

УДК 624.016: 624.046.2: 624.012.35 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.204-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.204-212)**О.В. Дроботя**, асп.*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
м. Полтава, Україна**e-mail: Sashamailboxxx@gmail.com*

Експериментальні випробування попередньо напружених несучих елементів огорожувальних конструкцій з холодноформованих сталевих профілів на косий згин

Несучими елементами легкого зовнішнього стінового огороження будівель слугують стінові прогони. Зовнішнім навантаженням на них є вертикальне навантаження від власної ваги стінового огороження та горизонтальне вітрове навантаження, що приблизно рівні між собою. Тому стінові прогони працюють на згин в двох площинах та їх необхідно проектувати рівномічними в цих площинах. У роботі автором досліджено можливість застосування та доведена доцільність попереднього напруження в одній площині сталобетонних прогонів із зменшеною металоємністю саме в цій площині.
стінові прогони, сталобетон, попереднє напруження, експериментальні випробування, косий згин

Постановка проблеми. Несучими елементами легкого зовнішнього стінового огороження будівель слугують стінові прогони. Конструктивно такі стінові прогони являються горизонтальними балковими елементами [4]. Зовнішнім навантаженням на стінові прогони є вертикальне навантаження від власної ваги стінового огороження та горизонтальне вітрове навантаження. Таким чином, стінові прогони працюють на згин в двох площинах або так званого в умовах косоного згину [6]. Широке застосування елементів, що працюють в умовах косоного згину, вимагає всебічного теоретичного та експериментального дослідження їх роботи [5].

Легке сучасне стінове огороження влаштовують із навісних сандвіч-панелей, що складаються із двох листів профільного стінового настилу та ефективного жорсткого мінераловатного утеплювача між ними. Навантаження від власної ваги такого стінового огороження приблизно рівне вітровому навантаженню на території України. Тому в цьому випадку стінові прогони проектують рівномічними в двох площинах. Для з'ясування реальної роботи косозігнутих елементів необхідне визначення всіх параметрів, які можуть впливати на картину руйнування таких елементів [3, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі різні способи раціонального регулювання зусиль у сталевих конструкціях, які реалізуються як на стадії проектування, так і на стадії виготовлення і монтажу. До основних і найбільш поширених з них можна віднести:

- *спосіб попереднього деформування.* Здебільшого цим способом регулюють напруження в окремих стержневих елементах [11]. Попереднє деформування елементів влаштовують вигином, що протилежний експлуатаційному;
- *влаштування локальних затяжок* на сталевих частинах балкових конструкцій в зоні дії максимального згинального моменту. Ізбашом М.Ю. Доведена ефективність встановлення затяжок як по нижньому поясу балок при однопролітній

схемі їх роботи, так і по верхньому поясу над опорами при нерозрізній схемі [2];

– *влаштування додаткових попередньо напружених арматурних стержнів (затяжок) у розтягнутій зоні перерізу згинаних суцільних та просторових сталезалізобетонних конструкцій.* Позитивним результатом такого способу регулювання зусиль є підвищення несучої здатності та жорсткості сталезалізобетонних конструкцій [1]. Одночасно з перевагами, загальним недоліком перелічених трьох способів є додаткові витрати на матеріали та саме влаштування додаткових напружених стержнів;

– *спеціальна технологія виготовлення сталезалізобетонних конструкцій* результатом якої є зміна розрахункової схеми їх роботи [9]. Так, наприклад, виготовлення збірно-монолітних сталезалізобетонних ригелів виконується у декілька етапів – збірна частина конструкції виготовляється на заводі, монолітна частина – у процесі монтажу. На першому етапі ригель являє собою вільно обперту на двох опорах однопролітну балку. На другому етапі виготовлення після монтажу збірних ребристих залізобетонних плит перекриття та приварювання ригеля до закладних деталей колон, розрахункова схема ригеля змінюється на жорстко защемлену однопролітну.

Таким чином, ефективним способом попереднього напруження сталевих частини сталезалізобетонних конструкцій є їх попереднє деформування вигинами, що протилежні експлуатаційним [7]. Такі вигини влаштовують або домкратами, або шляхом влаштування додаткових попередньо напружених стержнів. При цьому попередньо зігнутий стан сталевих частини фіксується або зварюванням її складових частин під час виготовлення, або зміною умов закріплення цієї сталевих балкової частини з колонами, або власне влаштуванням напружених додаткових стержнів. Обетонування сталевих частини перерізу сталезалізобетонних конструкцій з метою фіксації її попередньо зігнутого стану детально не розглядалося [10].

Постановка завдання. Треба довести експериментальним шляхом можливості застосування попереднього напруження в одній площині сталезалізобетонних прогонів із зменшеною металоємністю саме в цій площині; експериментальні дослідження роботи попередньо напружених сталезалізобетонних прогонів на косий згин.

Виклад основного матеріалу. *Загальні засади створення раціональних попередніх напружень у шарах сталезалізобетонних прогонів.* Суть запропонованого комплексу заходів з раціонального перерозподілу зусиль полягає у наступному. На *першій стадії* виготовлення попередньо напружених сталезалізобетонних прогонів за допомогою механічних домкратів створювався початковий протилежний експлуатаційному вигин сталевих частини балок (рис. 1, а). Тобто на цьому етапі створювалися деформації нормального перерізу сталевих балок протилежні експлуатаційним: нижні волокна балки стискалися, а верхні розтягувалися.

На *другій стадії* виготовлення виконувалося заповнення бетоном внутрішньої порожнини U-подібної сталевих частини стержня (рис. 1, б). Під час бетонування та на період набору бетоном проектної міцності домкрати під сталевими балками залишалися. Тобто напружено-деформований стан сталевих балок не змінювався у порівнянні із першою стадією (нижні волокна були стиснуті, а верхні розтягнуті), а деформації нормального перерізу в бетоні рівні нулю. Для забезпечення подальшої сумісної роботи сталевих та бетонних частин перерізу, заздалегідь до внутрішньої сторони сталевих частини перерізу були приварені анкерні засоби (рис. 2).

На корисне навантаження (*третьою стадією*) комбінований сталезалізобетонний переріз працював сумісно (рис. 1, в). У бетонній частині деформації розвивалися від недеформованого (нульового) стану, у той час у сталевій частині деформації нормального перерізу накладалися на вже існуючі протилежні експлуатаційним

деформації, отримані на першій стадії роботи комбінованої конструкції. Тобто під час збільшення експлуатаційного навантаження сталеві частини балки спочатку поверталася у початковий недеформований стан і лише потім деформувалася по загальноприйнятій схемі: нижні волокна балки розтягувалися, а верхні стискалися.

Власне створенням попередніх вигинів, протилежних експлуатаційним, пояснює підвищення несучої здатності попередньо напружених таким чином сталобетонних конструкцій. Слід відмітити, що підбором оптимальних параметрів попереднього вигину сталевих частин балок та раціональним співвідношенням жорсткостей сталевих і бетонних частин досягнуто значного підвищення не тільки жорсткості сталобетонного стержня, а й його несучої здатності [10].

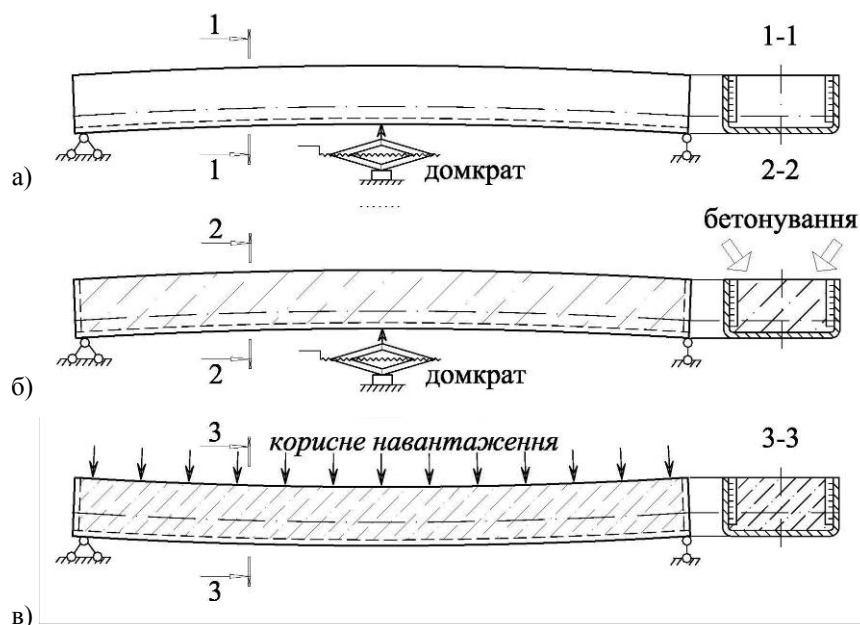
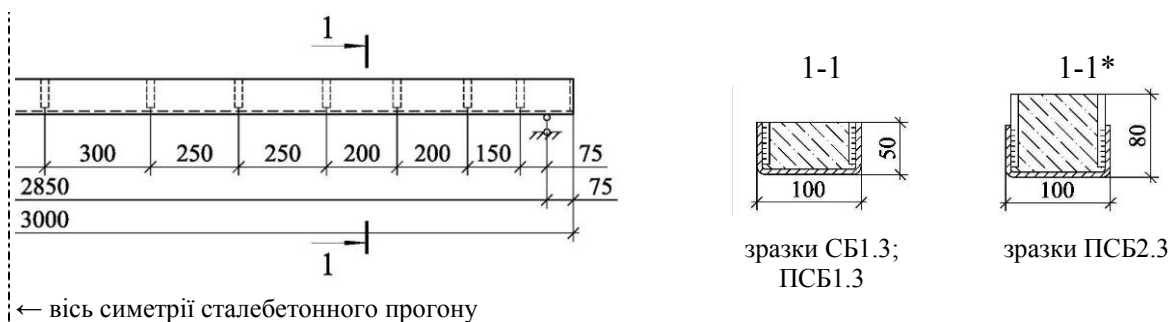


Рисунок 1 – Схеми створення попередньо напруженого сталобетонного прогону: а) сталевий елемент; б) перетворення сталевих елементів у сталобетонні; в) сталобетонний елемент

Джерело: розроблено автором

Конструкція експериментально досліджених попередньо напружених сталобетонних прогонів. Зразки попередньо напружених сталобетонних прогонів виготовлялися із сталевих гнутих швелерів №10 довжиною 3000 мм із зовнішнім габаритом перерізу 50×100 мм і товщиною стінки 3 мм із заповненою бетоном внутрішньою U-подібною порожниною. Попередньо напружені сталобетонні зразки, що були випробувані на косий згин, відрізнялися розміром поперечного перерізу (рис. 2). Зразки СБ1.3 і ПСБ1.3 заповнювалися бетоном в рівень із пером полиць швелера; загальна висота їх поперечного перерізу була рівна 50 мм, коефіцієнт армування склав 11,4% (розріз 1-1 на рис. 2). Зразки ПСБ 2.3 заповнювалися бетоном на 30 мм вище від рівня пера полиць швелера; загальна висота їх поперечного перерізу була рівна 80 мм, коефіцієнт армування склав 7,3% (розріз 1-1* на рис. 2). Для визначення ефективності виконання попереднього напруження сталевих частин перерізу були виготовлені зразки СБ1.3. Попередній вигин зразків рівний 10 мм, що складає $1/300$ величини прольоту. Для визначення ефективності заповнення бетоном внутрішньої порожнини швелера були виготовлені та випробувані пусті сталеві зразки С1.3. Схема планування експериментальних досліджень показана на рисунку 3.

Зразки С1.3, СБ1.3, ПСБ1.3 і ПСБ2.3 завантажувалися двома зосередженими силами по центру прольоту у взаємно перпендикулярних площинах (рис. 4).



← вісь симетрії сталобетонного прогону

Рисунок 2 – Геометричні параметри дослідних однопролітних сталобетонних прогонів

Джерело: розроблено автором

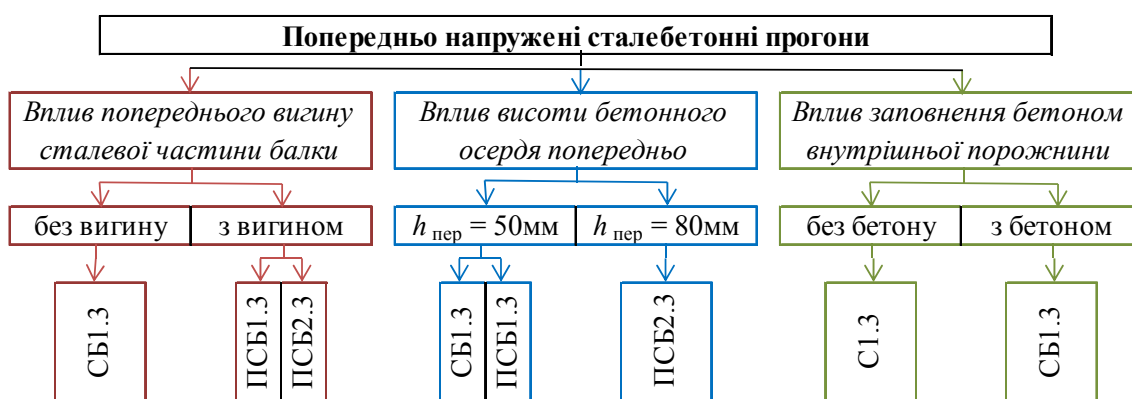


Рисунок 3 – Схема планування експериментальних досліджень сталобетонних прогонів

Джерело: розроблено автором

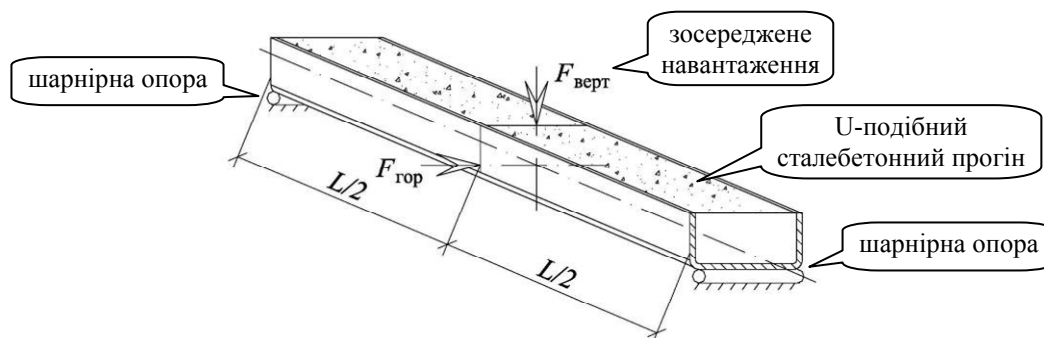


Рисунок 4 – Схема завантаження дослідних сталобетонних прогонів

Джерело: розроблено автором

Бетон заповнення внутрішньої порожнини та U-подібна сталева частина сталобетонних прогонів поєднувалися в сумісну роботу за допомогою вертикальних арматурних стержнів класу А240С діаметром 6 мм довжиною 40 мм, що були приварені до внутрішньої сторони бокових полиць швелера із змінним кроком, показаним на рисунку 2. Крім цього, з метою заборони зсуву двох шарів один відносно одного по торцях балок були наварені пластини товщиною 4 мм. Тому досліджені сталобетонні прогони можна розглядати як двошарові композитні конструкції із жорстким поєднанням в сумісну роботу двох шарів (сталі та бетону).

Фізико-механічні характеристики використаних матеріалів для виготовлення зразків попередньо напружених сталобетонних прогонів (листової і круглої сталі та бетону) наведені у відповідних таблицях [10].

Методика проведення експериментальних досліджень попередньо напружених сталобетонних прогонів. Після набору бетоном проектної міцності, знімався домкрат (рис. 1), за допомогою якого створювався попередній вигин сталеві частини балки. На рисунку 5 показаний загальний вигляд сталобетонних прогонів під час проведення випробувань із вказуванням вузла прикладення навантаження.

Відносні поздовжні деформації сталі та бетону вимірювалися в зоні дії максимального згинального моменту (посередині прольоту) та на відстані 0,25 довжини прольоту від опор за допомогою електротензорезисторів з базою 20 мм (рис. 6). Для контролю деформацій в найбільш стиснутих і розтягнутих волокнах зразка були встановлені механічні тензометри Гугенбергера базою 20 мм із ціною поділки 0,005 мм, що забезпечило точність вимірювань відносних деформацій 25×10^{-5} . Для вимірювання прогинів посередині прольоту та на відстані 0,25 довжини прольоту від опор використовувалися індикатори годинникового типу [10].

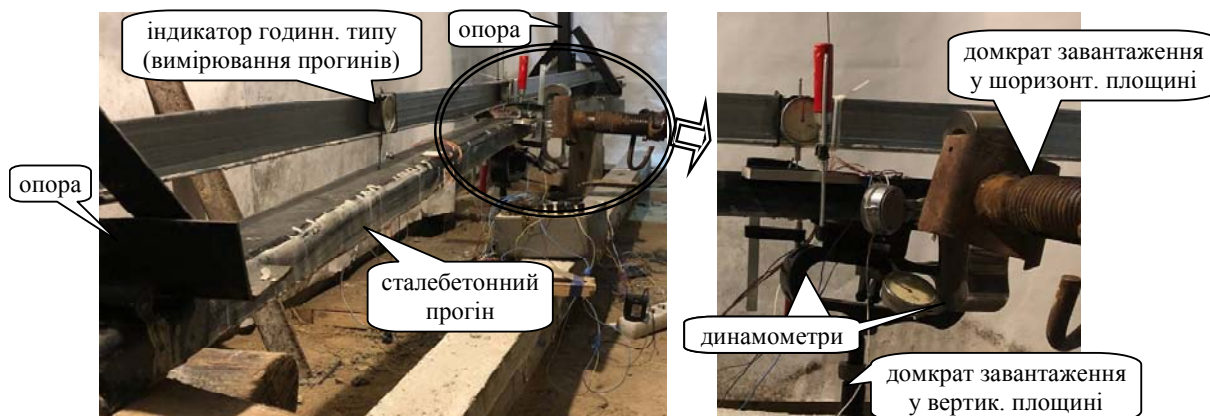


Рисунок 5 – Загальний вигляд сталобетонних прогонів під час проведення випробувань

Джерело: розроблено автором

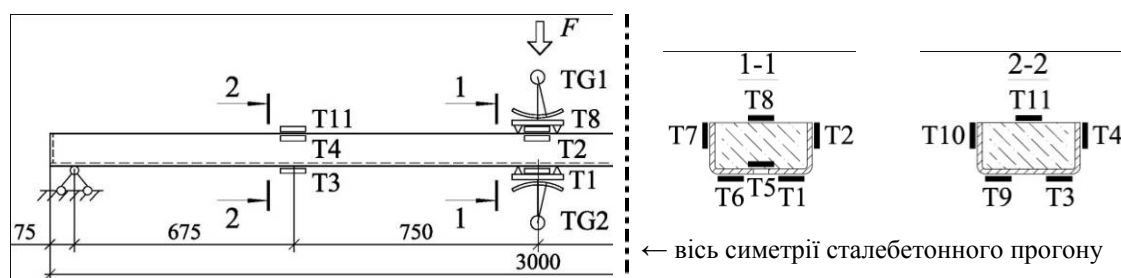


Рисунок 6 – Схема розташування вимірювальних приладів на досліджуваних зразках

Джерело: розроблено автором

Результати експериментальних досліджень попередньо напружених сталобетонних прогонів. На рисунку 7 показано зміни розподілів відносних деформацій нормального перерізу 1-1, розташованого посередині прольоту, сталеві частини досліджених зразків чотирьох груп (рис. 3). Як було зазначено, зразки завантажувалися двома силами посередині прольоту у взаємоперпендикулярних площинах, тому вони працювали в умовах косоного згину. Для наглядного порівняння розвитку відносних деформацій у перерізі 1-1, розподіли відносних деформацій показані по всій площині цього перерізу. Для визначення ефективності

запропонованого попереднього напруження сталеві частини перерізу до її бетонування виконано порівняння розвитку відносних деформацій нормального перерізу та прогинів всіх зразків (рис. 8).

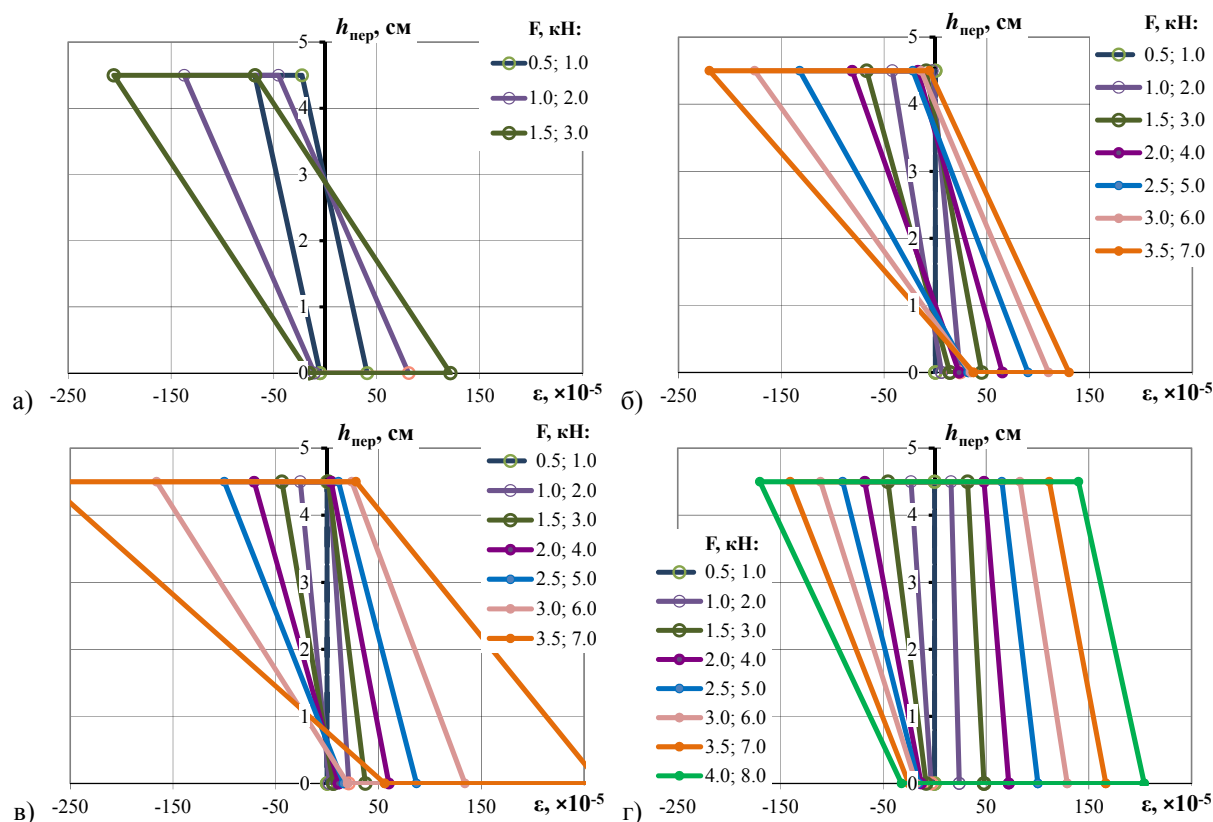


Рисунок 7 – Розподіли відносних деформацій нормального перерізу 1-1 сталобетонних балок:

а) серія С1.3; б) серія СБ1.3; в) серія ПСБ1.3; г) серія ПСБ2.3

Джерело: розроблено автором

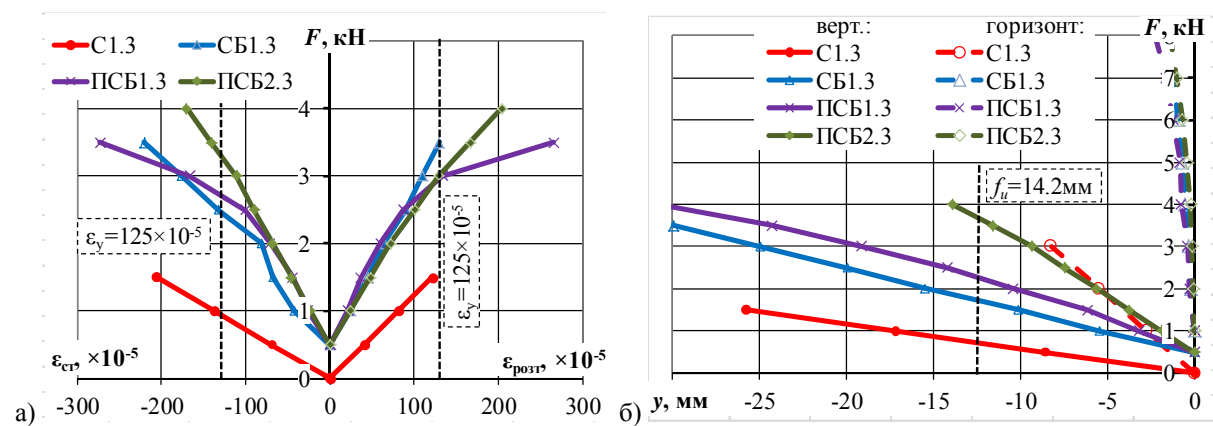


Рисунок 8 – Порівняння розвитку відносних деформацій нормального перерізу сталеві частини (а) та прогинів (б) сталобетонних зразків, завантажених двома силами у взаємоперпендикулярних площинах

Джерело: розроблено автором

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень напружено-деформованого стану та несучої здатності попередньо напружених сталобетонних стінових прогонів, що виготовлені із гнутих швелерів №10 з товщиною стінки 3 мм довжиною 3000 мм із заповненою бетоном U-подібною порожниною та працюють в умовах косою (двовісного) згину, встановлено наступне:

– шляхом заповненням бетоном внутрішньої порожнини сталеві U-подібної частини перерізу можливо фіксувати її попередньо напружений (попередньо вигнутий) стан. Після набору бетоном міцності та відпуску домкрату попередній вигин зменшується на 81% для зразків із заповненням бетоном в рівень з перами швелеру і на 31% для зразків із заповненням бетоном на 30 мм (в 1,6 рази) вище від рівня пера полицок швелера;

– заповнення внутрішньої порожнини швелера бетоном підвищує до 2 раз несучу здатність і жорсткість сталобетонних прогонів, що працюють на косий згин;

– попередній вигин сталеві частини перерізу сталобетонного прогону, що працює на косий згин, підвищує його несучу здатність до 10% та жорсткість до 25%;

– збільшення в 1,6 рази висоти перерізу бетонного осердя попередньо напруженого сталобетонного прогону, що працює на косий згин, підвищує його несучу здатність до 33% та жорсткість до 60%.

Таким чином, експериментально досліджені попередньо напружені сталобетонні прогони, що складаються із гнучого швелеру №10 з товщиною стінки 3 мм заповненого бетоном та працюють на косий згин (при умові, що горизонтальне навантаження вдвічі більше за вертикальне) мають практично таку ж несучу здатність при вищій до 67% жорсткості, як, наприклад, сталевий прогін, виконаний із труби 80×3 мм, що дозволяє зменшити витрати сталі на 38,5%.

Список літератури

1. Бобало Т.В. Порівняння результатів експериментального дослідження сталобетонних балок із комбінованим армуванням з результатами розрахунку за діючими національними нормами. *Архітектура і сільськогосподарське будівництво: Вісник НАУ*. 2012. № 13. С. 34-43.
2. Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф. Вплив параметрів перерізу на несучу здатність сталобетонних конструкцій. *Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр.* 2012. Вип. 3 (33). С. 30-34.
3. Гарькава О.В., Гасенко А.В. Визначення міцності залізобетонних колон при косому стиску. *Наука та будівництво*. 2017. Т.14, № 4. С. 29-35.
4. Гасенко А.В., Новицький О.П., Пенц В.Ф. Реконструкція багатоповерхових промислових будівель під доступне житло із використанням ресурсозберувальних конструктивних рішень. *Зб. наук. пр. Вісник НУВГП, серія Технічні науки*. 2021. № 2 (94). С. 27-40. <https://doi.org/10.31713/vt220214>
5. Дяченко Є.В. Розрахунок міцності косозігнутих залізобетонних елементів з урахуванням повної діаграми фізичного стану бетону: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 / ПНТУ імені Юрія Кондратюка, Полтава. 2006. 159 с.
6. Кочкаръов, Д. В. (2017). Інженерні методи розрахунку залізобетонних статично невизначених стержневих систем. *УкрДУЗТ : зб. наук. пр.* Вип. 170. С. 98-104.
7. Al-Kaimakchi A., Rambo-Roddenberry M. Structural behavior of concrete girders prestressed and reinforced with stainless steel materials. *Structures*. 2021. Vol. 35(11). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.134>
8. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Hasenko A.V., Andriiets K.I. Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 77. С. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92>
9. Pavlikov A.M., Mykytenko S.M., Hasenko A.V. Effective structural system for the construction of affordable housing. *International Journal of Engineering & Technology: Publisher of International Academic Journals*. 2018. Vol. 7, № 3.2. Pp.291-298. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14422>
10. Semko O.V., Hasenko A.V., Drobtia O.V., Marchenko D.P. Experimental studies of prestressed steel concrete wall girders. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2022. Vol. 2 (59). Pp. 24-32. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.2876>
11. Wang C., Shen Y., Yang R., Wen Z. Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2017. Pp. 6, 1467940. <https://doi.org/10.1155/2017/1467940>

References

1. Bobalo, T.V. (2012). Porivnyannya rezul'tativ eksperymental'noho doslidzhennya stalebetonnykh balok iz kombinovanykh armuvannyam z rezul'tatamy rozrakhunku za diyuchymy natsional'nymy normamy [Comparison of the results of an experimental study of reinforced concrete beams with combined reinforcement with the results of calculation according to the current national standards]. *Arkhitektura i sil's'kohospodars'ke budivnytstvo: Visnyk NAU – Architecture and agricultural construction: Bulletin of NAU*, 13, 34-43 [in Ukrainian].
2. Vatulya, H.L., Orel, E.F. (2012). Vplyv parametriv pererizu na nesuchu zdattist' stalebetonnykh konstruksiy. *Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo : zb. nauk. pr. – Influence of cross-section parameters on the load-bearing capacity of reinforced concrete structures. Industrial engineering, construction: coll. of science Ave.*, 3 (33), 30-34 [in Ukrainian].
3. Har'kava, O.V., Hasenko, A.V. (2017). Vyznachennya mitsnosti zalizobetonnykh kolon pry kosomu stysku [Determination of the strength of reinforced concrete columns under oblique compression]. *Nauka ta budivnytstvo - Science and construction*, 4 (14), 29-35 [in Ukrainian].
4. Hasenko, A.V., Novyts'kyy, O.P. & Pents V.F. (2021). Rekonstruktsiya bahatopoverkhovykh promyslovykh budivel' pid dostupne zhytlo iz vykorystannyam resursozberezhuval'nykh konstruktivnykh rishen' [Reconstruction of multi-story industrial buildings for affordable housing using resource-saving structural solutions. Coll. of science Ave]. *Zb. nauk. pr. Visnyk NUVHP, seriya Tekhnichni nauky – Bulletin of the NUVHP, Technical Sciences series*, 2 (94), 27-40. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31713/vt220214>
5. Dyachenko, Ye.V. (2006). Rozrakhunok mitsnosti kosozihnutykh zalizobetonnykh elementiv z urakhuvannyam povnoyi diahramy fizychnoho stanu betonu [Calculation of the strength of obliquely bent reinforced concrete elements taking into account the complete diagram of the physical state of concrete]. *Candidate's thesis. PNTU imeni Yuriya Kondratyuka, Poltava* [in Ukrainian].
6. Kochkar'ov, D.V. (2017). Inzhenerni metody rozrakhunku zalizobetonnykh statychno nevyznachnykh sterzhnevyykh system [Engineering methods of calculating reinforced concrete statically indeterminate rod systems]. *UkrDUZT : zb. nauk. pr. – UkrDUZT: coll. of scient. papers*, 170, 98-104. [in Ukrainian].
7. Al-Kaimakchi, A. & Rambo-Roddenberry, M. (2021). Structural behavior of concrete girders prestressed and reinforced with stainless steel materials. *Structures*, 35(11) [in English].
8. Pavlikov, A.M., Harkava, O.V., Hasenko, A.V. & Andriets, K.I. (2019). Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 77, 84-92 [in English].
9. Pavlikov, A.M., Mykytenko, S.M. & Hasenko, A.V. (2018). Effective structural system for the construction of affordable housing. *International Journal of Engineering & Technology: Publisher of International Academic Journals*. 7, 3.2, 291-298. [in English]. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14422>
10. Semko, O.V., Hasenko, A.V., Drobotia, O.V., Marchenko, D.P. (2022). Experimental studies of prestressed steel concrete wall girders. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2 (59), 24-32. [in English]. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.2876>
11. Wang, C., Shen, Y., Yang, R. & Wen, Z. (2017). Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 6, 1467940 [in English]. <https://doi.org/10.1155/2017/1467940>

Olexander Drobotia, graduate student

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

Experimental Tests of Prestressed Load-Bearing Elements of Fencing Structures Made of Cold-Formed Steel Profiles for Oblique Bending

Wall purlins serve as load-bearing elements of the light external wall girders of buildings. Structurally, such wall girders are horizontal beam elements. The external load on the wall girders is the vertical load from the own weight of the wall enclosure and the horizontal wind load. Thus, wall girders work for bending in two planes or the so-called oblique bending. The wide application of elements operating in conditions of oblique bending requires a comprehensive theoretical and experimental study of their operation. The load from the own weight of the wall enclosure, made of light sandwich panels, is approximately equal to the wind load on the territory of Ukraine. Therefore, in this case, the wall girders are designed with equal strength in two planes.

To find out the real operation of obliquely bent elements, it is necessary to determine all the parameters that can affect the picture of the destruction of such elements. The purpose of the work is to study experimentally the possibility of applying pre-stressing in one plane of reinforced concrete girders with reduced metal capacity in this plane. The subject of the study is the stress-strain state and bearing capacity of a reinforced concrete rod prestressed in this way. The investigated steel-concrete girders were made of bent channel No. 10 with a wall

thickness of 3 mm, the inner cavity of which was filled with concrete of class C20/25. Before concreting the inner cavity, a preliminary bending of the steel profile opposite to the operational one was carried out.

The magnitude of the previous bending of the steel profile compensated for its reduced geometric characteristics in this plane. The use of a pre-stressed trough-shaped steel profile in the form of a bent channel No. 10 with a wall thickness of 3 mm for a wall run, followed by its concreting, allows you to reduce steel consumption by up to 38,5% compared to, for example, the use of an 80×3 mm pipe of the same bearing capacity for a run.

wall girders, reinforced concrete, pre-stressing, experimental tests, oblique bending

Одержано (Received) 11.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 19.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023