

С. О. Мурза

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, АРМОВАНИХ ЛИСТАМИ

Проведено аналіз експериментальних досліджень стрижневих сталезалізобетонних конструкцій армованих сталевими листами, який показав, що для всіх зразків загальним є те, що під дією навантаження відбувалося викривлення поздовжньої вісі елемента, що призводило до нерівномірного розподілу поздовжніх деформацій у листовому армуванні, внаслідок чого гофри утворювались із боку, протилежному до напрямку вигину. Ці результати доводять важливість питання стійкості в гнучких сталезалізобетонних стрижневих конструкціях.

Ключові слова: експериментальні дослідження, сталезалізобетон, стрижневі конструкції, листове армування.

The article analyzes the experimental research of rod steel and reinforced concrete structures reinforced with steel plates, which showed that all samples general is that under load was hogging the longitudinal axis of the element, leading to uneven distribution of longitudinal strain in reinforcement sheet, in consequence of which corrugated been arising by the opposite direction of the bend. These results emphasize the importance of stability in flexible steel and reinforced concrete rod structures.

Key words: experimental research, steel and reinforced concrete structures, rod structure, reinforcement sheet.

Постановка проблеми

Разом із залізобетонними вже понад сто років застосовують сталезалізобетонні конструкції, що поєднують залізобетон та сталеві прокатні профілі. Ці конструкції надзвичайно різноманітні, їх застосовують під час будівництва згинальних і стиснутих конструкцій, плит, їх застосовують під час зведення різноманітних споруд.

Сталезалізобетонні конструкції отримали широке розповсюдження в усьому світі. Уже доведено, що їх раціонально застосовувати для перекриття великих прольотів (плити, балки, ригелі, ферми тощо), стійок, які сприймають великі навантаження (колони промислових та цивільних будівель, стояки різного призначення, опори ЛЕП тощо), в інженерних спорудах. Поперечні перерізи таких конструкцій можуть бути найрізноманітніші. Під час використання сталезалізобетонних конструкцій зменшується маса будівель, дуже часто можна обійтися без опалубки, закладних деталей. Такі конструкції мають багато переваг, основна з них – це відсутність опалубки, можливість виготовляти комплексні конструкції, в яких сумісно працюють залізобетон та сталеві профілі.

Аналіз останніх досліджень

Застосування листової арматури в стиснуто-зігнутих конструкціях дає змогу знизити витрати на опалубкові роботи, спростити зведення колон, монолітних та збірних покриттів будівель і споруд. Для сталезалізобетонних згинальних конструкцій питання тріщиностійкості (поява і розкриття тріщин) у розтягнутій зоні під час експлуатації менш актуальне, а то і зовсім відсутнє. Листове армування унеможливорює застосування багаторядного розташування арматури, що дає змогу економити сталь та значно спрощує процес бетонування. Відкрита частина листової арматури дозволяє спростити конструктивні рішення з підсилення сталезалізобетонних конструкцій за збільшення корисного навантаження, а також використовувати листову арматуру як закладні деталі стиків, різних комунікацій і обладнання [1, 4, 6].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

За результатами багатьох дослідів різні науковці встановили, що в момент вичерпання несучої здатності сталобетонні конструктивні елементи не руйнуються крихко, на відміну від залізобетонних. Конструктивна форма сталевих армувань по-різному впливає на механізм досягнення граничного стану несучим елементом, який виконано зі сталобетону. Так досить добре вивчене питання досягнення граничного стану сталобетонними конструктивними елементами зі суцільним зовнішнім сталевим армуванням (трубобетон). Бетонне осердя, що обмежене сталевим оболонкою, здатне витримувати навантаження значно більші, ніж призмова міцність бетону. Таке армування призводить до того, що конструктивний елемент, який досяг граничного стану за першою групою, здатен витримувати навантаження, що збільшується. Усе це свідчить про розбіжність у величині навантаження, яке сприймає сталобетонний елемент залежно від досягнутого граничного стану.

Зовнішня арматура у вигляді сталевих листів дає змогу ефективно використовувати залізобетонні конструкції з великим відсотком армування за обмежених розмірів перерізу. Ці конструкції мають суттєві переваги під час проектування та будівництва різних будівель і споруд.

Формулювання цілей статті

Метою статті є проаналізувати експериментальні дослідження стрижневих сталезалізобетонних конструкцій з листовою арматурою залежно від ексцентриситету прикладення навантаження.

Виклад основного матеріалу

Під час складання програми експерименту враховувалось, що несуча здатність і напружено-деформований стан елемента залежать від конструктивного вирішення, ексцентриситету прикладення навантаження і фізико-механічних властивостей вихідних матеріалів. На підставі проведеного огляду праць [1–8] та під час розроблення програми експериментів сформульовано завдання експериментально визначити міцність та особливості роботи під навантаженням стиснених стрижневих елементів з листовим армуванням, отримати характерні параметри напружено-деформованого стану для подальшого їх аналізу щодо стійкості цього класу конструкцій. Для експериментальних досліджень використані сталобетонні стійки висотою 1000 мм, а також з однаковим поздовжнім армуванням, заповнені важким бетоном.

Для виготовлення експериментальних зразків використовувався сталевий лист $t = 4$ мм, поперечна арматура класу А-I $\varnothing 6$ мм, поздовжня арматура відсутня. Висота зразків становила 1000 мм, переріз 100×100 мм. Для виявлення ефективності роботи сталезалізобетонних елементів випробовувались зразки зі сталі без бетону таких самих розмірів. Для визначення фізико-механічних властивостей бетонного заповнювача випробовувались стандартні бетонні куби $150 \times 150 \times 150$ мм і призми $150 \times 150 \times 600$ мм, виготовлені із того самого бетону, що і дослідні зразки.

Враховуючи поставлену задачу, для проведення експерименту розроблено поперечні перерізи дослідних зразків та схема їх армування. Задачею експериментальних досліджень стало визначення особливостей роботи під навантаженням та характер втрати несучої здатності сталезалізобетонних зразків із зовнішнім армуванням сталевими листами залежно від ексцентриситету прикладання зусиль, а також порівняти особливості роботи центрально стиснутих елементів заповнених і незаповнених бетоном. Конструкції експериментальних зразків показано на рис. 1.

Експериментальні зразки сталезалізобетонних стрижневих конструкцій складаються із поздовжньої листової арматури, поперечних арматурних стержнів, торцевих металевих пластин, траверс і заповнювача (бетону). Торцеві пластини та поперечні стержні з'єднують між собою поздовжню стрічкову арматуру, яка виконує одночасно функцію опалубки. Поперечна арматура із стержнів приварюється на відстані 100 мм одна від одної. Під час бетонування зварені у вигляді короба листи з'єднані між собою за допомогою стержнів, вкладались на підготовлену поверхню і заповнюються бетоном у горизонтальному положенні. Ущільнення бетонної суміші виконувалось за допомогою вібраторів. Приготування бетону проводилось на заводському бетонному вузлі. Зварні з'єднання виконували ручним електродувим зварюванням електродами Э – 42.

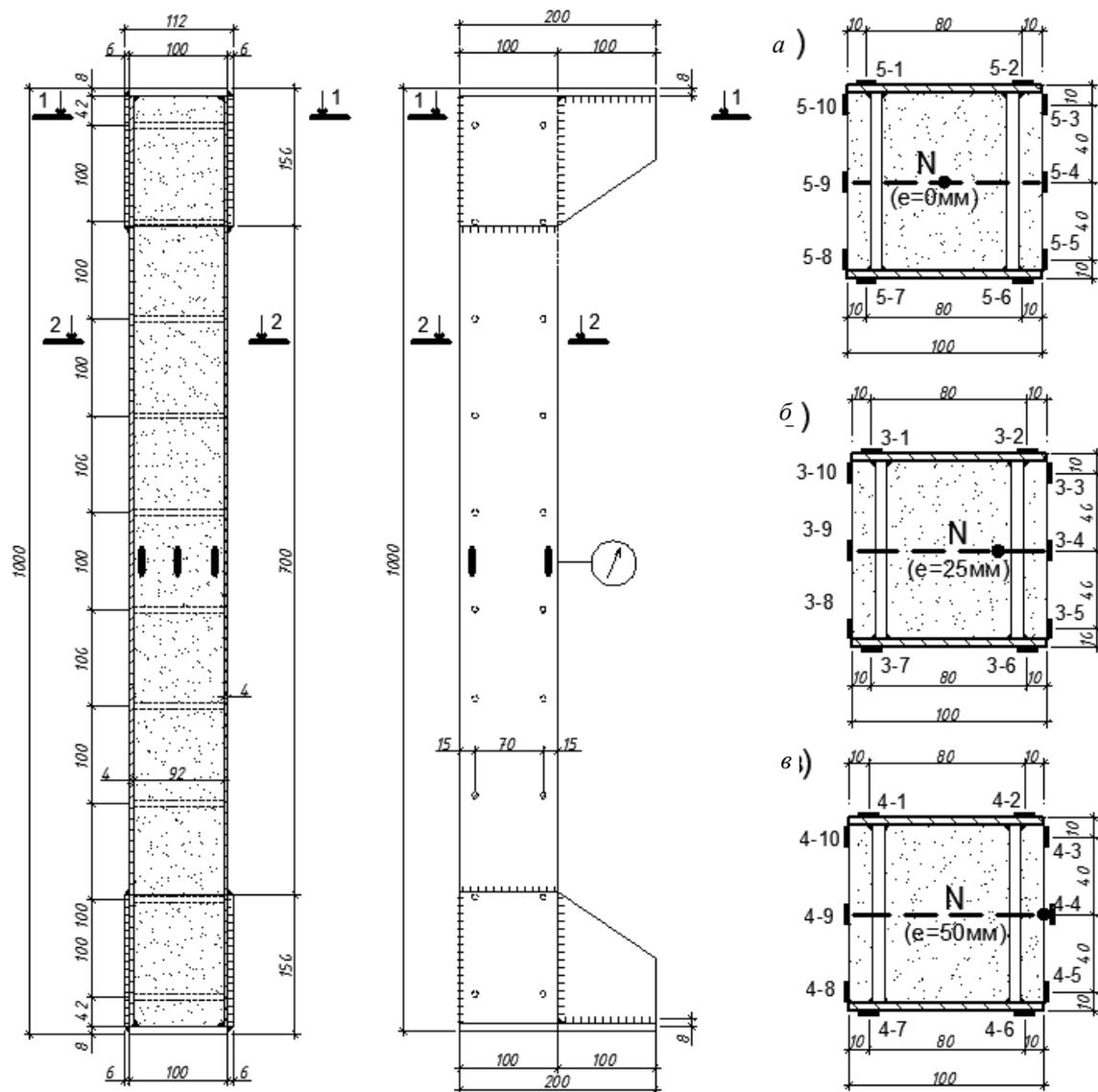


Рис. 1. Геометричні розміри та схема розташування електротензорезисторів дослідних конструкцій: а – під час випробування на центральний стиск; б – під час випробування з ексцентриситетом 25 мм; в – під час випробування з ексцентриситетом 50 мм

Стержні поперечної арматури були приварені перпендикулярно до листової арматури напівавтоматичним зварюванням. Поперечні стержні розміщувались паралельно двома рядами з мінімальним захисним шаром. Елементи заповнювались бетоном у горизонтальному положенні на вібростолах. Час вібрування для сталезалізобетонних і бетонних зразків $T = 5-10$ секунд. Перші 5–28 діб відкриті поверхні бетону експериментальних зразків зволожувались та покривалися шаром тирси для утримання вологи, після чого зразки зберігались до випробування в лабораторних умовах. Температура в приміщенні, де виготовлялись і зберігались експериментальні зразки дорівнювала $T = 15-17$ °C та відносна вологість повітря 70–75 %. Після бетонування зразки були пофарбовані за два рази лакофарбовим покриттям для спостереження появи ліній Чернова.

Випробування зразків проводилось у віці 28 діб і більше. Завантаження ступінчасте (0,05–0,1) від N руйнівного. Навантаження прикладалось через ножові шарніри. Поздовжні деформації вимірювались за допомогою електротензорезисторів на всіх ступенях завантаження. Витримка на кожному ступені становила 5–10 хв, необхідна для зняття відліків.

Для визначення даних щодо кутів повороту та положення деформованої осі елементів використано фотограмметричний метод. Під час використання фотограмметричного методу [3] на бокову поверхню дослідних конструкцій були наклеєні маркувальні знаки розмірами $1,5 \times 1,5$ см [1]

(рис. 2, а). Фотографування виконувалось на кожному ступені навантаження камерою марки Nikon, модель D3200, спусковий затвор якої активувався автоматично з ПК. Такий спосіб дає можливість отримати точні дані переміщення маркувального знака, вилучаючи випадкові переміщення камери та всіх складових фотограмметричної зйомки. Для можливості врахування елементів зовнішнього орієнтування застосовано стенд з нанесеною контрольною сіткою розташований за конструкцією. Координатні горизонтальні та вертикальні лінії сітки надруковані з кроком 10 см перетинались у точках, на перехресті яких знаходилися контрольні маркувальні знаки розмірами 1,5×1,5 см.

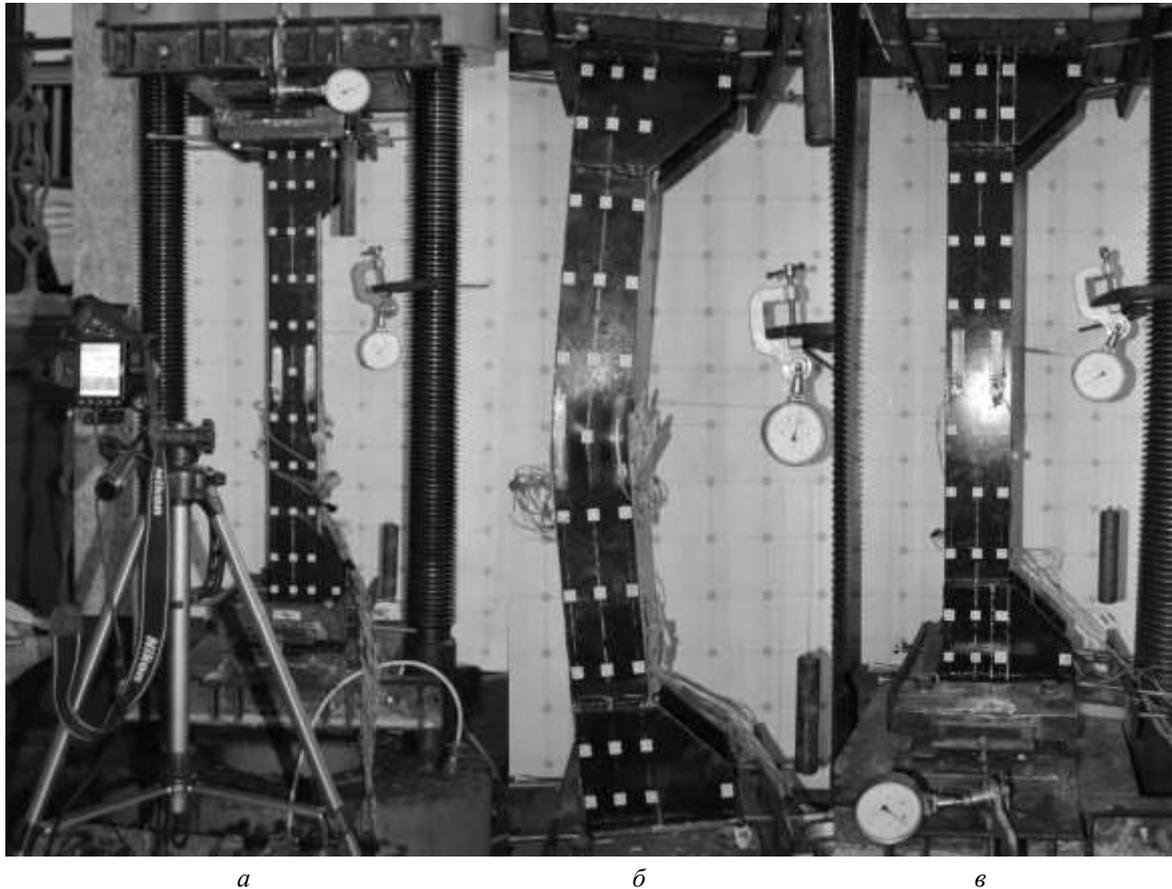


Рис. 2. Випробування дослідних конструкцій:

а – установка для використання фотограмметричного методу; б – руйнування дослідного зразка; в – випробування контрольного дослідного зразка без бетону

На всіх ступенях завантаження були помітними особливості руйнування та розподілення деформацій по висоті зразка, розвитку тріщин у бетоні, а також інтенсивність зростання прогинів елемента. Усі зразки доводились до руйнування. У період руйнування на поверхні лакового покриття досліджуваних елементів з'являлись лінії Чернова–Людерса. Прилади в цей час показували значне зростання деформацій, а стрілка силовимірювача повільно рухалась у зворотному напрямку. Після зняття навантаження в зразках залишались явно виражені залишкові деформації, поздовжня вісь зразка залишалась викривленою.

Поздовжні деформації вимірювались за допомогою електротензорезисторів, для тензометричних випробувань використовувався автоматичний вимірювач деформацій ВНП-8. Прогини в дослідних зразках вимірювались за допомогою прогиномірів Максимова, дані зкоаркиисхтови вувались для контролю фотограмметричного методу. Для заміру поздовжніх деформацій використані дротяні електротензорезистори з опором 325 Ом і базою 50 мм, які наклеювались на бетон та на металевий лист у середній частині зразків. Розміщення електротензорезисторів у поздовжньому і поперечному напрямку на зразках різних висот і з різним ексцентриситетом прикладання навантаження наведено на (рис. 1).

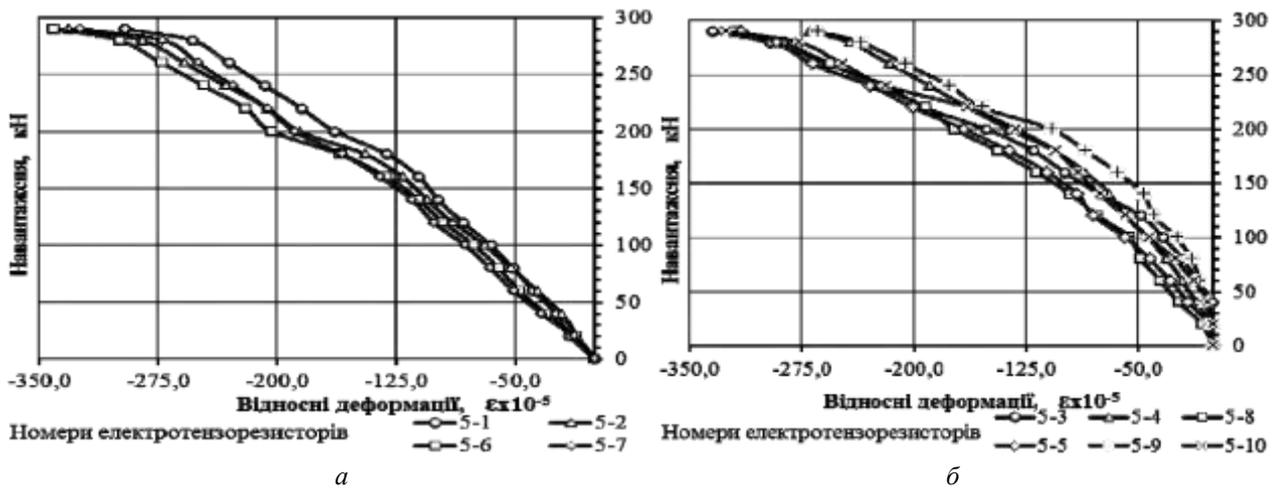


Рис. 3. Залежність повздовжніх деформацій зразка від навантаження за центрального стиску:
а – на листовій арматурі; б – на бетоні

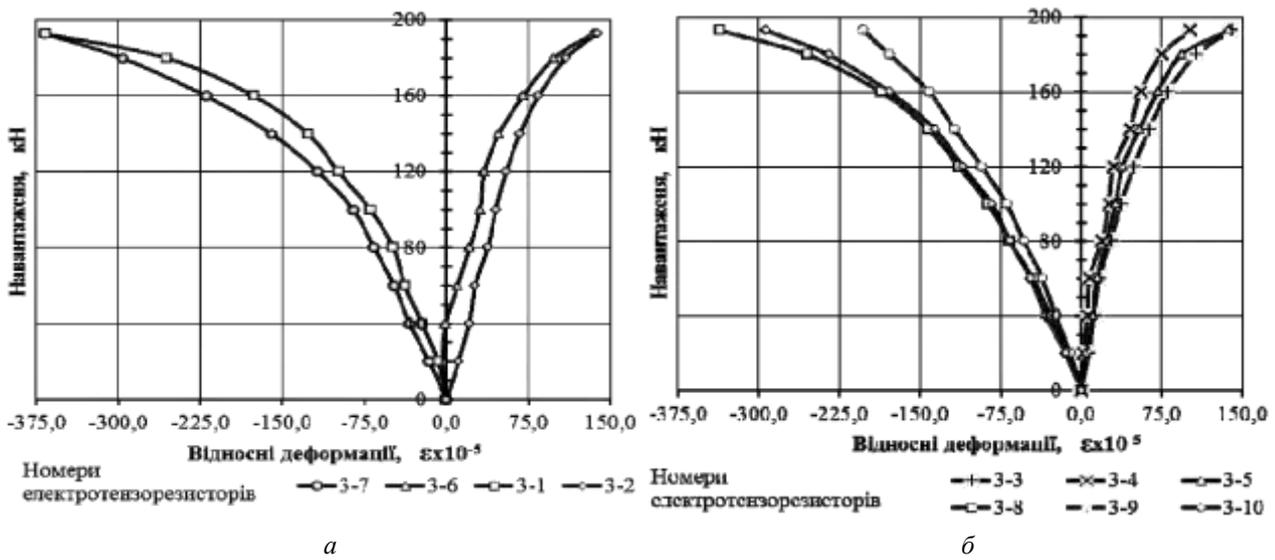


Рис. 4. Залежність повздовжніх деформацій зразка від навантаження при ексцентриситеті в 1/4 поперечного перерізу (25 мм): а – на листовій арматурі; б – на бетоні

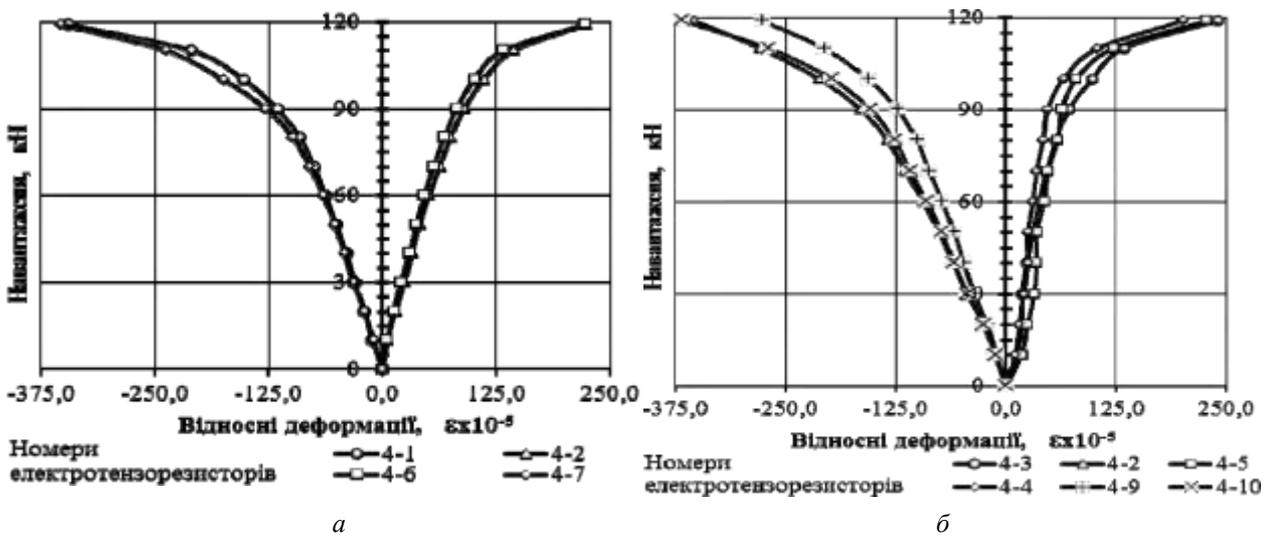


Рис. 5. Залежність повздовжніх деформацій зразка від навантаження при ексцентриситеті в 1/2 поперечного перерізу (50 мм): а – на листовій арматурі; б – на бетоні

Характер руйнування сталобетонних елементів з листовим армуванням спостерігався, коли поздовжні деформації дорівнювали межі плинності металу ($\epsilon = 200\text{--}300$), на лакофарбовому покритті утворювалась сітка у вигляді ліній Чернова. На поверхні бетону, вільної від листового армування, мікротріщини об'єднувались у макротріщини. Напрямок цих тріщин збігається з поздовжньою віссю дослідного зразка. Далі відбувалося випучування листового армування внаслідок тиску бетону в поперечному напрямку з утворенням гофр перпендикулярно до поздовжньої осі, на ділянці між сусідніми рядами поперечних хомутів. Збільшення навантаження призводило до руйнування, шляхом розриву хомутів та порушення моноліту бетону. Бетон виколувався і випадав у бік, вільний від листового армування (рис. 6).

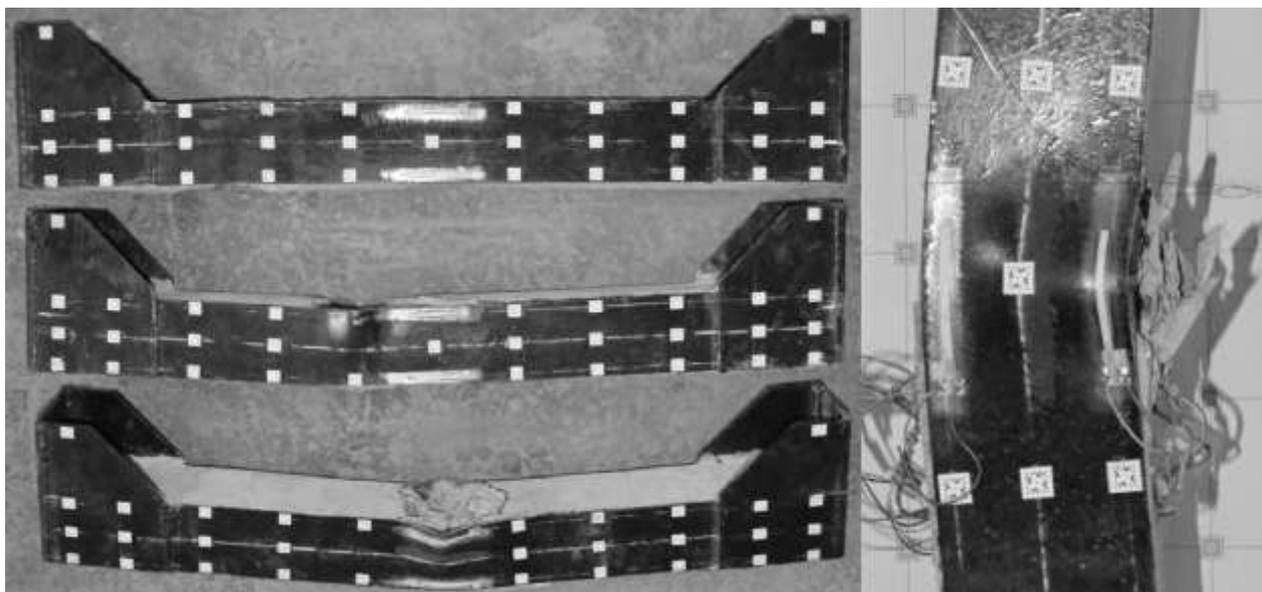


Рис. 6. Характер руйнування дослідних зразків

Загальним для всіх зразків є те, що під дією навантаження відбувалося викривлення поздовжньої осі елемента. Це призводило до нерівномірного розподілу поздовжніх деформацій у листовому армуванні, й відповідно, гофри утворювались із боку, протилежному напрямку вигину (рис. 3). Установлено, що руйнування коротких позacentрово стиснутих сталобетонних елементів із листовим армуванням залежить від величини ексцентриситету. При ексцентриситеті в $1/4$ поперечного перерізу (25 мм) механізм руйнування близький до руйнування центрально стиснених зразків, але в разі досягнення рівня завантаження $0,25$ від руйнівного зусилля починає викривлятися поздовжня вісь (рис. 4). Вона так і залишається викривленою до самого моменту руйнування. У позacentрово стиснених сталобетонних елементах з листовим армуванням при ексцентриситеті в $1/2$ поперечного перерізу (50 мм), викривлення поздовжньої осі спостерігалось з першого ступеня завантаження і збільшувалось до моменту руйнування (рис. 5). Руйнування відбувалося унаслідок місцевого випучування у найбільш стисненій смужці армування та одночасним виколом бетону.

Треба зазначити, що після зняття навантаження поздовжня вісь у всіх позacentрово стиснених сталобетонних елементах з листовим армуванням залишалась викривленою і не поверталась до свого первинного прямолінійного стану. Все вищезазначене свідчить про те, що руйнування сталобетонних елементів з листовим армуванням відбувається не крихко, як у залізобетонних елементах, а навпаки, коли навантаження досягає певного рівня, у листовому армуванні досягається межа плинності металу, починається пластичне руйнування без зменшення рівня завантаження.

Так, із зазначеного вище випливає, що для позцентровостиснутих елементів як граничного приймаємо два зусилля: перше граничне зусилля відповідає моменту досягнення найбільш напруженим волокном листового армування межі плинності сталі; друге – момент руйнування дослідного зразка, за якого спостерігають інтенсивне викривлення поздовжньої осі.

Проведені дослідження показали, що важливого значення набувають питання стійкості в гнучких сталезалізобетонних стрижневих конструкціях, оскільки руйнування сталезалізобетонних конструкцій найчастіше пов'язане з втратою загальної стійкості або їх окремих конструктивних елементів – місцевої втрати стійкості. Для сталезалізобетонних конструкцій загалом та із зовнішнім листовим армуванням, зокрема проблема місцевої стійкості сталевих стінок є досить актуальною.

Список літератури

1. Arnould M., Virlogeux M. *Le beton leger*. – Presses de l'Ecole Nationale des ponts et chassesees. – Paris, 1996. – P. 43–70.
2. Gasii G. *Constructive concept of composite structures for construction including geological specifics* / G. Gasii, O. Zabolotskyi // *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. – Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2017. – vol. 20. – № 2. – P. 37–42.
3. Gasii G. M. *Finite element analysis of the stress and strain state of the node of the top belt of the steel and concrete composite cable space frame* / G. M. Gasii // *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*. – 2017. – № 171. – P. 69 – 76.
4. Gasii G. M. *Development, essence and scope of application of structural and cable-stayed composite structures* // *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. – Vol. 71. – no. 5, (2017). – pp.107-114.
5. Storozhenko L. I. *Combined cable space frames for agricultural buildings* / L. I. Storozhenko, G. M. Gasii // *Actual problems of modern technologies : book of abstracts of the IV International scientific and technical conference of young researchers and students, (Ternopil, 16th-17th of November 2017.)*. – Ternopil : TNTU, 2017. – 226.
6. Storozhenko L. I. *Numerical studies of behavior of a curved steel and concrete composite cable space frame* / L. I. Storozhenko, G. M. Gasii // *Proceedings of the METNET Seminar 2017 in Cottbus*. – Hämeenlinna, Finland: HAMK University of Applied Sciences, 2017. – P. 105–111.
7. Єрмоленко Д. А. *Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів: Монографія* // Д. А. Єрмоленко – Полтава : Видавець Шевченко Р. В., 2012. – 316 с.
8. Клименко Ф. Е. *Сталебетонные конструкции с внешним полосовым армированием*. – К. : Будівельник, 1984. – 88 с.
9. Стороженко Л. І. *Експериментальні дослідження деформацій стиснутого трубобетону із застосуванням фотограмметричного методу* / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, Ю. В. Третьякова // *Ресурсоекономні матеріали, їх властивості та технології виготовлення : зб. наук. праць*. – Р. : НУВГП, 2011. – Вип. 22 – С. 499–504.
10. Стороженко Л. І., Лапенко О. І. *Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці : монографія*. – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – 312 с.
11. Стороженко Л. І., Семко О. В. Пенц В. Ф. *Сталезалізобетонні конструкції*. – Полтава : ПНТУ, 2005. – 182 с.
12. Стороженко Л.І. *Експериментальні дослідження конструкцій, виготовлених в незнімній опалубці* // *Коммунальное хозяйство городов*. – Харків : “Техніка”, 2009. – С. 44–49.
13. Стороженко Л. І. *Випробування експериментальних зразків пологої структурно-вантової оболонки з суцільним нижнім поясом* // *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. – Львів: ЛНАУ, 2017. – № 18. – С. 109–115.
14. Стороженко Л. І. *Методика експериментального дослідження великогабаритного зразка просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції* // *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. – Полтава, 2017. – № 2 (49). – С. 270–276.
15. Чихладзе Э. Д., Арсланханов А. Д. *Расчет сталебетонных элементов на прочность при изгибе и внецентренном сжатии* / *Известия вузов. Строительство. Архитектура*. – 1996. – № 1. – С. 6–11.