

УДК 624.014.2

doi:10.31650/2707-3068-2023-27-94-103

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТІНКИ СТАЛЕВОГО СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВОГО СИЛОСУ

Пічугін С.Ф., д.т.н., професор,
pichugin.sf@gmail.com ORCID: 0000-0001-8505-2130,

Шульгін В.В., к.т.н., доцент
Shwlad17@gmail.com ORCID 0000-0002-2573-8402

Оксененко К.О., аспірант
shvadchenkokate@gmail.com ORCID 0000-0002-5171-3583

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Анотація. Наведено інформацію щодо найпоширеніших типів металевих силосів за конструкцією корпусу. Розглянуто конструкцію сталевих спіральних-фальцевих силосів. Проаналізовано специфіку конструкції спіральних-фальцевих силосів, яка впливає на їх напружено-деформований стан. Наведено характеристики силосу, з якого були взяті зразки для проведення експерименту. Розглянуто зразки та обладнання для експериментального дослідження стінки сталевих спіральних-фальцевих силосів. Виявлено характер деформації міжфальцевої зони та характер розкриття фальцевого замка при дії згинаючого навантаження. Зроблено аналіз отриманих результатів експериментального дослідження.

Ключові слова: металевий силос, спіральний-фальцевий силос, фальцевий замок, напружено-деформований стан

Вступ. Україна є одним з лідерів в світовому аграрному експорті. Станом на початок 2022 р. Україна могла зберігати близько 50-60 млн тонн зерна. У реаліях воєнного стану агропромисловий комплекс України зазнає значних втрат. Станом на травень 2022 р. Україна вже втратила майже 13 млн. т елеваторних потужностей, частина зерноскладів повністю зруйнована, частина опинилася на окупованих територіях. В зв'язку з цим постає необхідність в елеваторних потужностях, а саме в швидкокомонтуючих, економічних ємностях. У таких ємностях широко застосовуються оболонки обертання, що є однією з найефективніших несучих конструкцій, перевагою якої є економія матеріалів і зменшення ваги конструкції. Циліндричні оболонки використовуються в багатьох сферах завдяки своїй особливій геометричній конфігурації. Одними з найрозповсюдженіших прикладів таких споруд є силоси. Інноваційна конструкція легких, індустриальних силосів – це металеві силоси спіральних-фальцевого типу. Ці конструкції знаходяться під дією багатьох навантажень, як звичайних для більшості промислових споруд (вага від обладнання, власна вага, вітер, сніг), так і специфічних (тиск сипучих матеріалів, реактивний опір ґрунту, визваний вагою цих сипучих матеріалів). Навантаження від тиску сипучих матеріалів досягають значних величин, тому їх вплив у більшості випадків є вирішальним. Величина тиску на ґрунт при завантаженні та вивантаженні може швидко змінюватись, що створює додаткові особливості роботи споруди та її основи. Під час експлуатації металевих ємностей є вірогідність виникнення відмови конструкції в зв'язку з руйнуванням стінки.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Дослідженнями роботи та аналізом конструкцій металевих силосів займається велика кількість науковців. Дж.Р. МакКалмонт одним з перших класифікував силоси та розглянув їх особливості [1]. Великий вклад зробили Ротер М. та Гейлорд Е., у своїх книгах [2 – 3] вони надають детальну інформацію стосовно конструкцій силосів, навантажень та впливів на ємності, описують розрахунки конструкційних елементів та характеристики сипучих матеріалів, які на них впливають. Блайт Г., Кебелі Х., Моланда М., Ханьхуа Ю., Чангв З. [4 – 8] присвятили свої роботи

експериментальним дослідженням впливу тиску сипучих матеріалів, в залежності від їх характеристик, на оболонки гладких та гофрованих металевих силосів. Догангун А. у своїй роботі дослідив випадки руйнування силосних ємностей, зробив огляд поширених помилок при розрахунках, які можуть призвести до аварії конструкції [9]. Сінгер Дж. та Роузен А. [10] досліджували вплив ексцентричних навантажень, геометричних дефектів і граничних умов від навантаження на деформації посиленіх циліндричних оболонок. Дас П. та ін. в роботі [11] описали поведінку циліндричних оболонок при комбінованому навантаженні разом з аналізом надійності. Пастернак Г. та інші розглянули розвиток теорії стійкості оболонки та представили огляд поточного стану та тенденцій дослідження стійкості посиленої циліндричної оболонки [12].

Виділення не роз'язаних раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на велику кількість наукових робіт, спірально-фальцеві силоси є не дослідженими. Відсутність експериментальних досліджень елементів цих сталевих листових конструкцій стримує їх розвиток на території України. **Постановка завдання.** Завданням цієї статті є опис й аналіз результатів експериментальних досліджень напружено-деформованого стану стінки металевого спірально-фальцевого силосу.

Основний матеріал і результати. Існує велика кількість конструктивних рішень металевих силосів [13]. Поширеними конструкціями за типом корпусу є панельні силоси, виготовлені із гофрованих або гладких панелей, з'єднаних між собою за допомогою болтів, та зварні силоси. Однак в даний час зростання вартості матеріалів викликає потребу в зменшенні матеріалоемності конструкції, що спонукає виробників циліндричних силосів до пошуку нових типів конструкції оболонок.

Застосування силосів, що складаються з тонких оболонок з міцними кільцевими ребрами жорсткості, дозволяє їх конструкціям адекватно відповідати типовим навантаженням та бути економічно обґрунтованими. Прикладом такого типу конструкції є спірально-фальцеві силоси (рис.1).

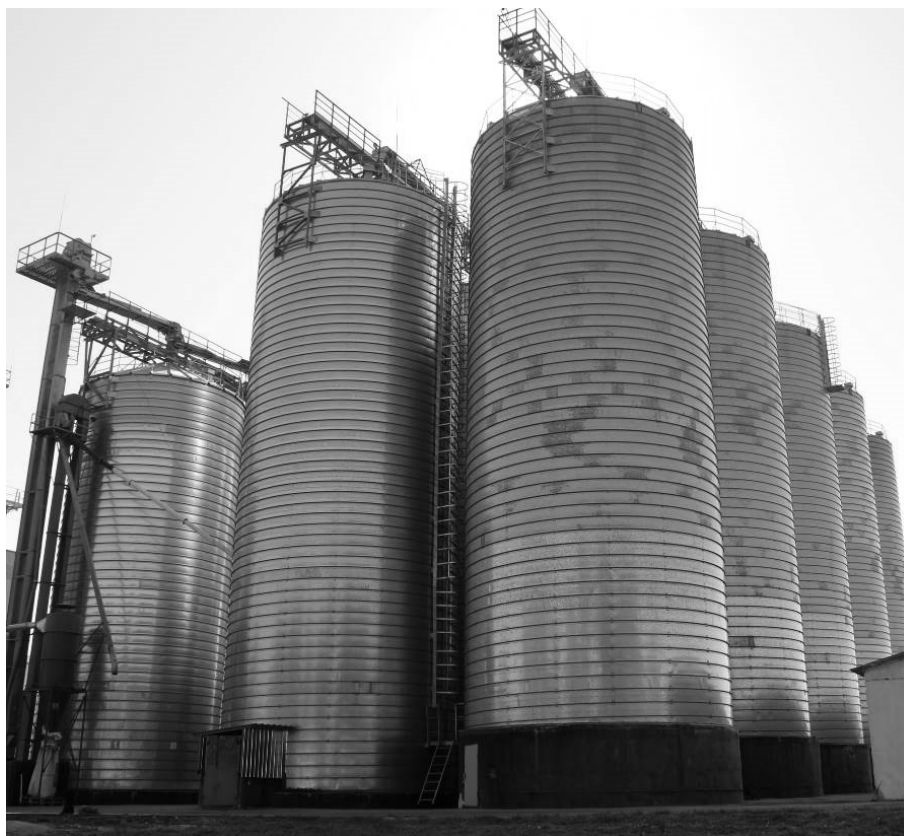


Рис. 1. Спірально-фальцеві силоси

Корпус силосу являє собою систему спірального з'єднання сталеві стрічки шляхом подвійного вальцювання з одночасним формуванням фальцевого ребра замкнутого типу. Фальцевий замок розташований зовні стінки силосу під незначним кутом до горизонтальної площини й утворює кільцеві ребра. Технологія була винайдена німецьким вченим Ксавером Ліппом у 1968 р. [14]. Протягом десяти років вивчення і дослідження на практиці ця технологія успішно зарекомендувала себе, і з початку 70-х років почалося великомасштабне виробництво оцинкованих сталевих силосів такого типу.

Конструкція стінки силосів спірально-фальцевого типу суттєво відрізняється від зварних та традиційних металевих збірних силосів із гофрованих панелей на болтових з'єднаннях. Головна специфіка спірально-фальцевих силосів полягає в наявності ребра фальцевого типу [15].

Основні особливості конструкції спірально-фальцевого силосу, які впливають на їх напружено-деформаційний стан, полягають в наступному.

- Ребра розміщуються по спіралі, але під незначним кутом нахилу витка, близько 1° .
- Вказані ребра фальцевого типу працюють в умовах складного напруженого стану. Вони не тільки підвищують жорсткість конструкції оболонки силосу на розтяг та згин в кільцевому напрямку, але в той же час знижують жорсткість конструкції уздовж твірної за рахунок закруглень в місцях переходу стінки оболонки в переріз ребра. Поздовжні зусилля, які утворюються в стінці циліндричної оболонки в місцях розміщення ребер, передаються з верхньої частини на нижню з ексцентриситетом, який призводить до додаткової деформації, як в стінці оболонки, так на міжфальцеву зону.
- З огляду на вказані особливості, жорсткість та піддатливість фальцевого ребра, як стикового елемента фальцевого типу, суттєво відрізняється при стиску та розтягу оболонки силосу уздовж формуючої, що в ряду випадків зовнішніх впливів, наприклад, від вітрового навантаження, потребує розгляду розрахунку оболонки як конструктивно-нелінійної системи.

У лабораторії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (атестат акредитації № 20174 від 11 червня 2020 р.) було проведено експериментальне дослідження роботи фальцевого ребра під час розтягування. Дослідження показало, що характер роботи фальця до руйнування в основному відповідає позаграничному стану оболонки спірально-фальцевого силосу і підтвердило його надійність при дії можливих підвищених аварійних навантажень [16].

Найпоширенішим видом руйнування стін спірально-фальцевих силосів є руйнування від згину, яке, як правило, є раптовим і часто призводить до катастрофічних аварій. Причинами згину стінки спірально-фальцевих силосів є: нещільне обтиснення фальцевого з'єднання, тріщини у фальцах, які виникають із-за недостатньої пластичності сталі, початковий прогин міжфальцевої зони, який може виникнути в процесі монтажу.

Для виявлення характеру роботи стінки спірально-фальцевого силосу на згин було проведено експериментальне дослідження. Мета дослідження – експериментально встановити зміну деформацій фальцевого з'єднання у процесі навантаження та визначити напружено-деформований стан стінки силосу на етапах згину.

Для експериментального дослідження був взятий елемент стінки спірально-фальцевого силосу для зберігання тріски деревини. Фрагмент стінки силосу, який був розділений на експериментальні зразки (рис.2, а), був отриманий при влаштуванні технологічного отвору для монтажу воріт. Габарити силосу – діаметр 8 м, висота корпусу 17 м, загальний об'єм зберігання матеріалу 650 м^3 . Кількість зразків – 10 шт.

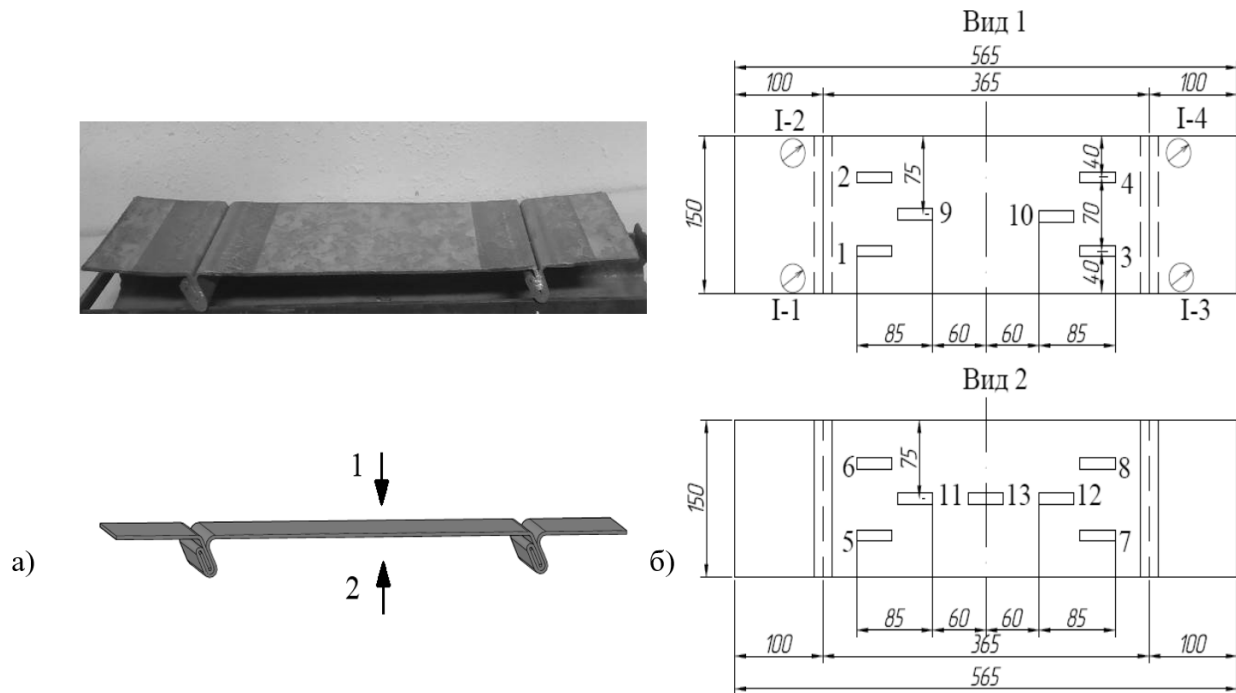


Рис. 2. Експериментальний зразок: а – загальний вигляд;
 б – розташування та нумерація тензодатчиків та індикаторів на зразках;
 1 - 13 – тензорезистори; I-1 - I-4 – індикатори годинникового типу

Характеристики зразка - марка сталі – DX51D+Z1400, механічні характеристики сталі: границя плинності сталі $\sigma_T = 251 \text{ МПа}$; межа міцності на розтяг $R_m = 320 \text{ МПа}$, залишкове відносне видовження після розриву $A = 16\%$ [17]. Ширина зразка – 150 мм, довжина – 565 мм, товщина – 4 мм. Ширина зразка прийнята з умови надійного закріплення у випробувальній машині, довжина – з умови надійного закріплення, а також можливості виміряти прогини міжфальцевої зони стінки силосу та визначити величину та характер розкриття фальцевих замка від згину. Зразок був нерухомо закріплений на металевій траверсі, для відповідності випробування елемента стінки роботі в складі оболонки.

Для визначення величини розкриття фальцевого замка використовувалися індикатори годинникового типу з ціною ділення 0,01 мм. Для отримання експериментальних значень відносних деформацій стінки силосу, на експериментальні зразки були наклеєні 13 електричних тензорезисторів з базою 20 мм. Схема наклеювання тензорезисторів наведена на рис. 2, б. Показання з тензорезисторів знімалися за допомогою автоматичного вимірювача деформацій АД-4. Для вимірів прогину зразка на кожному ступені навантаження застосовувався прогиномір з ціною ділення 0,01 мм.

Загальний вигляд експериментального зразка у випробувальній машині зображено на рис. 3.

Етапи експерименту: закріплення зразка у випробувальній машині (рис. 3), ступеневе навантаження зразка, збір даних з індикаторів годинникового типу та прогиноміру, фіксація деформацій тензорезисторів на кожному ступені навантаження.

Навантаження зразків виконувалось центральним згинаючим навантаженням, яке прикладалося в статичному режимі в межах від 0 кН до 5,5 кН. Для вимірювання залишкових деформацій, після кожного етапу навантаження конструкція розвантажувалась.



Рис. 3. Експериментальний зразок у випробувальній машині:
 а – загальний вигляд;
 б – вигляд до навантаження; в – вигляд після навантаження.

Характер прогину зразка у міжфальцевій зоні показаний на графіку (рис. 4).

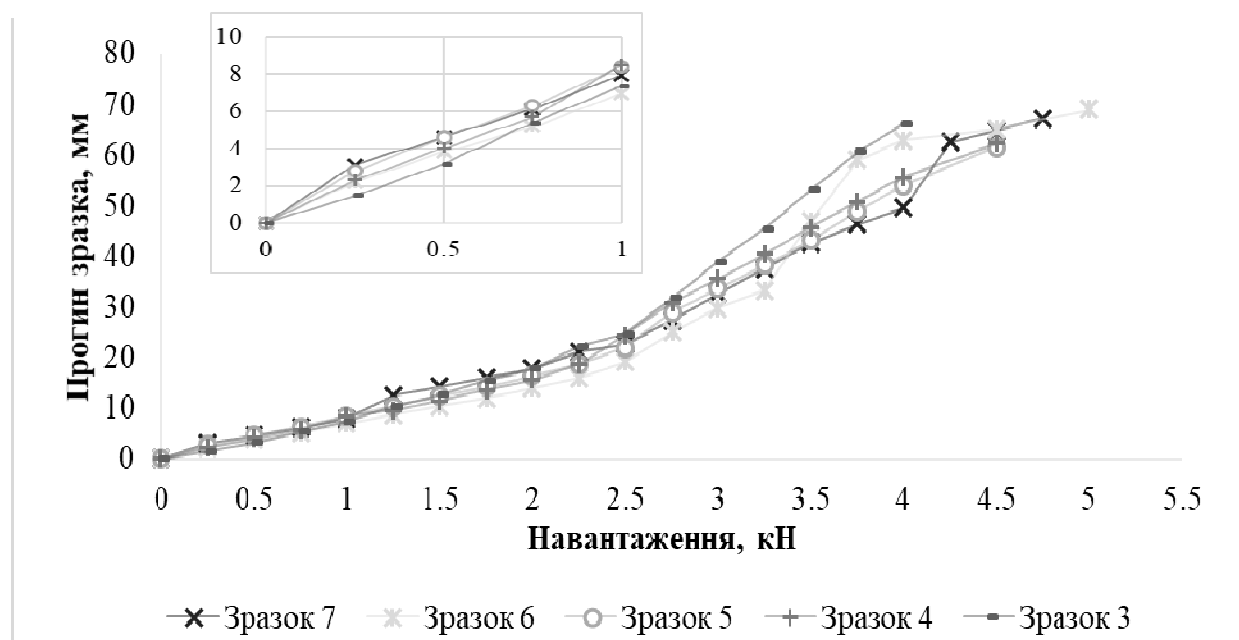


Рис. 4. Характер прогину зразка у міжфальцевій зоні

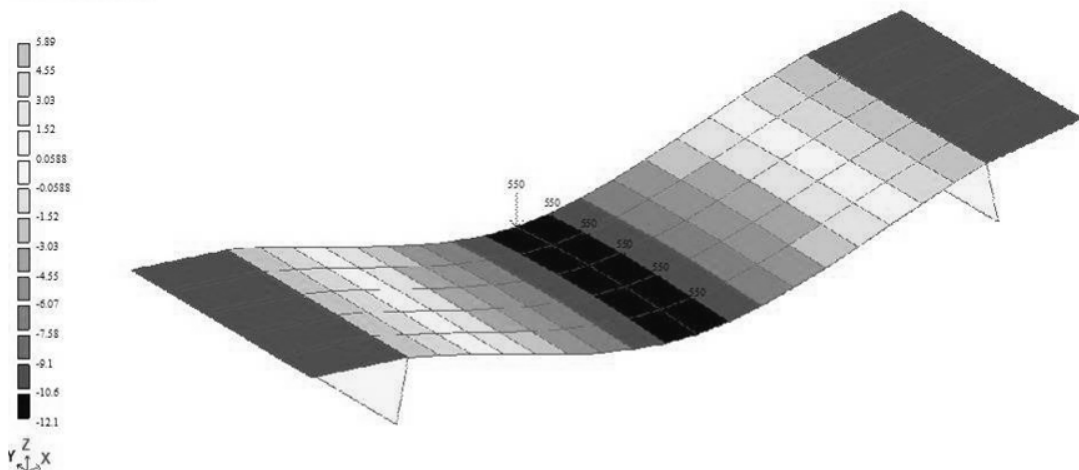
Для загального розуміння діапазону експериментально прикладеного навантаження відмітимо, що експериментальне навантаження $P=1\text{кН}$ відповідає рівномірно розподіленому навантаженню $q=5,4\text{ тс/м}^2$. Наприклад, для силосу діаметром 8 м та висотою 20 м нормальний горизонтальний тиск відповідає значенню $P_h^n = 3,5\text{ тс/м}^2$. Таким чином, експлуатаційні навантаження відповідають початковій стадії експериментального дослідження. Виявлений характер прогину зразка до руйнування в основному відповідає позаграничному стану оболонки спірально-фальцевого силосу.

Отримані результати було порівняно з аналітичними розрахунками, які проводились в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Для розрахунку були задані параметри експериментального зразка. Стінка силосу змодельована плоскими оболонковими СЕ типу 44 «чотирикутний елемент оболонки», які встановлені у вертикальній площині. Фальцеве ребро змодельоване СЕ типу 5 «просторовий стрижень» (рис. 5). Для відповідності розрахункової моделі до експерименту, її кінці було защемлено.



а)

Завантаження 11
М оскільки напрямлений по Мх
Единиця вимірювання - (кН*см)/см



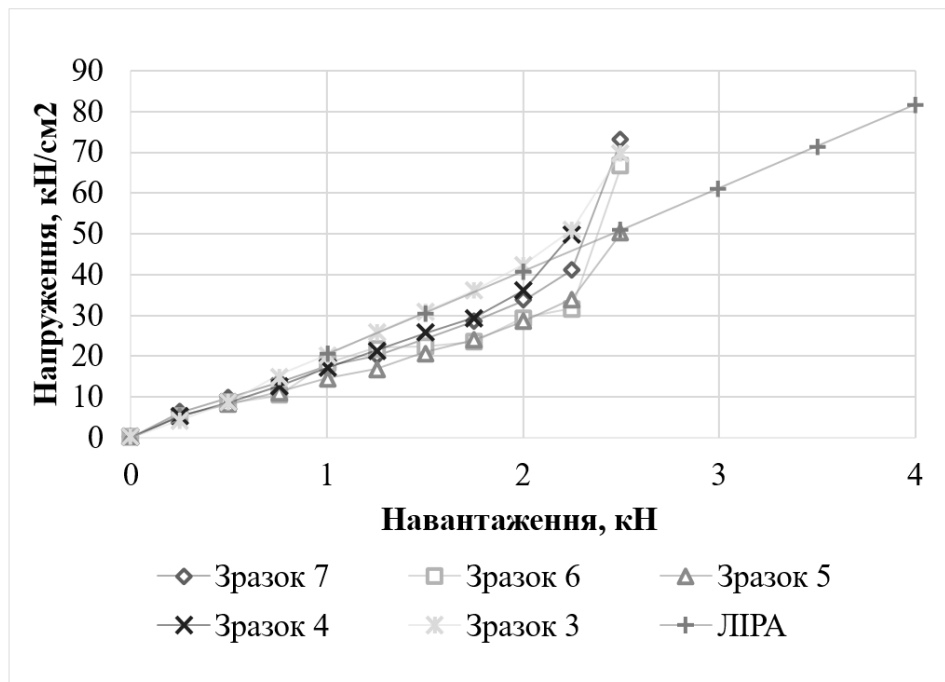


Рис. 6. Графік залежності напруження від навантаження у міжфальцевій зоні

Графік показує, що в діапазоні навантажень від 0 до 1 кН результати експериментальних досліджень відповідають чисельному розрахунку в ЛПРІ-САПР. При збільшенні навантаження напруження за розрахунком ЛПРІ-САПР більші за експериментальні, це пояснюється збільшенням розкриття фальцевого замка, що не враховується у комп'ютерній розрахунковій моделі.

Характер розкриття фальцевого замка показаний на графіку (рис. 7).

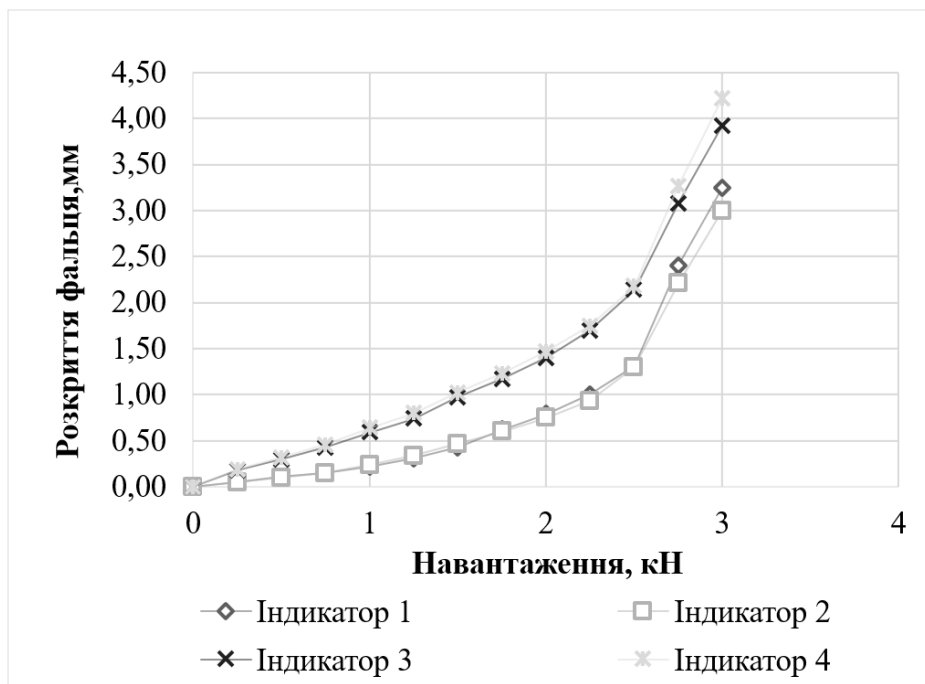


Рис. 7. Характер розкриття фальцевого замка

Випробування виявили, що оскільки фальцеві ребра не є симетричними відносно точки прикладання навантаження (рис. 8, а), на графіку можна відмітити, що розкриття фальцевого

замка, розміщеного над міжфальцевою зоною, більше, ніж фальцевого замка, розміщеного нижче.

На рисунку 8, б показаний графік залежностей напружень від навантаження, дані зібрані з тензорезисторів (рис. 8, а). Як видно на графіку, покази розділені на 3 пучка, чітко виділяються тензорезистори (5,6 та 7,8), які розміщені біля фальців. Тензорезистори 11 та 12 співпали в показах. Практично лінійний характер мають показники тензорезистора 13.

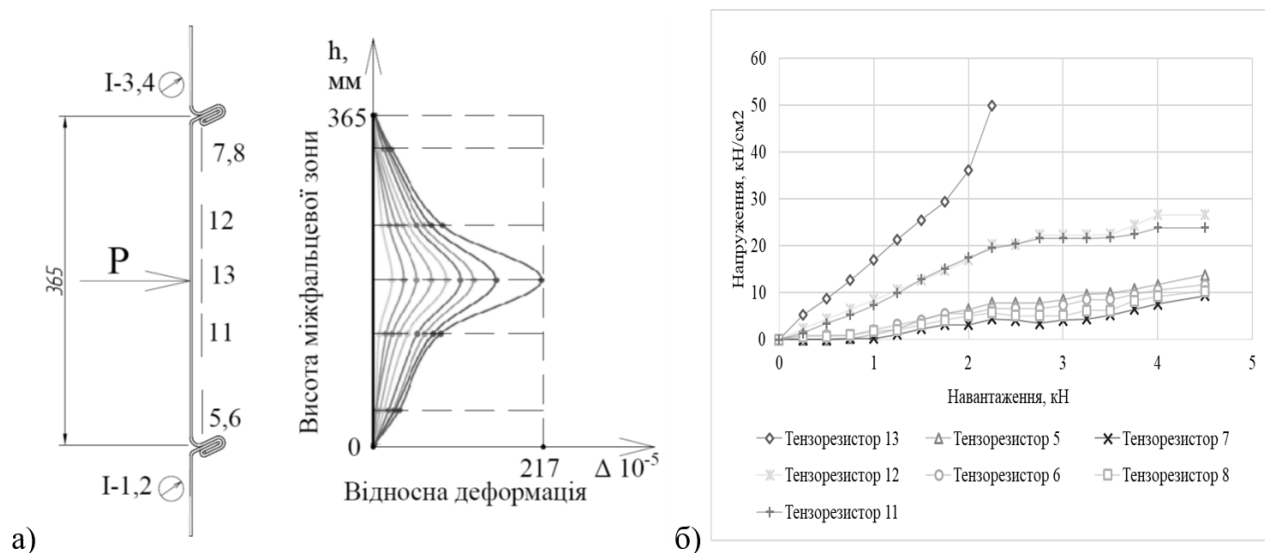


Рис. 8. Напружено-деформований стан елемента стінки: а – епюра деформацій; б – графік напружень.

Висновки. Проведено експериментальну перевірку роботи стінки спірально-фальцевого силосу. Виявлено характер взаємодії та деформування стінки з фальцевим з'єднанням. Оцінено ступінь розкриття фальців. Одержані дані щодо характеру роботи стінки та фальцевого з'єднання в граничному та позаграничному станах. Виконано порівняння експериментальних залежностей з розрахунком за методом скінченних елементів в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Обґрунтовано висновок про надійну роботу стінки спірально-фальцевого силосу при експлуатаційних та підвищених навантаженнях.

Література

1. McCalmont, J. R. Silo types and construction. Washington D.C., 1939. 69 с.
2. Gaylord E.H. Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids / E.H. Gaylord, C.N. Gaylord. – Prentice-Hall, New Jersey, 1984. – 359 с.
3. Rotter M.J. Guide for the economic design of circular metal silos. CRC Press, 2001. 254 с.
4. Blight G.E. Design implications of measured pressures and strains in silos /G.E. Blight // Journal of Structural Engineering. – ASCE, 1992. – vol. 118, №10. – С. 2729-2742.
5. Kebeli H.V. Moisture-induced pressures and loads in grain bins / H.V. Kebeli, R.A. Bucklin, D.S. Ellifritt, K.V. Chau // Transactions of the ASAE. – ASAE, 2000. – Vol. 43, №5. – С. 1211-1221.
6. Molenda M. Comparison of loads on smooth- and corrugated-wall model grain bins / M. Molenda, J. Horabik, I.J. Ross // International Agrophysics. – 2001. – Vol. 15. – С. 95-100.
7. Hanhua Y. A novel prediction method of dynamic wall pressure for silos based on support vector machine/ Zhijun X., Tingting L., Fang Y.// Advances in Civil Engineering. – 2020. – С. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4865628>
8. Changnv Z. The shear strength and dilatancy behavior of wheat stored in silos / Z. Changnv, W. Yuke. // Complexity. – 2019. – С.1 - 9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/1547616>

9. Dogangun A. Cause of damage and failures in silo structures / A. Dogangun, Z. Karaca, A. Durmus, H. Sezen // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. – ASCE, 2009. – Vol. 23, №2. – С. 65-71.
10. Singer, J.; Rosen, A. The influence of boundary conditions on the buckling of stiffened cylindrical shells. In *Proceedings of the IUTAM Symposium on Buckling of Structures*, Cambridge, MA, USA, 17–21 June 1974; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1976, С. 227–250
11. Pasternak, H.; Li, Z.; Juozapaitis, A.; Daniunas, A. Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures: State-of-the-Art Review. *Appl. Sci.* 2022, 12, 11665. <https://doi.org/10.3390/app122211665>.
12. Das, P.K.; Thavalingam, A.; Bai, Y. Buckling and ultimate strength criteria of stiffened shells under combined loading for reliability analysis. *Thin-Walled Struct.* 2003, 41, С. 69–88.
13. Pichugin S., Oksenenko K. Comparative analysis of design solutions of metal silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering.* 2022, 53 (2), С. 54-60 . DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890>.
14. Xaver Lipp [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://xaverlipp.com/>.
15. Pichugin S., Oksenenko K, Hajiyev M., Sulewska M. Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos. January 2021, *E3S Web of Conferences* 280(4):03006. DOI: 10.1051/e3sconf/202128003006.
16. Пічугін С., Дмитренко А., Оксененко К. Експериментальне дослідження елементів конструкції металевих спірально-фальцевих силосів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини.* 2022, 26, С. 135-144.
17. ДСТУ ISO 6892-1:2019 (ISO 6892-1:2016, IDT) Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури.

References

- [1] McCalmont, J. R. Silo types and construction. Washington D.C., 1939. 69 p.
- [2] Gaylord E.H. Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids / E.H. Gaylord, C.N. Gaylord. – Prentice-Hall, New Jersey, 1984. – 359 p.
- [3] Rotter M.J. / Guide for the economic design of circular metal silos / J.M. Rotter. – CRC Press, 2001. – 254 p.
- [4] Blight G.E. Design implications of measured pressures and strains in silos /G.E. Blight // *Journal of Structural Engineering*. – ASCE, 1992. – vol. 118, №10. – P. 2729-2742.
- [5] Kebeli H.V. Moisture-induced pressures and loads in grain bins / H.V. Kebeli, R.A. Bucklin, D.S. Ellifritt, K.V. Chau // *Transactions of the ASAE*. – ASAE, 2000. – Vol. 43, №5. – P. 1211-1221.
- [6] Molenda M. Comparison of loads on smooth- and corrugated-wall model grain bins / M. Molenda, J. Horabik, I.J. Ross // *International Agrophysics*. – 2001. – Vol. 15. – P. 95-100.
- [7] A novel prediction method of dynamic wall pressure for silos based on support vector machine / Y. Hanhua, X. Zhijun, L. Tingting, Y. Fang. // *Advances in Civil Engineering*. – 2020. – P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4865628>.
- [8] Changnv Z. The shear strength and dilatancy behavior of wheat stored in silos / Z. Changnv, W. Yuke. // *Complexity*. – 2019. – P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/1547616>.
- [9] Dogangun A. Cause of damage and failures in silo structures / A. Dogangun, Z. Karaca, A. Durmus, H. Sezen // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. – ASCE, 2009. – Vol. 23, №2. – P. 65-71.
- [10] Singer, J.; Rosen, A. The influence of boundary conditions on the buckling of stiffened cylindrical shells. In *Proceedings of the IUTAM Symposium on Buckling of Structures*, Cambridge, MA, USA, 17–21 June 1974; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1976, P. 227–250.

[11] Pasternak, H.; Li, Z.; Juozapaitis, A.; Daniunas, A. Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures: State-of-the-Art Review. *Appl. Sci.* 2022, 12, 11665. P. 1-14 <https://doi.org/10.3390/app122211665>.

[12] Das, P.K.; Thavalingam, A.; Bai, Y. Buckling and ultimate strength criteria of stiffened shells under combined loading for reliability analysis. *Thin-Walled Struct.* 2003, 41, P. 69–88.

[13] Pichugin S., Oksenenko K. Comparative analysis of design solutions of metal silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering.* 2022, 53 (2), P. 54-60 . DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890>.

[14] Xaver Lipp [Internet resource]. - Access mode: <https://xaver-lipp.com/>.

[15] Pichugin S., Oksenenko K., Hajiyev M., Sulewska M. Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos. January 2021, *E3S Web of Conferences* 280(4):03006. DOI: 10.1051/e3sconf/202128003006.

[16] Pichugin S., Dmytrenko A., Oksenenko K. Experimental study of structural elements of metal spiral-fold silos. *Modern building structures made of metal and wood.* 2022, 26, P. 135-144.

[17] DSTU ISO 6892-1:2019 (ISO 6892-1:2016, IDT) Metal materials. Tensile test. Part 1. Test method at room temperature.

EXPERIMENTAL STUDY OF WALL STRESS-STRAIN STATE OF A STEEL SPIRAL-FOLD SILOS

Pichugin S.F., ScD, Professor

pichugin.sf@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8505-2130,

Shulhin V.V., PhD, Associate Professor

Shwlad17@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2573-8402

Oksenenko K.O., graduate student,

shvadchenkokate@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5171-3583

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"

Annotation. In the context of martial law, Ukraine's agricultural sector is suffering significant losses. By May 2022. Ukraine has already lost almost 13 million tonnes of elevator capacity, some of the grain warehouses have been completely destroyed, and some are in the occupied territories. In this regard, there is a need for elevator capacities, namely, prefabricated, cost-efficient storage capacities. Such structures are exemplified by silos. There are many design solutions for metal silos. However, the rising cost of materials is causing a need to reduce the material intensity of the structure, which is encouraging cylindrical silo manufacturers to search for new types of shell construction. An innovative design of lightweight, industrial silos is a metal spiral-fold silo.

The article describes the design of steel spiral-fold silos. The specifics of the spiral-fold silo design, which affects their stress-strain state, are analysed. The characteristics of the silo that was used as a source of samples for the experiment are given. The samples and equipment for the experimental study of a wall of a metal spiral-fold silo are considered. The stages of the experiment are described. The loading of the samples was performed by a central bending load applied in a static mode in the range from 0 kN to 5.5 kN. To determine the relative strains, the structure was unloaded after each loading stage. The analysis of the sample's relative strains which were measured by AVD-4 is made. The character of interaction and deformation of the wall with the folding lock is revealed. The degree of the folding lock opening was estimated. The character of work of the wall and the folding lock in the limit and non-limit states is obtained.

A comparison of experimental results with finite element analysis in the LIRA-SAPR software package was performed. The conclusion about the reliable operation of the wall of a spiral-fold silo under operational and increased loads is substantiated.

Keywords: metal silo, spiral-fold silos, folding lock, stress-strain state