

УДК 624.014.2

doi:10.31650/2707-3068-2022-26-135-144

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ МЕТАЛЕВИХ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ

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

Дмитренко А.О., к.т.н., доцент
andmyt@ukr.net ORCID 0000-0002-8715-7646

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

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Анотація. Розглянуто конструкцію сталевих спірально-фальцевих силосів. Наведено характеристики силосу, з якого були взяті зразки для проведення експерименту. Приведені механічні характеристики застосованої сталі DX51D+Z140, які були одержані за допомогою випробування плоских зразків на розтяг. Розглянуто зразки та обладнання для експериментального дослідження фальцевого замка. Наведено етапи руйнування фальцевого замка в залежності від розтягуючого навантаження. Розглянуто характер розкриття фальцевого з'єднання. Описано стадії роботи фальцевого замка. Зроблено аналіз отриманих результатів експериментального дослідження.

Ключові слова: металевий силос, спірально-фальцевий силос, фальцевий замок

Вступ. Металеві ємності для зберігання сипучих матеріалів набувають поширення з кожним роком. Це зумовлено їхніми перевагами в порівнянні з іншими видами складів, такими як підлогові склади та залізобетонні силоси. Переваги металевих силосів: менша маса, простота транспортування, можливість заводського виготовлення конструкцій, швидкість проведення монтажних робіт, можливість створення герметичного середовища. В зв'язку з розповсюдженістю металевих ємностей, зростає й кількість типів металевих силосів, в залежності від конструкції корпусу [1]. Це пояснюється великою різноманітністю видів сипучих матеріалів та вимогами до їх зберігання. Прогресивна металева ємність в якій можливе зберігання будь-якого виду матеріалу – це силоси спірально-фальцевого типу.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Дослідженнями роботи та аналізом металевих силосів займається велика кількість науковців. Дж.Р. МакКалмонт одним з перших класифікував силоси та розглянув їх особливості [2]. Великий вклад зробили Ротер М. та Гейлорд Е., у своїх книгах [3 – 4] 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., Моленда М., Ханьхуа Ю., Чангв З. [5 – 9] присвятили свої роботи експериментальним дослідженням впливу тиску сипучих матеріалів, в залежності від їх різних характеристик, на оболонки гладких та гофрованих металевих силосів. Догангун А. у своїй роботі дослідив випадки руйнування силосних ємностей, зробив огляд на поширені помилки при розрахунках, які можуть призвести до аварії конструкції [10].

Виділення не роз'язаних раніше частин загальної проблеми. Розвиток спірально-фальцевих силосів стримується через відсутність експериментальних досліджень елементів цих сталевих листових конструкцій.

Постановка завдання. Завданням цієї статті є опис й аналіз результатів експериментальних досліджень елементів конструкції металевих спірально-фальцевих силосів.

Основний матеріал і результати. Конструкція спірально-фальцевого силосу була розроблена у 1968 році німецьким вченим Ксавером Ліппом, який використовував спеціальне обладнання для обробки листового металу і застосував його для зведення спірально-навивних силосів [11]. Корпус силосу являє собою систему спірального з'єднання сталеві стрічки шляхом подвійного вальцювання з одночасним формуванням фальцевого ребра замкнутого типу. Фальцевий замок розташований ззовні стінки силосу під незначним кутом до горизонтальної площини й утворює кільцеві ребра.

Конструктивні рішення оболочку силосів спірально-фальцевого типу суттєво відрізняються від збірних металевих силосів із гофрованих панелей на болтових з'єднаннях та зварних листових ємностей.

Одним із визначальних чинників під час вибору конструкції стінки силосу та його проектування є забезпечення стійкості. У традиційній гофрованій ємності стійкість забезпечує система жорсткісних елементів, таких як: горизонтальні та вертикальні ребра, вітрові кільця. Ці елементи призначені для сприймання вертикальних навантажень, адже листові панелі сприймають тільки розтягуючі засилля від горизонтального тиску сипучого матеріалу. Безреберні ємності застосовуються лише при малих об'ємах зерна для зберігання та відсутності багаторазових циклів завантаження-розвантаження впродовж року.

Особлива конструкція корпусу спірально-фальцевих силосів дозволяє забезпечити стійкість ємності без використання вертикальних ребер жорсткості.

Ребро фальцевого типу, як специфічний стиковий елемент, потребує експериментальних досліджень та вивчення фактичних характеристик піддатливості та міцності, подібно тому, як в свій час експериментально досліджувались зварні, болтові та заклепкові з'єднання.

Для експериментального дослідження був взятий елемент стінки спірально-фальцевого силосу для зберігання тріски деревини. Габарити силосу – діаметр 8м, висота корпусу 17м, загальний об'єм зберігання матеріалу 650 м³. У стінці силосу було зроблено технологічний отвір для монтажу оглядового люку. Вирізаний елемент стінки був розділений на експериментальні зразки (рис.1).

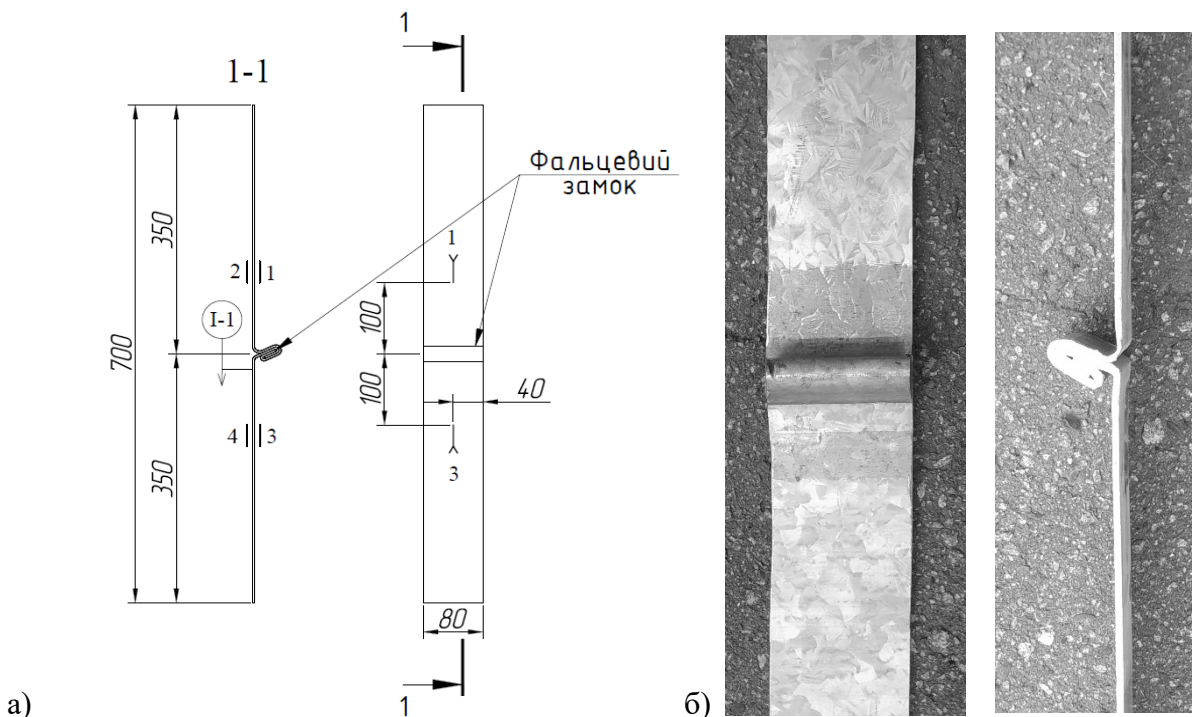


Рис. 1. Експериментальний зразок: а) розташування та нумерація тензодатчиків та індикаторів на зразках; 1 - 4 – тензодатчики; I-1 – індикатори годинникового типу; б) загальний вигляд

Характеристики зразка - марка сталі – DX51D+Z1400, ширина – 80 мм, довжина 700 мм, товщина – 4 мм. Ширина зразка прийнята з умови надійного закріплення у випробувальній машині, довжина – з умови надійного закріплення та можливості визначити поведінку стінки силосу під час руйнування фальцевого з'єднання.

Для визначення характеристик сталі DX51D+Z140 було проведене випробування на розтягування на плоских зразках (рис.2). Дослідження проводилось на розривній машині МР-500кН. За результатами випробування було визначено, що сталь є пластичною, на зразках після руйнування чітко видно зону звуження (рис. 2,б). Механічні характеристики сталі: границя текучості сталі $\sigma_T = 251 \text{ МПа}$; границя міцності $\sigma_B = 320 \text{ МПа}$, залишкове видовження після руйнування $\delta = 16\%$.



Рис. 2. Випробування на розтяг: а) загальний вигляд; б) зразки після випробування

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 електричні тензорезистори з базою 20мм. Схема наклеювання тензодатчиків наведена на рис 1. Показання з тензодатчиків знімалися за допомогою автоматичного вимірювача деформацій АВД-4.

Загальний вигляд експериментального зразка з розміщенням на ньому тензодатчиків та індикатору годинникового типу зображено на рис. 3.

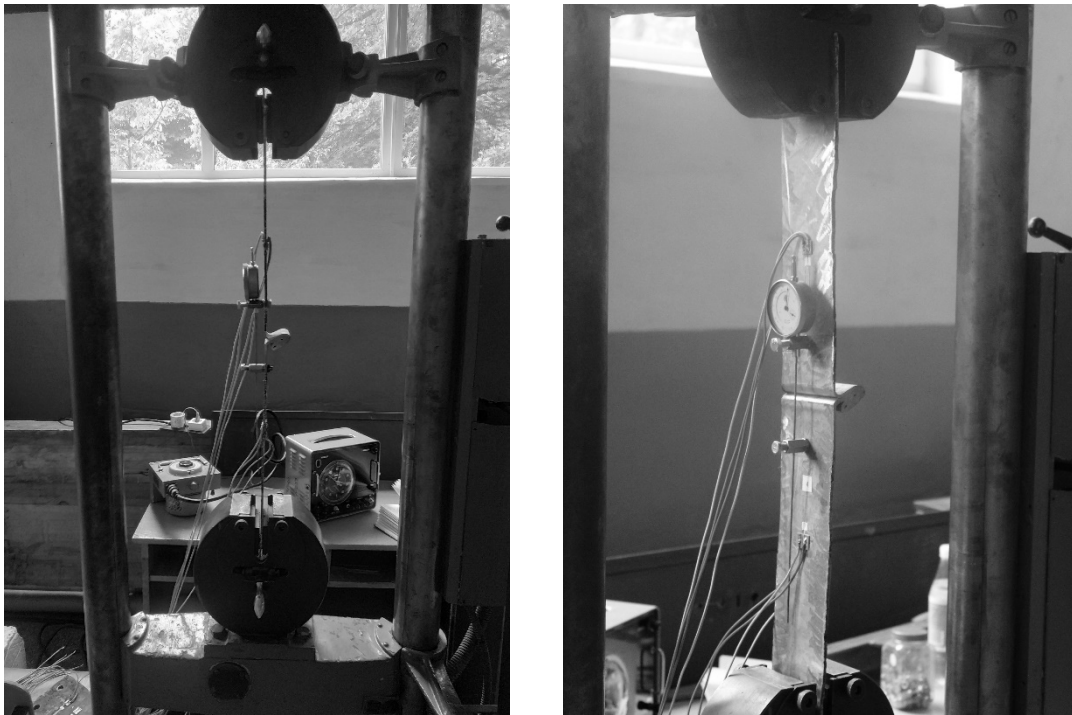






Рис. 3. Загальний вигляд експериментального зразка у випробувальній машині

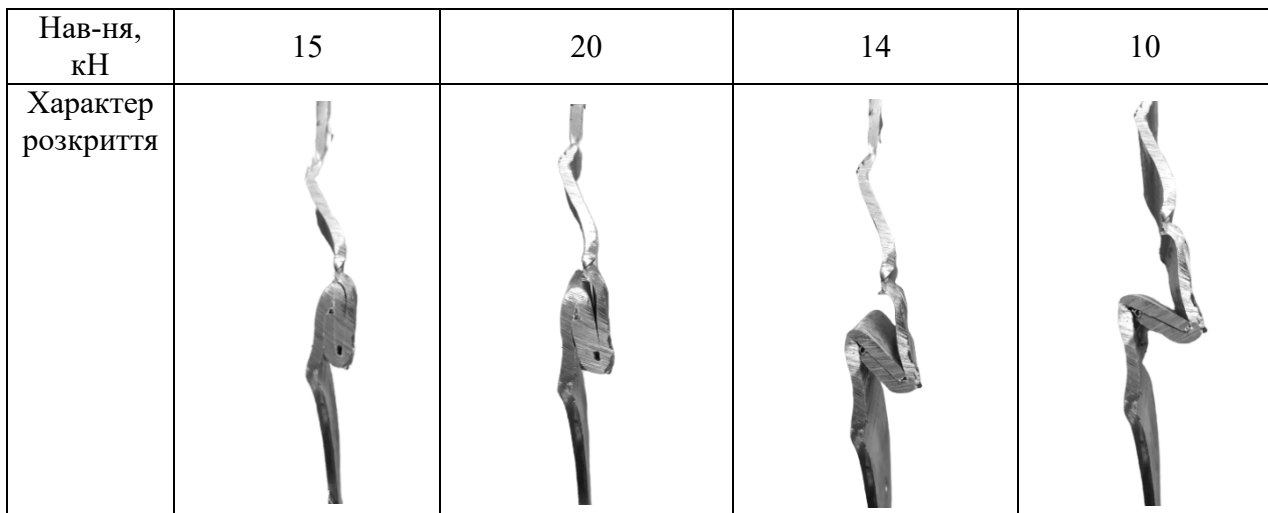
Етапи експерименту: закріплення зразка у випробувальній машині (рис.3), ступеневе навантаження зразка розтягуючим навантаженням, збір даних з індикаторів годинникового типу та фіксація деформацій тензорезисторів на кожному ступені навантаження, навантаження зразка до повного розриву фальцевого замка.

Навантаження зразків виконувалось центральним розтягуючим навантаженням, яке прикладалося в статичному режимі в межах від 0 кН до 21 кН.

Результати експерименту виявили, що при навантаженні розтягуючим навантаженням в межах 4 – 4,5 кН відбувається зависання навантаження, утворюється поверхнева тріщина в першому вигині замка. Повне розкриття першого згину фальцевого замка – в межах 7 - 8 кН. Розкриття другого згину починається при навантаженні в межах 8 – 9 кН, в проміжку 9 – 15 кН спостерігається поворот з'єднання з горизонтальної площини у вертикальну. Руйнування фальцевого замка відбувається при навантаженні в межах 19-21 кН. Після досягнення максимального навантаження, відбувається його поступове падіння. Етапи руйнування фальцевого замка в залежності від розтягуючого навантаження наведені в таб.1.

Таблиця 1 – Етапи руйнування фальцевого замка в залежності від розтягуючого навантаження

Нав-ня, кН	0	2,5	4,5	8
Характер розкриття				



Повний характер розкриття фальцевого замка до його руйнування наглядно показано на графіку (рис. 4).

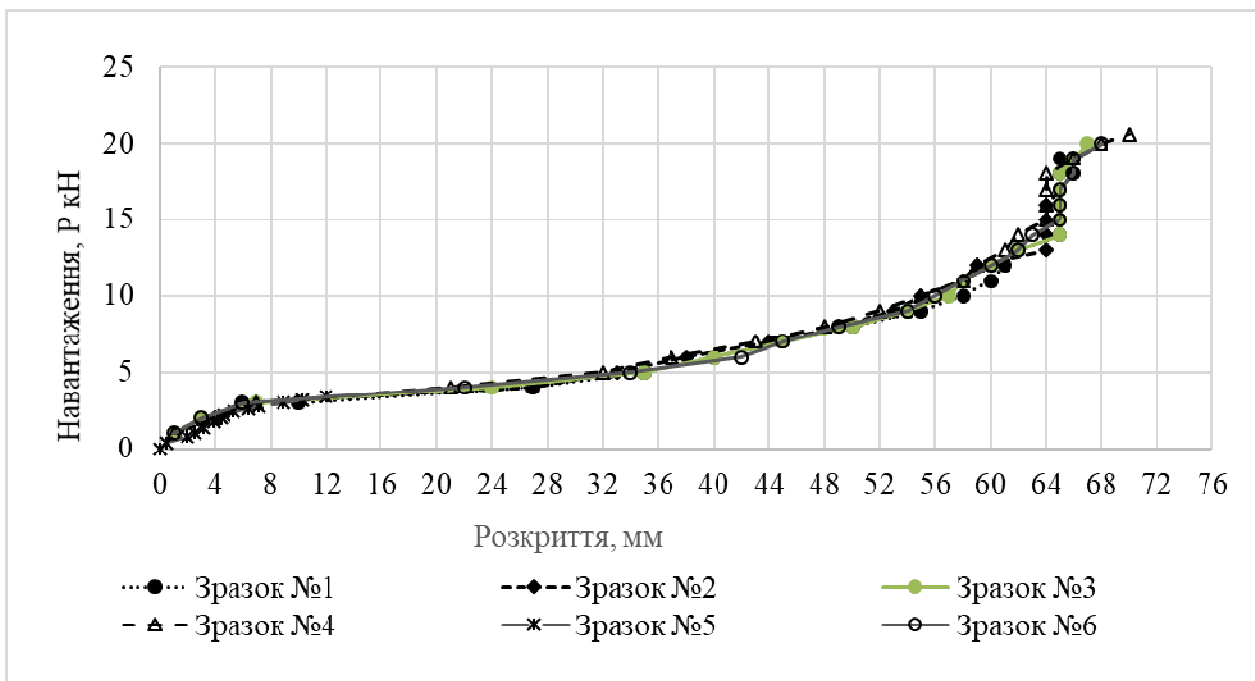


Рис. 4. Характер розкриття фальцевого замка

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що при навантаженнях на зразок в межах $P = 0 \dots 3$ кН конструкція працювала пружно, оскільки при розвантаженні до рівня $P = 1,5$ кН ніяких залишкових деформацій не фіксувалось.

При збільшенні навантаження на фальцеве з'єднання, вимірювальні прилади фіксували збільшення залишкових деформацій в межах 1 мм. При рівні навантаження $P = 3,5$ кН залишкові деформації переважають пружні та прийняли значення 3,16 мм, а на графіку залежності між пружними та залишковими деформаціями можна спостерігати спад (рис.5).

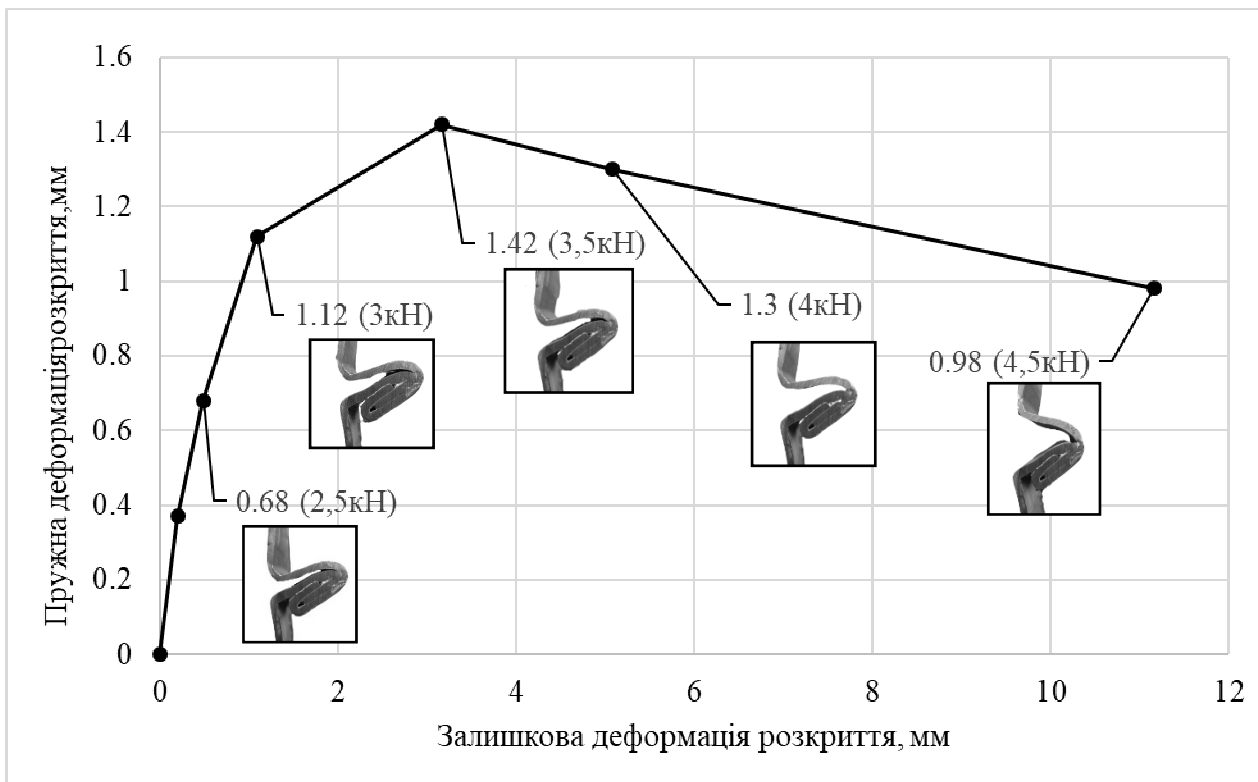


Рис. 5. Графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замка за цикл

Аналіз відносних деформацій, які були виміряні за допомогою АД-4, показав, що фальцеве ребро та прилегла оболочка працюють в складному напруженому стані. Покази із дзеркальних тензорезисторів мали протилежні знаки, а отже, під час розкриття фальцевого замка, стінка силосу з одного боку стискається, а з іншого розтягується (рис. 6). Як видно з рис. 6, деформація виміряна тензорезисторами 1, 3 та 2, 4, які розміщені дзеркально по відношенню до фальцевого з'єднання, але з різних сторін стінки силосу (див. рис. 1), показує їх сумісну роботу до навантаження в 4,5 кН. Після межі в 4,5 кН графіки деформацій розходяться, в цей час з'являється тріщина металу першого згину фальця та починається його розкриття. Варто відзначити, що перед початком розкриттям першого згину, величини деформації тензорезисторів 1 та 2 досягають своїх максимальних значень. В цей же час покази деформації з тензорезисторів 3 та 4 продовжують зростати до повного розкриття першого згину фальцевого з'єднання, що відзначається при величині навантаження в межах $P = 7 - 8$ кН. На наступних етапах навантаження зразка, деформації пропорційно зменшуються до повного руйнування фальцевого замка.

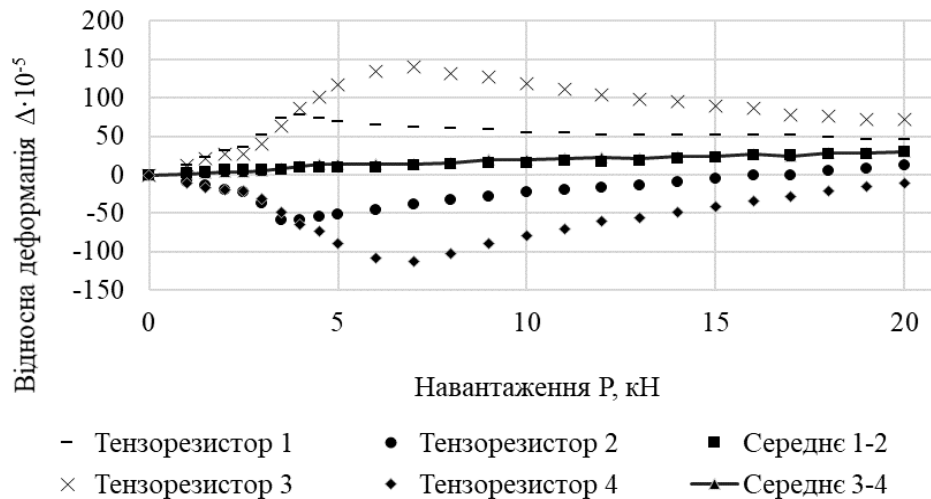


Рис. 6. Графік залежності деформації зразка від навантаження

Після руйнування з'єднання на металі спостерігалися зони стоншення металу в місцях згину фальця, та тріщини від руйнування згинів (рис. 7).

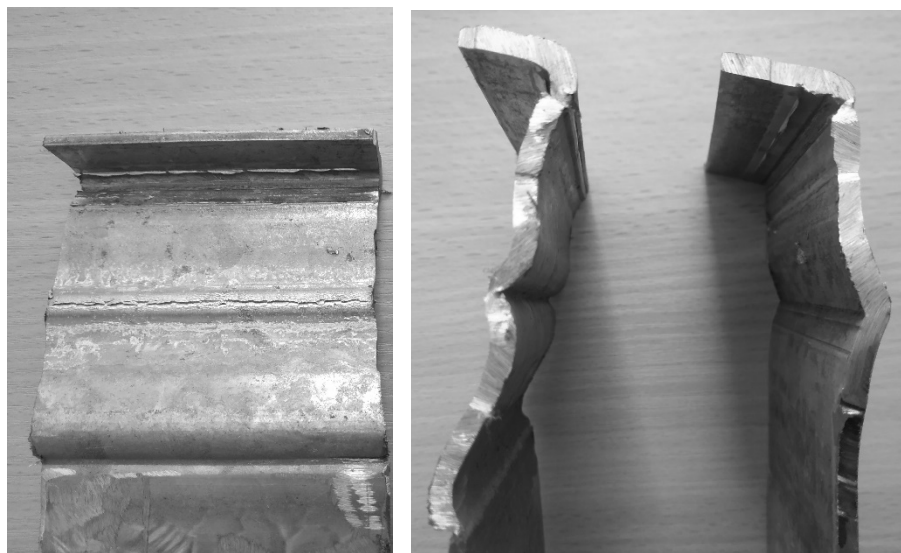


Рис. 7. Зразок після руйнування

Аналіз напружень в стінці спіральньо-фальцевого силосу при розкритті фальцевого замка показав, що при пружній роботі фальцевого з'єднання, напруження в стінці знаходяться в межах $\sigma_y = 0 - 2,5 \text{ кН/см}^2$, а при руйнуванні замка, напруження відповідає значенням $\sigma_y = 6 - 8 \text{ кН/см}^2$. Порівнявши отримані результати з механічними характеристиками сталі, отримуємо, що при руйнуванні фальцевого з'єднання, напруження, які виникають в стінці силосу, для металевого штрипса відповідають пружній стадії.

Результати досліджень були порівнянні з аналітичними розрахунками, отриманими при проектуванні конструкції силосу, з якого були взяті зразки для експерименту. Для визначення напружено-деформованого стану, що виникає в сталевій конструкції стінки силосу (з урахуванням наявності кільцевих ребер жорсткості) та стрижневих елементах купольного каркасу покриття була змодельована розрахункова комп'ютерна модель каркасу силосу. Перевірні статичні розрахунки сталевих конструкцій силосу виконані по програмі ЛІРА-САПР з перевіркою несучої спроможності пластин стінки та стрижневих елементів каркасу силосу на можливі при експлуатації розрахункові комбінації навантажень та розрахункові сполучення. Перевірка стійкості силосної конструкції проводилась для заповненого силосу, а також для не

заповненого сипучим матеріалом силосу при дії вітрового навантаження. Результати розрахунків показали, що у пустій ємність при дії вітрового навантаження виникають не тільки меридіональні напруження стиску, а й розтягу. Напруження розтягу в стінці силосу досягало значення $\sigma_y = 0,4кН / см^2$. Експериментальні дослідження фальцевого замка показали, що при пружній роботі фальцевого з'єднання, напруження в стінці відповідало значенням $\sigma_y = 0 - 2,5кН / см^2$. Таким чином, при дії вітрового навантаження, робота фальця характеризується пружною стадією, без розкриття, а руйнування фальцевого замка відбувається при позаграничному стані оболонки спіральньо-фальцевого силосу.

Висновки. В результаті експериментального дослідження та порівняння отриманих даних з аналітичними розрахунками були зроблені такі висновки:

1. Виявлено характер роботи фальцевого замка і прилеглих ділянок оболонки при дії розтягуючих навантажень.
2. Зафіксовано згин прилеглої оболонки при розкритті фальцевого замка.
3. Відзначено етапи навантаження, при яких фальцеве з'єднання працювало пружно.
4. Експлуатаційні навантаження відповідають початковій стадії роботи фальця без його розкриття.
5. Випробована конструкція фальця забезпечує надійну роботу оболонки на проєктні навантаження.
6. Виявлений характер роботи фальця до руйнування в основному відповідає позаграничному стану оболонки спіральньо-фальцевого силосу і підтверджує його надійність при дії можливих підвищених аварійних навантажень.

Література

1. Pichugin S., Oksenenko K. (2019). Comparative analysis of design solutions of metal silos// Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2019. 53 (2). p.53. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890>
2. Silo types and construction by / McCalmont, J. R, 1939. – 69 p
3. 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.
4. Rotter M.J. / Guide for the economic design of circular metal silos / J.M. Rotter. – CRC Press, 2001. – 254 p.
5. Blight G.E. Design implications of measured pressures and strains in silos /G.E. Blight // Journal of Structural Engineering. – ASCE, 1992. – vol. 118, №10. – pp. 2729-2742.
6. 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.
7. 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.
8. 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.7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4865628>
9. Changnv Z. The shear strength and dilatancy behavior of wheat stored in silos / Z. Changnv, W. Yuke. // Complexity. – 2019. – P. 9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/1547616>
10. 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. – pp. 65-71
11. Xaver Lipp [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://xaverlipp.com/>.

References

- [1] Pichugin S., Oksenenko K. (2019). Comparative analysis of design solutions of metal silos// Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2019. 53 (2). p.53. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890>
- [2] Silo types and construction by / McCalmont, J. R., 1939. – 69 p
- [3] 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.
- [4] Rotter M.J. / Guide for the economic design of circular metal silos / J.M. Rotter. – CRC Press, 2001. – 254 p.
- [5] Blight G.E. Design implications of measured pressures and strains in silos /G.E. Blight // Journal of Structural Engineering. – ASCE, 1992. – vol. 118, №10. – pp. 2729-2742.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4865628>
- [9] Changnv Z. The shear strength and dilatancy behavior of wheat stored in silos / Z. Changnv, W. Yuke. // Complexity. – 2019. – P. 9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/1547616>
- [10] 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. – pp. 65-71
- [11] Xaver Lipp [Internet resource]. - Access mode: <https://xaver-lipp.com/>.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВЫХ СИЛОСОВ

Пичугин С.Ф., д.т.н., профессор,
pichugin.sf@gmail.com ORCID 0000-0001-8505-2130,

Дмитренко А.А., к.т.н., доцент
andmyt@ukr.net ORCID 0000-0002-8715-7646

Оксененко К.А., аспирант,
shvadchenkokate@gmail.com ORCID 0000-0002-5171-3583

Национальный университет «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка»

Аннотация. Металлические емкости для хранения сыпучих материалов получают распространение с каждым годом. В работе рассмотрена конструкция стальных спирально-фальцевых силосов и особенности расположения фальцевого замка. Представлены элементы системы жесткости сборных металлических силосов из гофрированных панелей на болтовых соединениях. Описаны характеристики силоса, из которого были взяты образцы для проведения эксперимента. Приведены механические характеристики стали DX51D+Z140, рассчитанные с помощью испытания плоских образцов на растяжение. Проиллюстрированы образцы и оборудование экспериментального исследования фальцевого замка. Описаны этапы опыта. Нагрузка образцов выполнялась центральной нагрузкой, которая прикладывалась в статическом режиме в пределах от 0 кН до 21 кН. Проиллюстрированы этапы раскрытия фальцевого замка в зависимости от растягивающей нагрузки. Описаны стадии работы фальцевого замка. Рассмотрен полный характер раскрытия фальцевого соединения до его разрушения. Проанализирован характер работы фальцевого замка в упругой стадии. Произведен анализ относительных деформаций, которые были измерены с

помощью АД-4. Было зафиксировано, что фальцевое ребро и близлежащая оболочка работают в сложном напряженном состоянии. Показания из зеркальных тензорезисторов имели противоположные знаки, а значит, при раскрытии фальцевого замка стенка силоса с одной стороны сжимается, а с другой растягивается. Проиллюстрированы образцы после разрушения соединения, отмечено, что на металле наблюдались зоны истончения металла в местах сгиба фальца и трещины от разрушения изгибов.

Произведено сравнение результатов исследований с аналитическими расчетами, полученными при проектировании конструкции силоса. По результатам расчетов было отмечено, что в пустой емкости при действии ветровой нагрузки возникают не только меридиональные напряжения сжатия, но и растяжения.

По результатам экспериментального исследования и по сравнению полученных данных с аналитическими расчетами было обнаружено, что эксплуатационные нагрузки соответствуют начальной стадии работы фальца без его раскрытия, испытанная конструкция фальца обеспечивает надежную работу оболочки на проектные нагрузки.

Ключевые слова: металлический силос, спирально-фальцевый силос, фальцевый замок

EXPERIMENTAL STUDY OF STRUCTURE ELEMENTS OF METAL SPIRAL-FOLD SILOS

Pichugin S.F., DSc, Professor

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

Dmytrenko A.A., Ph.D., Associate Professor

andmyt@ukr.net ORCID 0000-0002-8715-7646

Oksenenko K.A., graduate student,

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

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"

Annotation. Metal capacities for the storage bulk materials are became widespread every year. The design of the steel spiral-fold silos and the peculiarities of the folding lock are considered in the article. The elements of the rigidity system of prefabricated metal silos from corrugated panels on bolted joints are given. The characteristics of the silo from which the samples were taken for the experiment are described. The mechanical characteristics of DX51D + Z140 steel, which were calculated by testing samples for tension, are given. Samples and equipment for experimental study of a folding lock are illustrated. The stages of the experiment are described. The samples were loaded with a central tensile load, which was applied in static mode in the range from 0 kN to 21 kN. The stages of opening the folding lock depending on the tensile load are illustrated. The stages of the folding lock's work are described. The complete character of disclosing of the folding lock to its ruination is described. The character of the folding lock's work in the elastic stage is analyzed. The analysis of sample's relative strains which were measured by AVD-4 is made. It was noted that the folding rib and the adjacent shell work in a complex stressed state. The mirror strain gauges showed opposite signs, and as a result, when the folding lock is disclosing, the silo wall is compressed on one side and tensioned on the other one. The samples after the destroying of the folding connection are illustrated, it is noted that the metal was observed areas of thinning of the metal and cracks.

The comparison of research results with the analytical calculations received at designing of a design of a silo is made. According to the results of calculations, it was noted that in an empty silo under the action of wind load there are not only meridional compressive stresses, but also tensile.

According to the results of experimental research and comparison of the obtained data with analytical calculations, it was found that the operating loads correspond to the initial stage of the folding lock' work. The experimentally studied design of the folding lock provides reliable work of a silo on design loadings.

Keywords: metal silo, spiral-fold silos, folding lock.