R.K. Mohammad, K. Ghavami, M. Rastani // *Rev. Esc. Minas.* - 2007. - Vol. 60, № 2. - P. 365 - 379.
10. Vogdt, F. *Conceptual and structural design of building made of lightweight and infra-lightweight concrete.* / F. Vogdt, M. Schlaich, B. Hillemeir // *Berlin, 2010.* – 105pp.

*Надійшла до редакції 09.10.2013  
© Ю.О. Авраменко*