

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОКСЕНЕНКО Катерина Олександрівна

УДК 624.014:624.042.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ
СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ ДЛЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 192 – «Будівництво та цивільна інженерія»

Галузь знань 19 – «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ К.О. Оксененко
(підпис)

Науковий керівник

Пічугін Сергій Федорович

Доктор технічних наук, професор

Полтава 2024

АНОТАЦІЯ

Оксененко К.О. Оцінювання надійності конструкцій спірально-фальцевих силосів для сипучих матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (19 «Архітектура і будівництво»). – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – Полтава, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробленню методики оцінювання надійності конструкцій спірально-фальцевих силосів.

У першому розділі виконано аналіз стану досліджень по темі дисертації. Розглянуто металеві листові конструкції, їх особливості, специфіку експлуатації у різних умовах та особливості розрахунку, як базу досліджень для теорії розрахунку тонкостінних ємностей. Наведено узагальнену класифікацію металевих силосів та досліджено галузь їх застосування. Описано технологію виготовлення спірально-фальцевих силосів, проаналізовано функції механізмів, які використовуються при монтажі силосу. Розглянуто поетапний процес монтажу конструкції силосу на будівельному майданчику. Проаналізовано переваги та недоліки спірально-фальцевих силосів. Розглянуто теорію визначення тиску сипучого матеріалу на дно та стінки силосів. Проведено огляд робіт в області досліджень металевих силосів та досліджень надійності будівельних конструкцій. Сформульовано задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі для подальшого розв'язання поставленої задачі дослідження було зібрано та досліджено історію винаходу спірально-фальцевих конструкцій. Зроблено аналіз галузі застосування спірально-фальцевих силосів (закордонний та вітчизняний досвід). Зібрано технічні характеристики ємностей у залежності від функціонального призначення. Розроблено таблицю із загальними даними щодо параметрів спірально-фальцевих силосів, застосованих у різних галузях промисловості.

У третьому розділі розглянуто специфіку конструкції спіральньо-фальцевого силосу, яка впливає на їх напружено-деформований стан. Проведено порівняння методик визначення навантажень та впливів на конструкції силосу за різними нормативними документами. Проаналізовано особливості розрахункової схеми спіральньо-фальцевих силосів. Наведено алгоритм розрахунку на міцність та стійкість металевого силосу за безмоментною теорією. Розглянуто напружено-деформований стан міжфальцевої ділянки оболонки з постійною товщиною стінки. Проведено порівняння розрахунків з аналітичними розрахунками програмного комплексу ЛІРА-САПР.

У четвертому розділі описано проведене експериментальне дослідження фальцевого замку на розтягуючі навантаження. Виявлено характер роботи фальцевого замка і прилеглих ділянок оболонки при дії розтягуючих навантажень. Зафіксовано згин прилеглої оболонки при розкритті фальцевого замка. Відзначено етапи навантаження, при яких фальцеве з'єднання працювало пружно. Виявлено характер роботи фальця до руйнування в основному відповідає позаграничному стану оболонки спіральньо-фальцевого силосу, що підтверджує його надійність при дії можливих підвищених аварійних навантажень.

Проведено експериментальну перевірку роботи міжфальцевої зони оболонки та прилеглих фальцевих замків спіральньо-фальцевого силосу. Виявлено характер взаємодії та деформування стінки з фальцевим з'єднанням. Оцінено ступінь розкриття фальців під навантаженням. Одержано дані щодо характеру роботи стінки та фальцевого з'єднання в граничному та позаграничному станах. Виконано порівняння експериментальних залежностей з розрахунком за методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Обґрунтовано висновок про надійну роботу стінки спіральньо-фальцевого силосу при експлуатаційних та підвищених навантаженнях.

У п'ятому розділі проведено огляд прикладів будівництва металевих спіральньо-фальцевих силосів на території України. Розглянуто технічні характеристики зведених силосів та область їх застосування.

Описано досвід експлуатації металевих спіральньо-фальцевих силосів на прикладі двох елеваторів. Розглянуто силосний парк підприємства ТОВ Ємилівське ХПП. Спіральньо-фальцеві силоси даного підприємства є підтвердженням довговічності таких конструкцій, які знаходяться в експлуатації з 1971р.

Проведено технічне обстеження силосного парку Ботієвського елеватора (Запорізька обл.). На основі обстеження зроблено висновок про надійність спіральньо-фальцевих силосів. З досвіду експлуатації Ботієвського елеватора доведено, що системи розвантаження та завантаження силосу є важливими технологічними процесами, які впливають не тільки на продуктивність елеватора, але при неправильному проектуванні та експлуатації можуть призвести до аварій. Розглянуто інші приклади аварій спіральньо-фальцевих силосів та проаналізовано причини, які їх спричинили.

У шостому розділі розроблено методику оцінювання надійності металевих спіральньо-фальцевих силосів на основі аналізу резерву міцності. Оцінювання надійності силосу проведено за трьома станами силосної конструкції: з урахуванням кільцевих напружень, з урахуванням складного напруженого стану та складного напружено- деформованого стану.

За результатами розрахунків виконано порівняння параметрів розрахунку надійності спіральньо-фальцевих силосів; побудовано графіки напружень та характеристик безпеки в залежності від розкиду характеристик сипучого матеріалу (пшениці); одержано чисельні оцінки надійності спіральньо-фальцевого силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами. Одержані результати розрахунків підтвердили високу надійність металевих спіральньо-фальцевих силосів.

Ключові слова: будівельні конструкцій, металевий спірально-фальцевий силос, сипучий матеріал, досвід експлуатації, оцінювання надійності конструкцій.

ABSTRACT

Oksenenko Kateryna. Reliability analysis of spiral-fold silos for bulk materials.

The thesis on conferment of the scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Construction and civil engineering (19 “Architecture and Construction). National University ‘Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic’. – Poltava, 2024.

The thesis is devoted to the development of a methodology of reliability analysis of spiral-flange silos.

In the first section, it was analyzed the state of research in the field of the thesis. The metal sheet structures, their features, specifics of operation in different conditions, and calculation features were considered as a research base for the theory of thin-walled silos analysis. The classification of metal silos is formulated and the field of their application was explored. The set of equipment for the construction of the spiral-fold silos was given, the step-by-step process of formation of the folding lock and features of the installation process were presented. The theory of determining the pressure of bulk material on the bottom and walls of silos was considered. A review of works in the field of research about metal silos and reliability studies of building structures was carried out.

In the second section, to further accomplish the research task, the history of the invention of spiral-fold structures was gathered and studied. The area of application of spiral-fold silos (foreign and domestic experience) is analyzed. The technical characteristics of the capacities depending on the functional purpose are collected. A table with general data concerning the parameters of spiral-fold silos used in various industries has been developed.

The third section considers the design specifics of the spiral-fold silo, which affects to their stress-strain state. A comparison of methods for determining loads and

impacts on silo structures according to different regulatory documents was carried out. The features of the design scheme of spiral-flange silos were analyzed. An algorithm of strength design of a metal silo was presented. The stress-strain state of the inter-flange section of the shell with a constant wall thickness is considered. The comparison of the calculations with the finite element calculations in the LIRA-SAPR software package is carried out.

In the fourth section, it was described the experimental study of the folded lock on tensile loads. The character of the folded lock and the adjacent areas of the shell under tensile loads was revealed. The bending of the adjacent shell during the opening of the folded lock was recorded. The stages of loading at which the folded lock worked elastically were noted. The revealed character of the folded lock operation before failure basically corresponds to the out-of-limit state of the spiral-fold silo shell, which confirms its reliability under the influence of possible increased failure loads.

An experimental study of the operation of the inter-flange zone of the shell and the adjacent folded locks of the spiral-fold silo was carried out. The character of interaction and deformation of the wall with the folded lock was revealed. The degree of folded lock opening under load was estimated. The data concerning the character of the wall and the folded lock in the limit and non-limit states were obtained. The experimental results were compared with the finite element analysis in the LIRA-SAPR software package. The conclusion about the reliable operation of the spiral-fold silo wall under operational and increased loads was substantiated.

The fifth section reviews examples of the construction of metal spiral-fold silos in Ukraine. The technical characteristics of the constructed silos and their application areas were considered. The experience of operation of metal spiral-column silos by the example of two elevators was described.

The silo elevator of the enterprise LLC Yemilovsky KhPP was considered. The spiral-fold silos of this enterprise are a confirmation of the durability of such structures, which have been in operation since 1971.

The silos of the Botievo elevator (Zaporizhzhia region) was inspected. Based on the review, a conclusion was made about the reliability of spiral-fold silos. The operating experience of the Botievo elevator proves that silo discharge and loading systems are important technological processes that affect not only to the productivity of the elevator, but can lead to accidents if the system is not designed and operated properly. Other examples of spiral-fold silo failures were considered and the reasons that caused them were analyzed.

In sixth section, it was developed a method of reliability analysis of metal spiral-fold silos based on the analysis of the strength reserve. The reliability analysis was carried out for three states of the silo structure: taking into account ring stresses, taking into account a complex stress state, and a complex stress-strain state.

According to the results of the analysis, the parameters of reliability analysis of spiral-fold silos were compared; diagrams of stresses and safety characteristics were plotted depending on the range of bulk material characteristics (wheat). The obtained results of the analysis confirmed the high reliability of metal spiral-fold silos.

Keywords: building structures, metal spiral-fold silo, bulk material, operating experience, reliability analysis of structures.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз

1. Pichugin S., Oksenenko K., Hajiyev M., Sulewska M. Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos. *ICSF 2021. Second international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters. E3S Web of Conferences.* 2021. Vol. 280. P. 03006. doi.org/10.1051/e3sconf/202128003006. (SCOPUS, закордонне видання). (Особистий внесок – описано особливості фальцевого замку, його геометрія та

розташування. Зроблено аналіз особливостей конструкції спірально-фальцевого силосу, які впливають на їх напружено-деформований стан)

2. Pichugin S., Oksenenko K. Spiral-fold Silo is Innovative Storage for Wood Chips. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2678. P. 020013. doi.org/10.1063/5.0118821. (SCOPUS, закордонне видання). *(Особистий внесок – проведено розгляд особливостей тріски деревини як сипучого матеріалу. Наведено приклади використання спірально-фальцевих силосів, як складу для зберігання тріски деревини за кордоном та на території України. Описано досвід експлуатації спірально-фальцевих силосів на території України).*

3. Pichugin S., Oksenenko K. Using of spiral-fold silos on the territory of Ukraine *ArCivE 2021. Xth International scientific conference on architecture and civil engineering*. Varna, 2021. Vol. 3. P. 430 – 437. <https://events.vfu.bg/archive/files/2021/Proceedings%20ArCivE%202021.pdf> *(Особистий внесок – наведено розрахункову схему силосу. Проаналізовано нормативні документи, що регламентують питання проектування сталевих силосних ємностей на території України).*

4. Pichugin S., Oksenenko K. Area of application and operation experience of spiral-fold silos in Ukraine. *ArCivE 2023. Xth International scientific conference on architecture and civil engineering*. Varna, 2023. Vol. 4. P. 14 – 22. <https://events.vfu.bg/archive/files/2023/Proceedings%20ArCivE%202023.pdf>. *(Особистий внесок – проаналізовано та описано сферу застосування спірально-фальцевих конструкцій: силоси, для різних видів сипучих матеріалів; резервуари для зберігання різних рідин, метантенки в складі біоенергетичних установок. Розглянуто приклади багаторічного досвіду експлуатації цих конструкцій в різних галузях на території України. Наведено приклади аварій спірально-фальцевих силосів та причини їх виникнення).*

Публікації у наукових фахових виданнях України

5. Pichugin S., Oksenenko K. Comparative analysis of design solutions of metal silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2019.

Vol. 53, № 2. P. 54 – 60. doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890. (Фахове видання) *(Особистий внесок – сформовано класифікацію металевих силосів та досліджено галузь їх застосування. Описано технологію виготовлення спіральньо-фальцевих силосів, проаналізовано функції кожного механізму, який використовується при монтажі силосу).*

6. Пічугін С., Оксененко К. З досвіду експлуатації економічних металевих спіральньо-фальцевих силосів для сипучих матеріалів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2021. Вип. 40, С. 166 – 173. (Фахове видання) *(Особистий внесок – проведено технічне обстеження елеватора зі спіральньо-фальцевими силосами з багаторічним досвідом експлуатації).*

7. Пічугін С., Дмитренко А., Оксененко К. Експериментальне дослідження елементів конструкції металевих спіральньо-фальцевих силосів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2022. Вип. 26. С. 135 – 144. doi:10.31650/2707-3068-2022-26-135-144. (Фахове видання) *(Особистий внесок – проведено експериментальне дослідження, проаналізовано результати експерименту).*

8. Pichugin S., Oksenenko K. Comparison of design methods for steel silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Vol. 2, №59. P. 63 – 69. (Фахове видання) *(Особистий внесок – Проведено огляд нормативних документів, які діють на території України, що регламентують питання визначення навантажень та зусиль в силосних ємностях. Проаналізовано відмінності між розрахунками горизонтальних та вертикальних тисків на стіни силосів за ДБН В2.2-8-98 Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна та ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Ч. 4. Бункери і резервуари.).*

9. Пічугін С., Шульгін В., Оксененко К. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану стінки сталевого спіральньо-фальцевого силосу. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2023. Вип. 27. С. 94 – 103. doi:10.31650/2707-3068-2023-27-94-103. (Фахове видання) *(Особистий внесок –*

проведено експериментальне дослідження, проаналізовано результати експерименту).

Публікації в інших виданнях

10. Пічугін С., Оксененко К. Сталеві спірально-фальцеві конструкції у складі біоенергетичних комплексів. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022*: колективна монографія Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». Дніпро, 2022. С 470 – 484. (Особистий внесок – проаналізовано характеристики тріски деревини як сипучого матеріалу. Розглянуто приклади використання спірально-фальцевих конструкцій як складів для зберігання біомаси в твердому вигляді, за кордоном та на території України. Описано перший спірально-фальцевий метантенк з горизонтальним процесом ферментації. Розглянуто види спірально-фальцевих метантенків, їх технічні характеристики та особливості).

11. Пічугін С., Оксененко К. Сучасні спірально-фальцеві ферментери у складі підприємств із виробництва біоетанолу. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження. 2023*: колективна монографія / під ред. О. В. Степової. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. Полтава, 2023. С. 158 – 170. (Особистий внесок – надано класифікацію ферментерів, в залежності від способу ферментації субстрату, виділені переваги твердофазного бродіння. Описано типи ферментерів, їх переваги, недоліки та сфери застосування, в залежності від внутрішнього оснащення. Проаналізовано переваги та недоліки металевих та залізобетонних резервуарів, застосованих в якості конструкцій ферментерів. Описано перший горизонтальний ферментер спірально-фальцевого типу. Наведено конструкцію та характеристики сучасного спірально-фальцевого ферментера – важливої складової біоетанольних комплексів.).

12. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О., Андрієвський Ю.В. Застосування сталевих спірально-фальцевих силосів у сучасних умовах. *Промислове будівництво та інженерні споруди. 2023*. Вип. 4. С. 25 – 31. (Особистий внесок – проаналізовано

та описано сферу застосування спірально-фальцевих конструкцій. Розглянуто приклади багаторічного досвіду експлуатації цих конструкцій в різних галузях на території України. Наведено приклади аварій спірально-фальцевих силосів та причини їх виникнення. Проаналізовано експериментальні дослідження спірально-фальцевих силосів, які підтвердили високу надійність і економічність цих конструкцій.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Пічугін С., Оксененко К. Конструктивні рішення сталевих силосів для сипучих матеріалів. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи*: зб. наук. праць XII Міжнар. наук.-практ. конф.. м. Полтава, 6 грудня 2019 р. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2019. С. 291 – 294.

2. Пічугін С., Оксененко К. Сталеві спірально-фальцеві силоси: конструкція і розрахунок. *72-га наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, присвячена 90-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*. Тези 72-ої наук. конф. м. Полтава, 21 квітня – 6 травня 2020 р. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2020. С. 492 – 493.

3. Пічугін С., Оксененко К. Особливості конструкцій і розрахунку сталевих спірально-фальцевих силосів. *III Міжнародна українсько-азербайджанська конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2020»*: зб. наук. праць за матер. III Міжнар. українсько-азербайджанська конф. Баку – Полтава, 1 – 2 червня 2020р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2020. С. 161 – 163.

4. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О., Андрієвський Ю.В. Інноваційний тип тонкостінної просторової конструкції для сипучих матеріалів – спірально-фальцевий металевий силос. *«Тренди та тенденції розвитку будівельної галузі»*: матер. міжнар. наук.-практ. конф. Харків, 18 – 19 листопада 2020р. Харків: ХНУМГ. 2020. С. 119 – 120.

https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/2020_11_compressed.pdf.

5. Пічугін С.Ф., Шульгін В.В., Оксененко К.О. Експериментальне дослідження сталевих спіральних-фальцевих силосів. *73-я наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету*. Тези 73-ої наук. конф. м. Полтава, 21 квітня – 13 травня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 132 – 133.

6. Пічугін С.Ф., Шульгін В.В., Оксененко К.О. Експериментальне дослідження конструкцій сталевих спіральних-фальцевих силосів. *IV Міжнародна українсько-азербайджанська конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2021»*: зб. наук. праць за матер. IV Міжнар. українсько-азербайджанська конф. Баку – Полтава, 20 – 21 травня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 156 – 158.

7. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О., Андрієвський Ю.В. Спірально-фальцевий силос – інноваційний склад для зберігання тріски деревини. «Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі». Матер. XIX міжнар. наук.-прак. конф. м. Чернігів, 19 – 22 вересня 2021р. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». С. 245 – 246.

8. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О. Тріска деревини, як паливо для біоенергетичних комплексів. *«Екологія. Довкілля. Енергозбереження»*. Матер. II міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 2 – 3 грудня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 266 – 268.

9. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О. Модульний склад шатрового типу для тимчасового зберігання зерна. *74-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету*. Зб. матер. 74-ої наук. конф. м. Полтава, 28 квітня 2022р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 106 – 107.

10. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О. Метантенк – металевий спіральний-фальцевий резервуар – у складі біоенергетичних об'єктів. *«Подолання*

екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022». Зб. матер. I Міжнар. наук.-практ. конф., Полтава – Львів. 26 – 27 травня 2022р. Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». 2022. С. 483 – 485.

11. Пічугін С.Ф., Дмитренко А.О., Оксененко К. О. Робота фальцевого замка металевих спірально-навивних силосів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Тези доповідей. м. Одеса, 9 – 11 червня 2022р. м. Одеса: ОДАБА. 2022. С. 35 – 37.

12. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Розрахунок міцності та надійності сталевих силосів. *Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану*. Зб. наук. пр. за матер. XIV Міжнар. наук.-тех. конф. м. Полтава, 20 – 22 червня 2022р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 99 – 101.

13. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О. Конструктивні рішення споруд для тимчасового зберігання зерна. *Environment recovery and reconstruction: war contex 2022*. Зб. матер. Міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 17–18 листопада 2022 року. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 85 – 86.

14. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Перспективні рішення ферментерів у складі виробництв біоетанола. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження*. Зб. матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 1 – 2 грудня 2022 року. Полтава : НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 236 – 239.

15. Пічугін С.Ф., Шульгін В.В., Оксененко К.О. Дослідження роботи міжфальцевої зони стінки металевого спірально-фальцевого силосу . *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Тези доповідей. м. Одеса, 8 – 10 червня 2022р. м. Одеса: ОДАБА. 2023. С. 35 – 37.

16. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О. Металеве сховище спірально-фальцевого типу. *Проблеми будівельного та транспортного комплексів*. Зб. матер. Міжнар. наук.-тех. on-line конф. м. Кропивницький, 23 – 24 травня 2023р. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 114 – 115

17. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Дослідження роботи на згин міжфальцевої зони стінки спіральньо-фальцевого силосу. *Проблеми будівельного та транспортного комплексів*. Зб. матер. Міжнар. наук.-тех. on-line конф. м. Кропивницький, 23 – 24 травня 2023р. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С.116 – 117.

18. Пічугін С., Оксененко К. Спіральньо-фальцеві силоси – надійні листові конструкції універсального призначення. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи*: зб. наук. праць XVI Міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 12 – 13 грудня 2023р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2023. С. 324 – 326.

19. Пічугін С., Оксененко К. Спіральньо-фальцеві ємності – невід’ємна складова біоенергетичних комплексів. *Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України*. Матер. наук.-практ. конф. м. Дніпро, 13 березня 2024 р. Дніпро: Енерго-інноваційний хаб ПДАБА, 2024. С.100 – 103.

20. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О. Сфера застосування металевих спіральньо-фальцевих конструкцій. *IX Міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Інновації у будівництві»*. Тези доповідей. м. Луцьк, 14 травня 2024р. bit.ly/iic-2024

21. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О. Методи розрахунку надійності конструкцій спіральньо-фальцевих слосі. *76-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету*. Зб. матер. 76-ої наук. конф. м. Полтава, 17 травня 2024р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2024. С. 126 – 127.

22. Оксененко К.О., Титаренко А.Т., Токарь Б.С. Експериментальне дослідження роботи на згин міжфальцевої зони оболонки спіральньо-фальцевого силосу. *76-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету*. Зб. матер. 76-ої наук. конф. м. Полтава, 17 травня 2024р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2024. С. 128 – 129.

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| ВСТУП..... | 17 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ | 24 |
| 1.1. Сталеві листові конструкції: особливості, класифікація,..... | 24 |
| робота під навантаженням | 24 |
| 1.2. Металеві силоси: галузь застосування, класифікація. | 29 |
| 1.3. Спірально-фальцеві силоси: особливості технології монтажу, переваги та недоліки конструкцій. | 35 |
| 1.4. Визначення навантаження від тиску сипучого матеріалу на конструкції силосів | 39 |
| 1.5. Огляд робіт в області досліджень металевих силосів..... | 43 |
| 1.6. Огляд досліджень надійності будівельних конструкцій | 45 |
| 1.7. Висновки по стану питання і задачі дисертаційної роботи | 53 |
| РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ | 55 |
| 2.1. Особливості винаходу і розвитку спірально-фальцевих силосів | 55 |
| 2.2. Розгляд галузі застосування спірально-фальцевих силосів | 62 |
| 2.3. Висновки по розділу..... | 82 |
| РОЗДІЛ 3 РОЗВИТОК МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ | 83 |
| 3.1. Специфіка конструкції спірально-фальцевого силосу | 83 |
| 3.2. Порівняння методик визначення навантажень та впливів на конструкцію силосу за різними нормативними документами | 85 |
| 3.3. Особливості розрахункової схеми спірально-фальцевого силосу | 95 |
| 3.4. Алгоритм розрахунку металевого силосу за безмоментною теорією.... | 98 |
| 3.5. Напружено-деформований стан металевого спірально-фальцевого силосу | 100 |

| | |
|---|------------|
| 3.6. Порівняння теоретичних розрахунків з розрахунками методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА - САПР. | 110 |
| 3.7. Висновки по розділу..... | 119 |
| РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ | |
| КОНСТРУКЦІЙ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВОГО СИЛОСУ | 122 |
| 4.1. Експериментальне дослідження фальцевого замку на розтягуючі навантаження..... | 123 |
| 4.2. Експериментальне дослідження на згин міжфальцевої зони оболонки спірально-фальцевого силосу | 133 |
| 4.3. Порівняння результатів експериментального дослідження на згин міжфальцевої зони оболонки спірально-фальцевого силосу з розрахунком методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР..... | 142 |
| 4.4. Висновки по розділу..... | 144 |
| РОЗДІЛ 5 ДОСВІД БУДІВНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТАЛЕВИХ | |
| СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ | 146 |
| 5.1. Досвід будівництва металевих спірально-фальцевих силосів на території України. | 146 |
| 5.2. Досвід експлуатації металевих спірально-фальцевих силосів на території України. | 152 |
| 5.3. Висновки по розділу..... | 166 |
| РОЗДІЛ 6 ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ СПІРАЛЬНО- | |
| ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ | 168 |
| 6.1. Імовірнісна природа тиску сипучого матеріалу..... | 168 |
| 6.2. Оцінювання надійності силосу на основі аналізу резерву міцності з урахуванням кільцевих напружень | 175 |
| 6.3. Оцінювання надійності металевих силосів з урахуванням складного напруженого стану | 179 |

| | |
|---|-----|
| 6.4. Оцінювання надійності металевого спірально-фальцевого силосу з урахуванням напружено-деформованого стану..... | 188 |
| 6.5. Висновки по розділу..... | 204 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 206 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 209 |
| ДОДАТКИ..... | 226 |
| ДОДАТОК А Список опублікованих наукових праць здобувача за темою дисертації | 227 |
| ДОДАТОК Б Механічні дослідження роботи зразків сталі класу DX51D | 234 |
| ДОДАТОК В Експериментальне дослідження фальцевого зразку на розтягуючі навантаження | 236 |
| ДОДАТОК Г Експериментальне дослідження міжфальцевої зони оболонки силосу на згин..... | 252 |
| ДОДАТОК Д Довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи.. | 266 |

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Велика кількість сучасних технологічних процесів пов'язана з переробкою різних сипучих матеріалів. Хімічна, металургійна, а також промисловість будівельних матеріалів не тільки добувають матеріали: вугілля, руду, щебінь, пісок та інші, а в процесі переробки первинної сировини виробляють велику кількість нових сипучих матеріалів, таких як кокс, цемент, шлак, концентрати та інші. Також треба відмітити агропромисловий комплекс, в якому майже вся продукція являє собою сипучі тіла.

Така значна кількість сипучих матеріалів призводить до необхідності використовувати багато різноманітних машин, механізмів та споруд для більш швидшого та легшого процесу переробки. Один із необхідних етапів у технологічному процесі – зберігання матеріалу. Звичайний склад не є раціональним рішенням, оскільки потребує значних затрат людської праці для завантаження та вивантаження матеріалу. Рішенням цієї проблеми – стали металеві силоси для сипучих матеріалів.

Наразі існує велика кількість конструктивних рішень металевих силосів. Найбільшу популярність у нашій країні та за кордоном набули панельні силоси, виготовлені з гофрованих або гладких панелей, з'єднаних між собою за допомогою болтів. Але такі конструкції не підходять для зберігання сипучих матеріалів з найменшими розмірами твердих частин, таких як: цемент, кокс, шлак та інші. Для таких матеріалів застосовують зварні або спіральні конструкції. У цільнозварному силосі використовується сталевий лист товщиною 6-14 мм, який зварюється у цільний циліндричний корпус. Завдяки зварному з'єднанню та товстому металу конструкція має високу міцність й герметичність. Але й за рахунок цього силос має значну вагу, а отже й вартість, а велика кількість зварних швів ускладнює монтаж. Розробка спіральновивних силосів з фальцевим замком вирішила цю проблему. Розроблена технологія дозволяє, використовуючи спеціальне обладнання для обробки

листового металу, безпосередньо на будівельному майданчику, без використання болтів та зварних з'єднань, вести компактний і швидкий монтаж силосів високої міцності.

З появою технології навивання силосів, розрахунками міцності спіральньо-фальцевих конструкцій займались ряд вчених: Ягер-Канас А., Лі З. та Пастернак Х. та ін. Не дивлячись на наявність наукових робіт, присвячених міцності спіральньо-фальцевих силосів, надійність цих конструкцій не була досліджена.

Метою роботи є вирішення задачі оцінювання надійності металевих спіральньо-фальцевих силосів для сипучих матеріалів на основі врахування особливостей конструкції та дійсної роботи під навантаженням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Наведення узагальненої класифікації металевих силосів. Аналіз переваг та недоліків кожного типу конструкції.
2. Вивчення історії винаходу спіральньо-фальцевих конструкцій та аналіз галузі застосування цих конструкцій у різних областях промисловості.
3. Проведення аналізу методик визначення навантажень та впливів на конструкцію силосу за різними нормативними документами.
4. Дослідження специфіки конструкції спіральньо-фальцевих силосів, яка впливає на їх напружено-деформований стан. Аналіз особливості розрахункової схеми спіральньо-фальцевих силосів.
5. Розгляд алгоритму розрахунку на міцність металевого силосу за безмоментною теорією. Моделювання спіральньо-фальцевого силосу за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР.
6. Розгляд напружено-деформованого стану міжфальцевої зони оболонки з постійною товщиною стінки. Порівняння теоретичних розрахунків з результатами розрахунку силосу методом скінченних елементів в програмного комплексу ЛІРА-САПР.

7. Експериментальне дослідження елементів конструкції спірально-фальцевих силосів. Вивчення реальної роботи фальцевого з'єднання штрипса при дії розтягуючих навантажень та роботи оболонки в міжфальцевій зоні при згині.
8. Огляд прикладів будівництва та досвіду експлуатації металевих спірально-фальцевих силосів на території України.
9. Розробка методики оцінювання надійності конструкцій металевих спірально-фальцевих силосів.
10. Одержання чисельних значень надійності спірально-фальцевого силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана в рамках держбюджетних дослідних тем у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»: «Ресурсоекономні технології відновлення і реконструкції житлових, громадських виробничих будівель та захисних споруд цивільної оборони» (державний реєстраційний номер 0116U002567), «Комплексні конструктивні рішення забезпечення енергоефективності громадських будівель в умовах євроінтеграції» (державний реєстраційний номер 0118U001097), «Енергоефективні конструктивні рішення елементів будівель» (державний реєстраційний номер 0121U109497).

Робота відповідає напряму досліджень кафедри будівельних конструкцій.

Об'єкт дослідження. Дійсна робота металевих спірально-фальцевих силосів під дією навантажень від сипучих матеріалів.

Предмет дослідження. Надійність металевих спірально-фальцевих силосів для сипучих матеріалів, визначена на основі врахування особливостей конструкції та дійсної роботи під навантаженням.

Методи дослідження.

1. Пошуковий метод дослідження літературних джерел, вивчення та аналіз.

2. Методи теоретичних досліджень для узагальнення, порівняння та аналізу конструкцій різних типів металевих силосів.
3. Методи будівельної механіки та опору матеріалів при визначенні напружено-деформованого стану спірально-фальцевого силосу.
4. Метод скінченних елементів при моделюванні напружено-деформованого стану спірально-фальцевого силосу.
5. Експериментальні методи дослідження елементів конструкцій спірально-фальцевих силосів.
6. Методи теорії надійності будівельних конструкцій для розроблення методики розрахунку надійності металевих спірально-фальцевих силосів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Набуло подальшого розвитку узагальнення даних щодо галузі можливого застосування металевих спірально-фальцевих конструкцій.
2. Одержано нові результати порівняння нормативних розрахунків визначення навантажень та впливів на конструкції силосу за різними нормативними документами.
3. Уперше одержано нові дані щодо характеру роботи елементів конструкцій спірально-фальцевих силосів за результатами проведених експериментальних досліджень.
4. Підтверджено відповідність результатів експериментальних досліджень спірально-фальцевих силосів розрахункам за методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР.
5. Уперше розроблено методику розрахунку надійності металевих спірально-фальцевих силосів.
6. Уперше отримано числові значення оцінок надійності спірально-фальцевого силосу та проведено порівняння рівня надійності силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами.

Практичне значення. Результати виконаних експериментально-теоретичних досліджень впроваджені в практику проєктування та монтажу

спірально-фальцевих силосів ПП «ВКФ «КРЕАТИВ ГРУП», підприємство займається зведенням спірально-фальцевих конструкцій на території України.

Зібрана інформація, щодо досвіду експлуатації металевих спірально-фальцевих силосів на прикладі двох елеваторів була врахована при організації технічної експлуатації сучасного елеватора підприємства ТОВ «РОСТ-АГРО».

Результати дисертаційної роботи використовуються в учбовому процесі у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» під час викладання навчальних курсів: «Сучасні проблеми надійності в будівництві» та «Методика граничних станів і нормування навантажень». Аспірантка Оксененко К.О. є співавтором навчального посібника – Pichugin S.F., Klochko L.A., Oksenenko K.O. Methods of limit states and load standardization: manual for students of specialty 192 “Construction and civil engineering” Poltava: National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2022. 250 с.

Особистий внесок здобувача.

1. Проведено аналіз застосування спірально-фальцевих конструкцій у різних галузях промисловості.
2. Проведено аналіз методик визначення навантажень та впливів на конструкцію силосу за різними нормативними документами.
3. Досліджено особливості конструкції спірально-фальцевого силосу та його напружено-деформованого стану.
4. Проведено експериментальні дослідження фальцевого з'єднання штрипса при дії розтягуючих навантажень.
5. Проведено експериментальні дослідження оболонки спірально-фальцевого силосу в міжфальцевій зоні при згині.
6. Проведено порівняння результатів експериментальних досліджень із розрахунками методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР.
7. Проведено обстеження елеваторів зі спірально-фальцевими силосами на території України.

8. Розроблено методику розрахунку надійності металевого спіральньо-фальцевого силосу.
7. Проведено порівняння числових значень надійності спіральньо-фальцевого силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на 72, 73 74, 75, 76 наукових конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (м. Полтава, 2020 – 2024) ; XII, XIII та XVI Міжнародних науково-практичних конференціях «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (м. Полтава, 2019, 2020, 2023); III, IV Міжнародних українсько-азербайджанських конференціях «Building innovations» (м. Баку – Полтава, 2020, 2021); Міжнародній науково-практичній конференції «Тренди та тенденції розвитку будівельної галузі» на базі ХНУМГ ім. О.М. Бекетова (м. Харків, 2020); ICSF 2021 Second international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters (м. Кривий-Ріг, 2021); «Ніч молодіжної науки-2021» (м. Київ, 2021); X-th, XI-th International scientific conference on architecture and civil engineering (Varna, Bulgaria, 2021, 2023); XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі» (м. Чернігів, 2021); II та III Міжнародних науково-практичних конференціях «Екологія. Довкілля. Енергозбереження» (м. Полтава, 2021, 2022); I Міжнародній науково-практичній конференції «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022» (м. Полтава – Львів, 2022); Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини» (м. Одеса, 2022 – 2024); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану» (м. Полтава, 2022); Міжнародній науково-практичній конференції «Environment recovery and reconstruction: war contex 2022» (м. Полтава, 2022); Міжнародній науково-

технічній on-line конференції «Проблеми будівельного та транспортного комплексів» (м. Кропивницький, 2023); Науково-практичній конференції «Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України» (м. Дніпро, 2024); ІХ Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Інновації у будівництві» (м. Луцьк, 2024).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені в 12 публікаціях, із них 2 у наукометричній базі SCOPUS, 5 у фахових виданнях рекомендованих ВАК України, 2 – у закордонних виданнях.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, п'ятьох додатків. Роботу викладено на 269 сторінках машинописного тексту, з яких 192 сторінки основного тексту; робота містить 102 рисунків, 14 таблиць, 159 найменувань літературних джерел (17 стор.) та 5 додатків (44 стор.).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

У даному розділі проводиться огляд сталевих листових конструкцій, особливості та основи теорії їх розрахунку. Наводиться узагальнена класифікація металевих силосів. Проводиться аналіз переваг та недоліків кожного типу конструкцій металевих силосів. Описується поетапна технологія монтажу спірально-фальцевих силосів, їх переваги та недоліки. Розглядаються методи визначення основних для силосів навантажень від тиску сипучих матеріалів. Проводиться огляд та критичний аналіз результатів досліджень металевих силосів та надійності будівельних конструкцій.

1.1. Сталеві листові конструкції: особливості, класифікація, робота під навантаженням

Теорії розрахунку тонкостінних ємностей зберігання розвивалися на базі досліджень сталевих листових конструкцій.

Одними з перших сталевих листових конструкцій прийнято вважати резервуари та трубопроводи великих діаметрів для транспортування нафти, оскільки саме розвиток нафтової промисловості дав поштовх для їх дослідження. Перший вертикальний сталевий резервуар на заклепкових з'єднаннях був побудований в 1878 році, за проектом В. Г. Шухова [122]. Листові конструкції характеризуються великою протяжністю з'єднань, довжина яких приблизно вдвічі більша, ніж у звичайних металоконструкцій, тому наступний етап розвитку цих конструкцій пов'язаний із дослідженнями технології зварювання металу. Вагомий внесок у цій сфері був зроблений вченими інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона [110]. Наразі листові конструкції – найбільш металоємна галузь застосування металу у будівельних конструкціях – 30...45 % сталі приходяться на ці конструкції.

Основні особливості листових конструкцій порівняно з іншими металевими конструкціями:

1. З'єднання листових конструкцій повинні бути не тільки міцними, але й щільними (герметичними), їх якість повинна бути вищою, ніж у звичайних будівельних конструкціях.
2. Листові конструкції являють собою суцільні тонкостінні ємнісні конструкції, що зумовлює їхній двовісний напружений стан.
3. Листові конструкції поєднують функції несучих і огорожувальних конструкцій.

Головна специфіка листових конструкцій полягає в можливості експлуатуватися у різних умовах:

- конструкції можуть бути надземними, наземними, напівзаглибленими, підземними, підводними;
- листові конструкції можуть сприймати статичні та динамічні навантаження;
- конструкції повинні надійно працювати під низьким, середнім і високим тиском, під вакуумом, під впливом низьких, середніх і високих температур, нейтральних або агресивних середовищ.

Враховуючи всі перелічені особливості, сталеві листові конструкції можна класифікувати наступним чином, що ілюструється на рисунку 1.1.

Особливості розрахунку сталевих листових конструкцій. При розрахунку металевих листових конструкцій, розрізняють наступні види їх напруженого стану [149]:

- безмоментний напружений стан, коли рівновага оболонки забезпечується тільки напруженнями, рівномірно розподіленими за товщиною оболонки;
- моментний напружений стан, коли рівновага оболонки забезпечується згинальними напруженнями (зустрічається відносно рідко для товстих оболонок);
- крайовий ефект – місцевий згин окремих ділянок листових конструкцій.

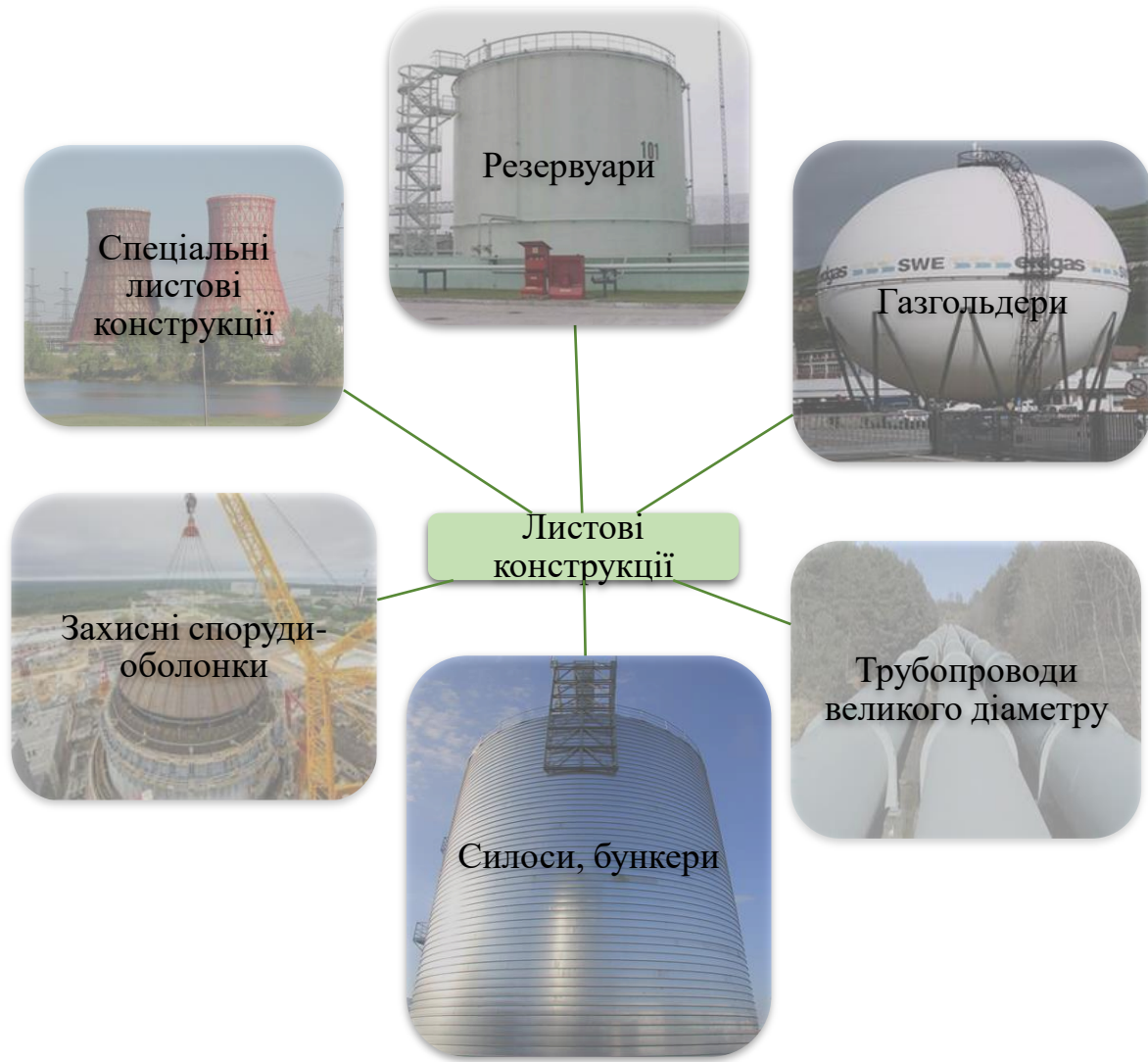


Рис. 1.1 Класифікація сталевих листових конструкцій

Безмоментний напружений стан. У більшості випадків листові конструкції представлені у вигляді тонкостінних оболонок обертання. Оболонкою називається тіло, яке обмежене двома поверхнями, відстань між якими (товщина оболонки t) невелика по відношенню до інших розмірів [122]. Поверхня такої оболонки має одну або дві осі симетрії та два радіуса кривизни, які перпендикулярні поверхні: r_1 – меридіональний радіус, що утворює криву обертання r_2 – кільцевий радіус обертання з початком на осі симетрії. Геометрія поверхні оболонки характеризується кривиною Гауса. Вирізняють оболонки: поверхня з додатною гаусовою кривиною (сфера, еліпс), нульовою (циліндр, конус) та від’ємною (гіперболоїд).

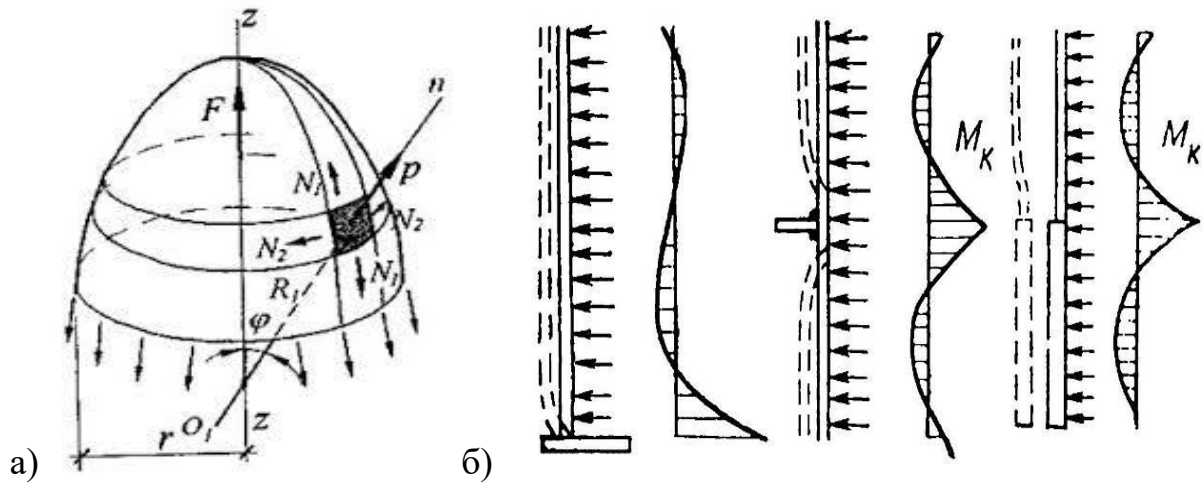


Рис. 1.2 До розрахунку листових конструкцій: а) безмоментний напружений стан; б) крайовий ефект у листових конструкціях

Відповідно до ДБН В.2.6-198:2014 [102] розрахунок на міцність листових конструкцій (оболонок обертання), які перебувають у безмоментному напруженому стані, слід виконувати за формулою:

$$\frac{1}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 + 3\tau_{12}^2} \leq 1 \quad (1.1)$$

де σ_1 – меридіональні напруження;

σ_2 – кільцеві напруження;

τ_{12} – дотичні напруження у точці стінки оболонки, яка розглядається;

γ_c – коефіцієнт умов роботи, який призначається згідно табл. 5.1 [102]

R_y – розрахунковий опір сталі за границею текучості.

Напруження у безмоментних тонкостінних оболонках обертання, що знаходяться під внутрішнім рівномірним тиском, слід визначати за формулами:

– для циліндричних

$$\sigma_1 = \frac{p_2 r}{2t}; \sigma_2 = \frac{p_2 r}{t} \quad (1.2)$$

– для сферичних

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p_2 r}{2t}; \quad (1.3)$$

– для конічних

$$\sigma_1 = \frac{p_2 r}{2t \cos \theta}; \sigma_2 = \frac{p_2 r}{t \cos \theta} \quad (1.4)$$

де p_2 – розрахунковий внутрішній тиск на одиницю поверхні оболонки;

r – радіус середньої поверхні оболонки;

t – товщина оболонки;

θ – кут між твірною конуса і його віссю $z-z$.

Така робота (безмоментний напружений стан) характерна для гладких ділянок листових конструкцій, розташованих далеко від опорних закріплень, змін товщин оболонки та ін.

Крайовий ефект – це місцевий згин, що з'являється у місцях стримування осьових деформацій, зміни їх умов (рис. 1.2, б).

Особливості крайового ефекту:

- місцевий згин виникає у вузькому діапазоні і швидко затухає;
- складний розрахунок за спеціальними формулами;
- явище в цілому – негативне, ступінь якого зростає у випадках різкої зміни форми ЛК;
- боротьба з крайовим ефектом – не підсиленням і збільшенням товщин, і з'єднань, а за допомогою конструктивних засобів.

Серед робіт по дослідженню теорії оболонок, варто відзначити такі праці, авторами яких є: В.В. Власов, Є.Н. Лессиг, С.П. Тимошенко, О.Л. Гольденвейзер, С.Н. Кан, А.І. Сегаль [82, 91, 92, 122].

1.2. Металеві силоси: галузь застосування, класифікація.

У теперішній час існує досить велике розмаїття видів сипучих матеріалів, загальна кількість яких сягає декількох тисяч. Для їх зберігання у різні часи застосовували залізобетонні або металеві зварні силоси.

Враховуючи особливості сипучих матеріалів, довгий час для зберігання матеріалу використовували залізобетонні конструкції. До них відносяться бункери та силоси, які використовуються в усіх галузях промисловості, сільськогосподарської та транспортної сфери. Силоси можуть використовуватись: як склади готової продукції, як проміжні ємності, для зберігання сировини, або напівфабрикатів. Металеві силоси, для зберігання сипучих матеріалів, почали використовувати відносно недавно, і вони вже підтвердили свою здатність задовольняти всі вимоги, які висуваються до складів такого типу. У порівнянні із залізобетонними силосами, вони мають такі переваги: можливість заводського виготовлення конструкцій; менша маса; простота транспортування; швидкість проведення монтажних робіт; менша вартість. На даний час, металеві ємнісні конструкції, для зберігання різних видів сипучих матеріалів, є одними з найбільш розповсюджених типів будівельних конструкцій [60].

Загальні характеристики силосів. Силоси використовуються для зберігання різноманітних сипучих матеріалів у різних галузях промисловості. Найчастіше вони застосовуються у зернових елеваторах, цементних та вугільних складах, у металургії та хімічній промисловості. Силоси можуть бути: складами сировини, напівфабрикатів та готової продукції, а також проміжними ємностями в технологічному процесі.

Широке застосування силосних складів у різних галузях пояснюється цілим рядом переваг безтарного зберігання сипучих матеріалів у силосах, у порівнянні зі зберіганням їх у бункерах, а також відкритих чи закритих складах, оснащених кранами. Силоси являють собою компактні споруди з високим коефіцієнтом корисного об'єму, які дають змогу створити більші ємності, при відносно

невеликих площах забудови. Це суттєво полегшує розміщення складів на генеральному плані.

Завдяки зручності завантаження, розвантаження та високому рівню механізації завантажувально-розвантажувальних робіт, цей тип закритих сховищ є найкращим у наш час. Відсутність у силосів вільних поверхонь, методи завантаження та розвантаження, які в них застосовуються, забезпечують надійне зберігання матеріалів та сприяють зменшенню втрат. У силосі може бути організоване сушіння матеріалу, що зберігається, а також періодичне переміщення, для запобігання злежування чи самозаймання.

Силос – саморозвантажуюча ємнісна споруда, в якій висота вертикальної частини в 1,5 рази більша діаметру або меншого розміру в плані. Для силосів діаметром 18 метрів і більше – відношення вертикальної частини до діаметру може бути меншим. Конструкція призначена для довготривалого зберігання та перевантаження сипучих матеріалів. Часто лише несуча здатність ґрунтів обмежує висоту силосів.

Основні конструктивні елементи силосу: покрівля, корпус, дно. Розрізняють силоси з плоским і конусним дном (рис. 1.3).

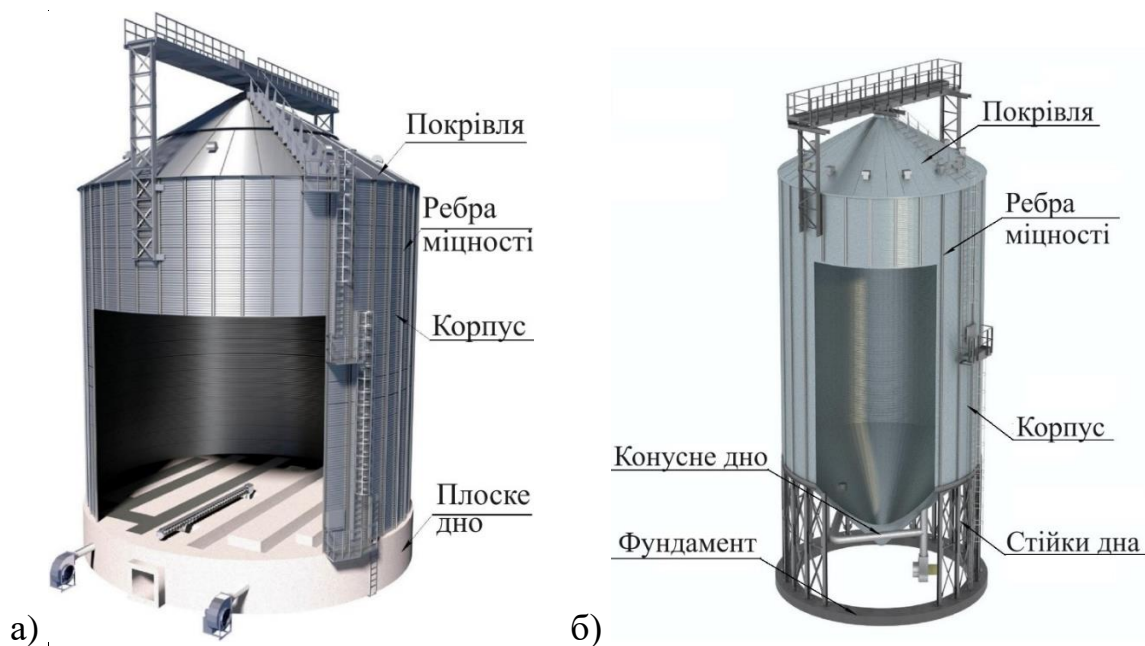


Рис. 1.3. Конструктивні елементи силоса: а) силос з плоским дном; б) силос із конусним дном.

Покрівля силосу являє собою просторову конусну конструкцію, зібрану із несучих балок (крокв) і трапецієвидних секторів. Трапецієподібні сектори покрівлі можуть мати по краях ребра коробчастого перерізу, які надають велику жорсткість конструкції, і мають кращу захищеність від проникнення атмосферної вологи. Покрівля сприймає снігове навантаження та призначена для захисту від потрапляння в ємність силосу атмосферних опадів. Корпус – циліндрична оболонка, конструкція якої залежить від типу силосу.

Враховуючи велику кількість сипучих матеріалів та їх особливості, стає зрозуміло наявність великої кількості типів конструкцій металевих силосів. На рисунку 1.4 наведено класифікацію металевих силосів для сипучих матеріалів. Розглянемо більш детально кожен тип.



Рис. 1.4 Класифікація металевих силосів

Суцільні зварні силоси (рис. 1.5, а) мають циліндричний корпус, який виготовлений із металевих листів, з'єднаних між собою зварним швом. За способом виготовлення, ці силоси поділяються: на збірні з листів та рулонні. Листові силоси зварюються у цільний корпус із окремих листів металу. Рулонні силоси виготовляються із листового металу, який доставляється на будівельний майданчик у вигляді рулону, висота якого рівна висоті циліндра. Під час монтажу рулон встановлюють у вертикальне положення і розгортають по периметру кільцевого фундаменту, утворюючи замкнену стінку силосу. Перевагами таких силосів є герметичність та міцність. Завдяки цьому вони придатні для зберігання різноманітних матеріалів. Недоліки цих конструкцій – висока матеріалоемність та велика кількість зварних швів.

Панельні силоси (рис. 1.5, в), їх циліндричний корпус виготовлений із гофрованих або гладких панелей, з'єднаних між собою за допомогою болтів. Гофрований профіль панелей сприяє економії металу (за рахунок меншої товщини панелі) і забезпечує підвищену стійкість силосу від бокових навантажень. Для компенсації втрати несучої здатності панелі, через гофрований профіль, на промислові силоси встановлюють додаткові ребра жорсткості. Переваги панельних силосів – можливість сприймати значні радіальні навантаження від матеріалу, відсутність зварних швів, висока міцність. Недоліки цього варіанту силосів – велика кількість болтових з'єднань, негерметичність. Такий тип конструкції силосу є найбільш поширеним в Україні та за кордоном, його використовують в агропромисловому комплексі. Однак, негерметичність корпусу не дозволяє використовувати даний тип конструкції для зберігання сипучих матеріалів з дрібними частинками (цемент, кокс, шлак та ін.).

Панельно-каркасні силоси (рис. 1.5, г) мають панелі з гнутого профіля, що з'єднуються на болтах. У цілях герметизації силосу під головки болтів встановлюються шайби з прокладками. Покрівля силосів конічна, вона складається із кільцевих та радіальних ребер, по яким влаштовується настил. Переваги цих силосів – міцність та відсутність зварних з'єднань, недоліки –

велика кількість болтових з'єднань, негерметичність, підвищені металоємність та витрати праці.

Мембранно-каркасні силоси [60]. Основним конструктивним елементом цих силосів є циліндрична оболонка мембранно-каркасного типу, виконана із стрічки товщиною 0,6 – 1 мм та шириною 1250 мм. Стрічка кріпиться по висхідній спіралі. Переваги цього варіанту силосів – обшивка-мембрана сприймає тільки розтягуючі зусилля, що дозволяє в повній мірі використовувувати міцність сталі; недоліки – велика металоємність та складність монтажу.

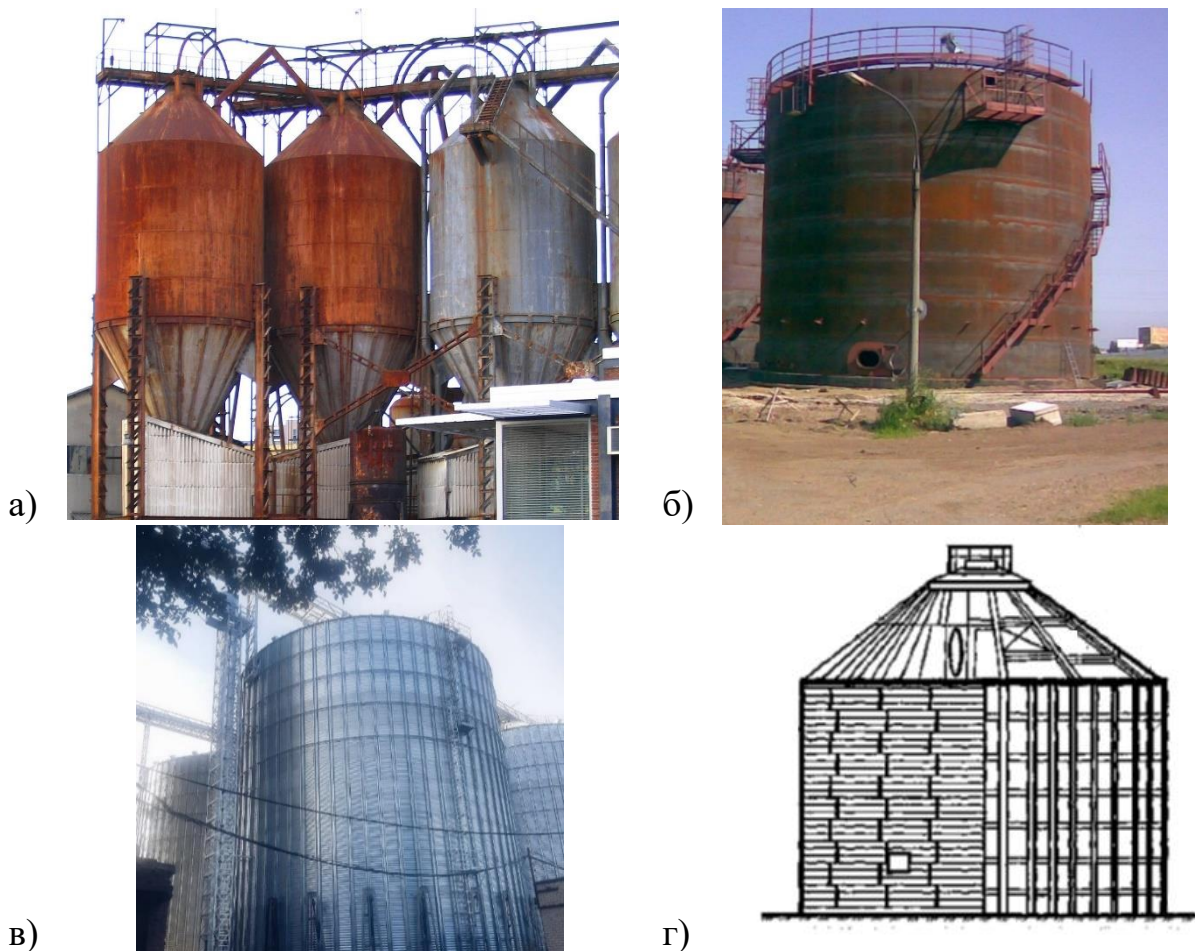


Рис. 1.5. Типи металевих силосів: а,б) суцільні зварні силоси з конусним дном; в) панельні із гофрованих панелей; г) панельно-каркасні

Спірально-болтовий силос (рис. 1.6, а) включає циліндричну оболонку, виготовлену із металевої стрічки, вигнутої по спіралі, кромки якої з'єднані висхідним ребром (кутик або швелер), за допомогою болтів із постійним кроком. Переваги таких силосів – відсутність зварних з'єднань, міцність, відсутність додаткової обробки кромки рулонних заготовок та висхідних ребер, для формоутворення корпусу; недоліки – необхідне спеціальне обладнання для утворення корпусу, додаткове обладнання для гнуття та монтажу висхідних ребер, свердління великої кількості отворів та монтаж болтів; для забезпечення надійності стінки іноді необхідно встановлювати додаткові вертикальні ребра.

Спіральношовний силос (рис. 1.6, б) має в основі циліндричну оболонку, виготовлену із металевої стрічки, вигнутої по спіралі, кромки якої з'єднані методом зварювання. Геометричні параметри рулонних заготовок: товщина 1 – 4 мм, ширина 300 – 1250 мм. Стикування кромки заготовки повинно бути герметичним та щільним. Переваги силосу – міцність та герметичність, недоліки – велика кількість зварювальних швів, виконаних на майданчику, для їх якісного виконання необхідна додаткова обробка кромки.

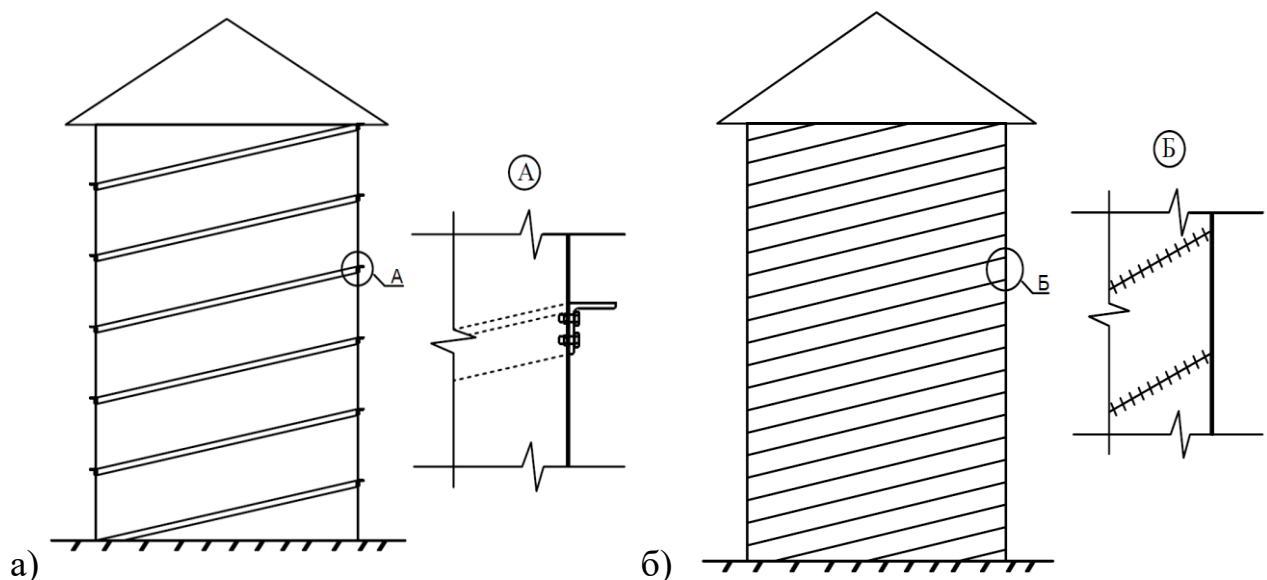


Рис. 1.6. Спіральні силоси: а) спірально-болтовий; в) спіральношовний.

Спірально-фальцевий силос (рис. 1.7) має циліндричний корпус, який являє собою систему спірального з'єднання сталевих стрічки шляхом подвійного вальцювання. Конструкція силосу була розроблена у 1968 році німецьким вченим Ксавером Ліппом, який використовував спеціальне обладнання для обробки листового металу, і застосував його для зведення спіральних силосів [87]. Конструкція силосів цього типу детально описана в п 1.3 даного розділу.



Рис. 1.7. Спірально-фальцеві силоси

1.3. Спірально-фальцеві силоси: особливості технології монтажу, переваги та недоліки конструкцій.

Зважаючи на те, що практика зведення спіральних силосів відносно нова і недостатньо відома широкому колу будівельників, нижче розглянуто процедуру монтажу цієї інноваційної конструкції. Комплект

обладнання для зведення спірального силосу (рис. 1.8), як правило, складається із: розмотчика рулонів, формуючого пристрою, вальцювального верстата і несучих рам.

Основною функцією формуючого пристрою є профілізація і згинання сталеві стрічки шириною 495 мм і товщиною 2-4 мм по діаметру силосу.

Вальцювальний верстат призначений для вальцювання сталеві стрічки, і одночасно створення міцного вальцьованого шва, шириною 30-40 мм, загальною товщиною 11-32 мм, із зовнішнього боку силосу [60].

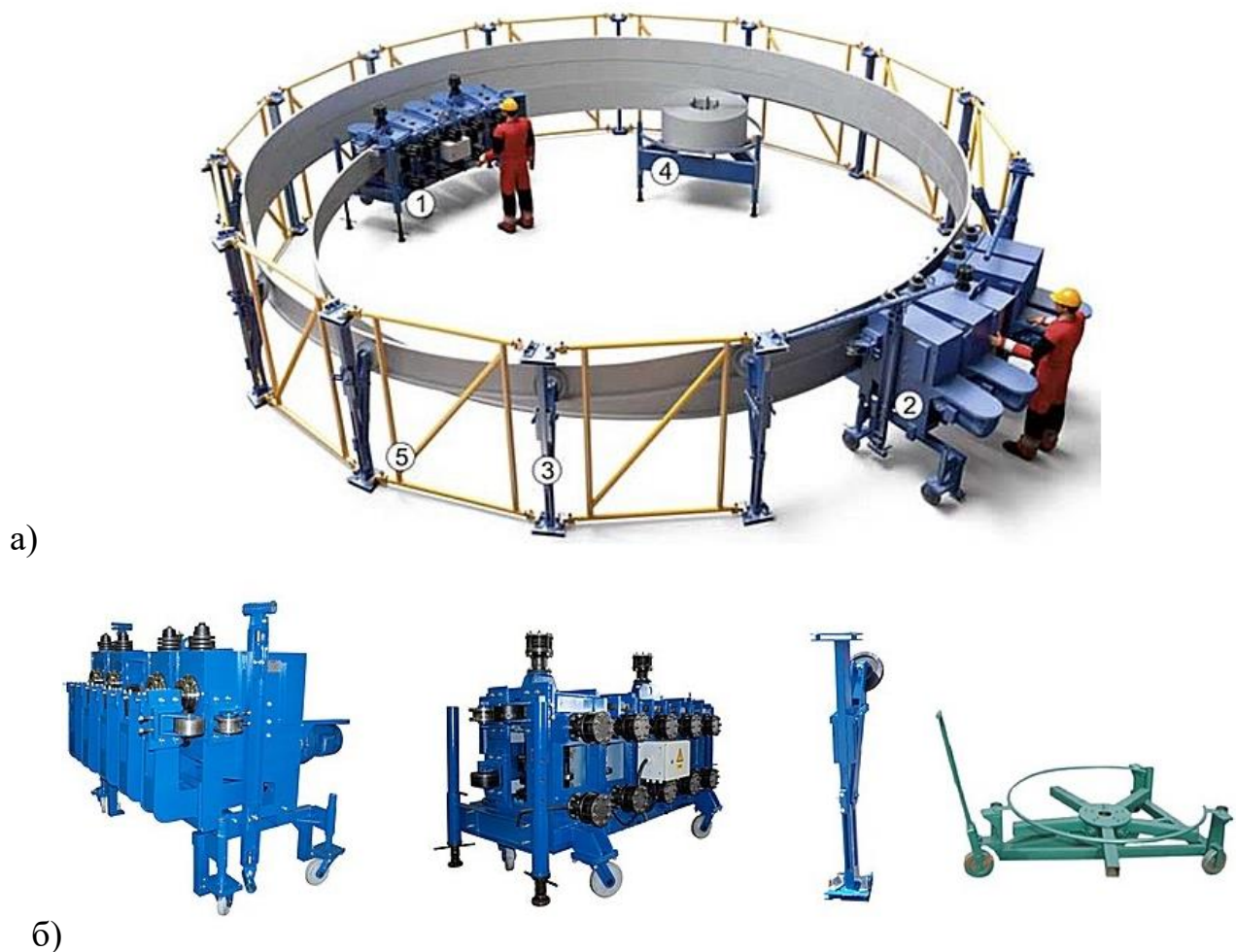


Рис. 1.8. Комплект обладнання для зведення спірального силосу:

- а) комплект обладнання в робочому положенні, процес навивання корпусу силосу; б) вальцювальний верстат, формуючий пристрій, несуча опора рами, розмотчик рулонів.

Процес збирання конструкції силосу відносно простий. Рулони сталі, машини та допоміжні пристрої доставляються на будівельний майданчик, де потім будується силос. Процес зведення силосу – швидкий, ефективний та гнучкий. Унікальна технологія дозволяє компактно і швидко встановлювати високоміцні та герметичні силоси прямо на будівельному майданчику, без використання болтів та зварних з'єднань (рис. 1.9).

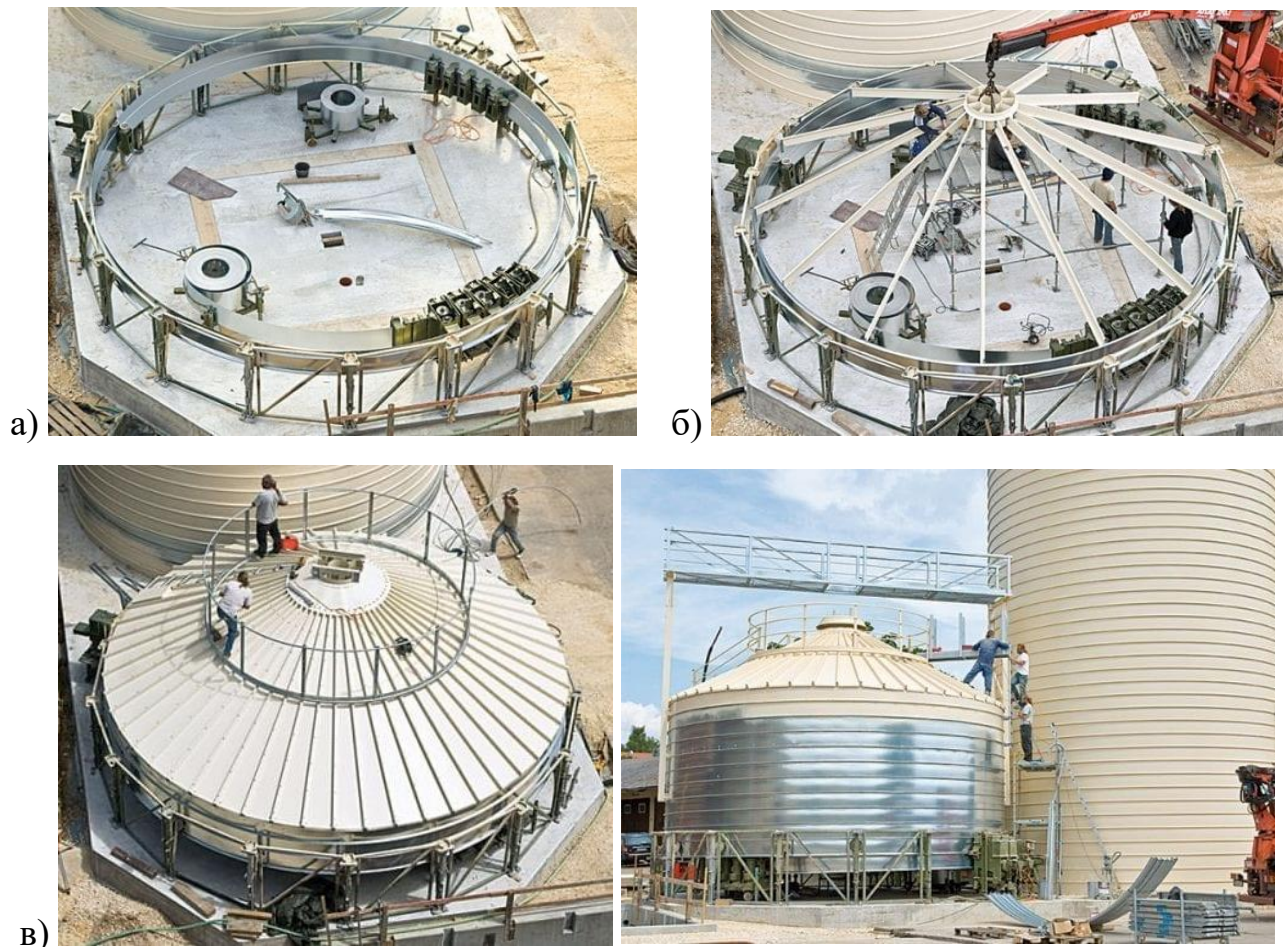


Рис. 1.9. Процес монтажу спірально-фальцевого силосу:

а) перший етап; б) другий етап; в) третій етап.

Перший етап будівництва (рис. 1.9, а) – на фундаментній плиті встановлюються формувальна машина, загинальна машина, механізм для подачі сталеві стрічки та несучі рами. Після того, як несучі рами та дві машини розміщені та налаштовані, починається будівництво силосу. Перший верстат (формувальний) подає сталеву смугу, під невеликим кутом, для формування

профілю. Після того, як сталева смуга зробить оборот, суміжні профільовані смуги з'єднуються у другій машині. Потім вони щільно складаються. Метод будівництва порівняний з гвинтом, який просувається вперед із кожним обертом, коли силос набуває форми. Дві машини залишаються на місці, подаючи сталеву смугу, поки формується силос, піднімаючись спіраллю вище.

Другий етап будівництва (рис. 1.9, б) починається, коли силос досягає висоти приблизно 2 метри, верхній край зрізається рівно. Потім встановлюють дах.

Коли дах встановлений, починається третій етап будівництва (рис. 1.9, в). Силос продовжуватиме повільно формуватися, доки досягне заданої висоти. Сходи та опори будуть додані у процесі будівництва.

Унікальна технологія дозволяє безпосередньо на будівельному майданчику, без використання болтів і зварних з'єднань, вести компактний і швидкий монтаж герметичних силосів високої міцності.

Переваги таких силосів:

- висока точність, високий ступінь автоматизації та швидкість монтажу; зменшення часу на монтаж і необхідної кількості монтажників; мінімізація людського фактору при монтажі, весь процес монтажу силосу відбувається автоматично за допомогою спеціального агрегату, час монтажу – від 4 до 6 днів;
- під час використання силос не потребує будь-якого технічного обслуговування, може протистояти 7-бальному та більшому землетрусу, сильним вітрам; гарантія на силос більше 30 років;
- хороша герметизація, водонепроникність, повна відсутність болтових з'єднань і робіт, пов'язаних з гідроізоляцією; при тривалому терміні зберігання можна встановити парову систему для безпечного зберігання зерна, можна зберігати стічні води, масло, нафтопродукти, цемент та інші матеріали; при використанні нержавіючої сталі – можливе зберігання харчових продуктів; спирту, виноматеріалів, борошна, солоду, патоки, соняшникової олії;

- економія сталі, висока міцність, висока ступінь оцинкування від 275 г/м² до 450 г/м²;
- економічність, вартість силосу на 30% нижче листових гофрованих силосів.

Недоліком спірально-фальцевих силосів є те, що при виробничих роботах монтажне обладнання силосу повинно перевозитися на будівельний майданчик, що в деякій мірі підвищує собівартість виробництва.

1.4. Визначення навантаження від тиску сипучого матеріалу на конструкції силосів

Основним навантаженням на силосну ємність є тиск сипучого матеріалу. Термін «сипучі матеріали» включає в себе велику групу матеріалів з особливими фізичними, хімічними та механічними властивостями. Сипучий матеріал – це трифазна система, що складається із частинок, які утворюють каркас, а також рідини та газів, які заповнюють простір між частинками.

Специфіка та складність зберігання сипучого матеріалу полягає в його дуальності. Сипуча речовина має властивості, притаманні з одного боку континуальним середовищам (наприклад, здатність чинити тиск на стінки посудини), а з іншого боку – дискретним середовищам (наприклад, залежність тиску від структурованості матеріалу). Також дуальність сипучої речовини проявляється і в іншому відношенні. Сипуча середа має властивості, з однієї сторони, твердих тіл (наприклад, можливість чинити опір зовнішнім зусиллям) і в той же час, з іншої сторони, властивості рідини (наприклад, здатність текти або заповнювати наданий об'єм).

Також треба враховувати, що поведінка сипучої речовини підпорядковується різним закономірностям у залежності від способу зберігання: у замкненому, чи в умовно нескінченному просторі. Необхідно окремо аналізувати статичну та динамічну поведінку сипучої речовини. Адже, це є два досить різних за своєю суттю явища, які пов'язані із різною структурованістю сипучого матеріалу, і тому вони потребують розробки різних теоретичних

моделей. При цьому в кожному випадку виявляються справедливими зовсім різні початкові припущення і, як результат, кінцеві математичні залежності нерідко ведуть до явних суперечностей.

Уперше теорія тиску сипучого матеріалу в силосі була опублікована в 1895 р. німецьким вченим Х.А. Янсенем [71]. Його теорія заснована на аналітичному розв'язанні числових рівнянь, що описує баланс сил на диференціальний зріз зерна, що заповнює силос. В основі теорії висунуті наступні положення: 1) сипучий матеріал, який знаходиться у силосі, створює тиск на стінки, і як результат, між матеріалом та поверхністю силоса утворюється тертя, що, у свою чергу, зменшує тиск на дно; 2) відношення між величинами горизонтального та вертикальних тисків є постійним.

Відповідно теорії Х.А. Янсена вертикальний та горизонтальний тиск сипучого матеріалу на конструкції силосу визначається за формулами:

$$P_v = \frac{\gamma\rho}{\mu K} [1 - \exp(-K\mu h / \rho)]; \quad (1.5)$$

$$P_h = \frac{\gamma\rho}{\mu} [1 - \exp(-K\mu h / \rho)] = KP_v. \quad (1.6)$$

де ρ – гідравлічний радіус поперечного перерізу силосу, м, що визначається за

$$\rho = \frac{A}{U} = \frac{\pi r^2}{\pi d} = \frac{r}{2};$$

r, d – відповідно радіус та діаметр силосу;

A, U – площа і периметр поперечного перерізу силосу, відповідно м^2 і м ;

K – коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу, характеризується відношенням середніх значень горизонтального і вертикального тиску;

γ – питома вага сипких матеріалів, $\text{кгс}/\text{м}^3$;

μ – коефіцієнт тертя сипких матеріалів об стіни силосу.

Однак, вже в 1896 р. ця теорія була поставлена під сумнів, оскільки ряд експериментальних досліджень та випадки аварій силосів показали, що тиск сипкого матеріалу при вивантаженні зростає в 2 – 3 рази, а по деяким

дослідженням навіть у 5 – 7 разів. Таке не співпадіння величин тиску можна пояснити відсутністю єдиної фізичної та структурно-механічної моделі сипучого матеріалу [98].

Наступною фундаментальною роботою в області досліджень сипучих матеріалів є праці Е. Дженіке. Ендрю Дженіке дав визначення «масового потоку», показав, як можна виміряти властивості потоку сипучих матеріалів, і як ці вимірювання можна використовувати для проектування силосів [71].

Коли силос заповнений твердим матеріалом, тиск на стінку досить близький до значень, визначених за допомогою формул Янсена, за умови правильної оцінки відповідних параметрів матеріалу. Однак, процес розвантаження силосу може призвести до набагато вищих тисків, або ж до локально низьких тисків, і обидва ці випадки можуть створити аварійні умови для конструкції.

Потік твердих речовин під час розвантаження має різні форми, у залежності від виду потоку змінюється тиск на стінку. Основні форми потоку відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [106]: масовий, потік у трубі та змішаний потік (рис. 1.10). Однак, схему потоку нелегко передбачити, за винятком граничних випадків.

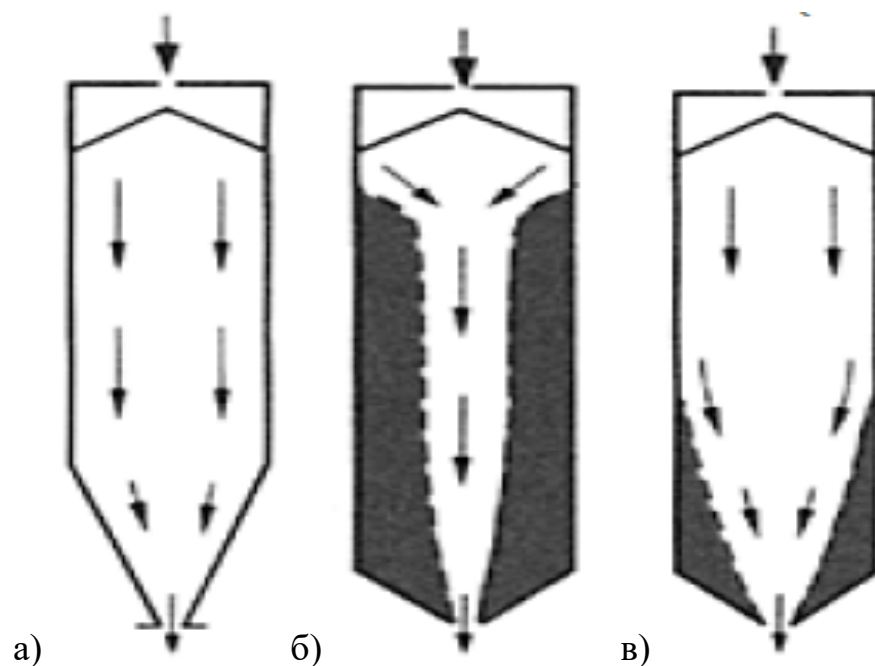


Рис. 1.10. Основні форми потоку:

а) масовий потік; б) потік у трубі; в) змішаний потік.

Властивості потоку сипучих матеріалів, зокрема, залежать від:

- гранулометричного складу;
- форми частинок;
- хімічного складу частинок;
- вологості;
- температури.

Тертя твердих тіл об стінку, а також несиметричний тиск під час розвантаження, викликають у стінках силосу напруження стискання, що призводить до руйнування. На міцність стінки на згин впливають недосконалості виготовлення, які не можуть бути точно визначені на етапі проектування. Силос, побудований у заводських умовах за встановленою процедурою, має інші недоліки, ніж силос, побудований на будівельному майданчику, і ця різниця впливає на міцність, а отже, і на надійність конструкції.

Круглий силос є оболонковою конструкцією, тому несиметричний тиск не тільки викликає місцеві вигини, але й впливає на весь силос. Однак, більшість досліджень завантаження силосів у даний час направлені на симетричні навантаження і приділяється мало уваги несиметричним умовам тиску.

Крім того, аналіз напружень у стінці силосу вимагає аналізу вигину оболонки.

Велику кількість робіт, присвячених вивченню поведінки сипучого матеріалу та його впливу на стінки силосів, виконали такі вчені, як Д. Шульц та М. Ротер. Д. Шульц у своїй роботі розглядає загальні характеристики сипучих твердих тіл, починаючи від властивостей потоку твердих часток до поведінки потоку порошків та сипучих речовин у бункерах та силосах [71].

Значний внесок у розвиток теорії тиску сипучих матеріалів зробив Банніков Д.О. [95, 97]. У своїй роботі [96] він розробив авторську теоретичну модель взаємодії сипучого середовища з елементами ємності, для часткового рішення розподілу тиску від сипучого матеріалу на стінки ємнісної конструкції.

1.5. Огляд робіт в області досліджень металевих силосів.

Велика кількість вітчизняних та зарубіжних науковців займаються дослідженнями силосів для сипучих матеріалів. Дж.Р. МакКалмонт – один з перших класифікував силоси та розглянув їх особливості [49].

У 1998 р. вийшла книга [73], яка є збіркою найсучасніших на той час доповідей від різних дослідників та спеціалістів, які були об'єднані в рамках дослідницького проєкту, присвяченого силосам. Книга складається із 7 частин, розділених за темами: потік у силосах, бетонні конструкції, металеві конструкції, чисельне моделювання твердих частинок, випробування силосів та експериментальні методи, дослідження для промисловості. Матеріали книги зосереджені на фундаментальних основах і розглядають складні проблеми, пов'язані з теорією, поведінкою і проєктуванням силосів. У 2011 р. ці ж редактори зробили нову збірку з оновленими публікаціями [74].

Масштабною роботою є «Buckling of thin metal shells» [12], в якій описано досвід та результати досліджень згину тонких металевих оболонок. Книга складається із 15 розділів, написаних провідними міжнародними експертами. Глави згруповані разом і стосуються різних фундаментальних типів навантаження на циліндр: осьове стиснення, кільцеве стиснення та зсуву мембрани. Перша група глав присвячена циліндрам при осьовому стисканні.

Не дивлячись на велику чисельність робіт, кількість дослідницьких праць у цій галузі невпинно зростає з кожним роком [4, 14, 18, 20, 26, 27, 35, 37, 38, 39, 67, 69, 71, 83, 84, 90, 113, 159]. І. Селамович та Р. Балевічус детально розглянули аналіз впливу тертя кочення на розподіл тиску на стінки та швидкості всередині текучого матеріалу [72]. Поведінку та фізичні характеристики сипучого матеріалу в силосах детально дослідив та описав у своїй роботі Д.О. Банніков [93], також у своїй монографії [94] представив авторську теоретичну концепцію взаємодії сипучого матеріалу із елементами ємнісних будівельних конструкцій.

Методами розрахунку та експериментальними дослідженнями циліндричних оболонок металевих силосів спіральньо-фальцевого типу на міцність та стійкість займався ряд вчених.

У 2008 році С. Вірт [86] використав експериментальні результати невеликих спіральньо-фальцевих силосів для аналізу можливості використання стандарту EN 1993-1-6 [107], щодо згинання оболонок. Він дійшов висновку, що досить складно чисельним методом визначити опір, близький до експериментальних результатів, відповідно до положень EN 1993-1-6.

Вагомий внесок у дослідження спіральньо-фальцевих силосів роблять Ягер-Канас А. (інженер-консультант фірми «Lipp GmbH»), Лі З. та Пастернак Х. Їх роботи [36, 44, 45, 54] присвячені дослідженням згину тонких оболонок із часто розташованими горизонтальними ребрами. До такого типу оболонок відносяться як спіральньо-фальцеві силоси, так і будь-які інші ємності з горизонтальними ребрами. Зокрема, у роботі [45] описані експериментальні дослідження на малих циліндричних оболонках, які виготовлялися шляхом зварювання двох напівциліндричних оболонок, а кільцеві ребра жорсткості були приварені до циліндричної оболонки точковим зварюванням. Геометричні розміри зразків оболонок вимірювалися за допомогою технології 3D сканування. Виміряна інформація про геометричну недосконалість безпосередньо імпортувалася у числову модель на основі співвідношення відображення. Результати показали, що опір згину, розрахований за допомогою скінченно-елементного аналізу, був дуже близький до результатів випробувань. Основна увага в цих роботах присвячена саме поведінці міжреберної частини оболонки при осьовому стиску та впливу часто розміщених горизонтальних ребер на загальну міцність та стійкість силосних конструкцій.

Зробивши огляд існуючих робіт, стосовно спіральньо-фальцевих силосів, можна зробити висновок, що кількість досліджень цих інноваційних конструкцій є недостатньою. Особливо це стосується роботи фальцевих ребер при

розтягуючих зусиллях та при згині міжфальцевої зони, яка досі залишається дослідженою не в повній мірі.

1.6. Огляд досліджень надійності будівельних конструкцій

Ціль дослідження надійності конструкцій полягає в розробці критеріїв проектування та процедур перевірки, спрямованих на забезпечення того, щоб споруди, побудовані відповідно до технічних умов, функціонували належним чином з точки зору безпеки та експлуатаційної придатності [99].

Огляд робіт з проблеми надійності конструкцій. Науковий підхід до проблеми надійності конструкцій вимагає використання імовірнісних методів для аналізу поведінки конструкцій при зовнішніх діях. Цей напрямок був суттєво розвинений М.С. Стрілецьким, який відмітив, що виконання умови міцності конструкції можна передбачати тільки з визначеною часткою ймовірності [91]. Для кількісної оцінки надійності конструкцій він ввів параметр – гарантію неруйнівності – і вперше провів аналіз її зміни при зміні коефіцієнта запасу, розрахункових навантажень та їх комбінацій.

У роботах О.Р. Ржаніцина. [91] було зроблено перші спроби розроблення методики оцінювання імовірності безвідмовної роботи будівельних конструкцій. Було обґрунтовано розділити всі розрахункові величини на дві основні групи. Перша група включає параметри міцності, тобто всі характеристики, які відносяться до властивостей самої конструкції. Друга група – параметри навантаження, до неї відносяться характеристики зовнішніх впливів на конструкцію. О.Р. Ржаніцин ввів у розгляд випадкову величину резерву міцності, за допомогою якої вимога надійності виражалася як необхідність того, щоб ця величина була позитивною, з деякою наперед заданою ймовірністю.

Надалі великий внесок у дослідження теорії надійності було зроблено В.В. Болотіним. який розвинув у спеціальний розділ будівельної механіки – статистичну динаміку – імовірнісний розрахунок конструкцій з урахуванням

фактору часу і особливостей роботи при зовнішніх діях. У його роботах [10] систематично викладені фундаментальні питання застосування теорії ймовірності та математичної статистики, для рішення задач механіки матеріалів та конструкцій. Зокрема, у дослідженні [121] В.В. Болотін сформулював алгоритм імовірнісного розрахунку конструкцій (метод «двох моментів»).

За кордоном питаннями надійності в різних постановках займається велика кількість вчених: В. Gaspar, А. М. Hasofer, J. R. Benjamin, С. А. Cornell, А.Н-S. Ang, О. Ditlevsen and Н.О. Madsen, В. R. Ellingwood, F. Casciati [2, 8, 9, 13, 15, 16, 21, 25, 29, 33].

Варто відмітити роботи В.Д. Райзера, який наголосив, що всі показники надійності, які можуть бути використані при формулюванні нормативних вимог до будівельних конструкцій, являють собою досить прості функції ймовірності відмови. Тому основна задача розрахунків є розрахунок ймовірності відмови. Райзер В.Д. в своїй книзі [68] виділив 4 методи для вирішення задачі знаходження ймовірності відмови конструкції: метод двох моментів; метод «гарячих точок»; метод статистичних випробувань; метод Монте-Карло.

Метод двох моментів є простим та зручним для використання, однак він використовується тільки якщо несуча здатність R та навантаження Q розподіляються по нормальному та логнормальному закону. Метод «гарячих точок» використовується, якщо вихідні величини розподіляються не по нормальному закону. В основі методу лежить ітераційне наближення вихідного довільного закону розподілу до нормального. Метод статистичних випробувань використовується, якщо була проведена велика кількість статистичних випробувань, у результаті яких отримується ряд випадкових реалізацій досліджуваних вихідних величин. Для цих значень оцінюють ймовірність відмови в залежності від частоти їх появи. Метод Монте-Карло є досить ефективним, так як дає менший розкид оцінки ймовірності відмови, у порівнянні з попередніми методами. Однак недоліком методу є те, що одна з функцій розподілу величин R та Q повинна бути задана заздалегідь.

Важливість оцінювання надійності будівельних конструкцій набуває все більшого значення в інженерії, оскільки вона дозволяє нам кількісно оцінити невизначеності при проектуванні. Розуміючи це, все більше вчених долучається до вирішення цього питання, із закордонних праць варто відзначити наступні роботи. М. Альдосарі [1] провів всебічний огляд та ретельний аналіз надійності конструкцій та стохастичних методів скінченних елементів, детально проаналізував точність та ефективність кожного методу. М. Бабалеку у статті [3] показав на прикладі залізобетонної мостової опори, що за наявності достатньої кількості даних, можна фактично спроектувати конструкцію або оцінити її стійкість, виходячи із заданого рівня надійності. Б. Бамен у роботі [5] виявив, що зниження індексу безпеки є значно більшим після певного рівня навантаження та невизначеності (замість прямої лінії). У статті [6] показано, як можна виконати чисельний розрахунок надійності конструкцій на основі скінченно-елементних моделей конструкцій, поєднуючи алгоритми розрахунку надійності конструкцій з детермінованими скінченно-елементними кодами. М. Лемар у своїй книзі [43] зібрав основні методи, що застосовуються у надійності конструкцій, та розглянув їх використання у процесі проектування. А. Мішра у [52] підкреслює важливість застосування методів оцінювання надійності при проектування конструкцій у цілому. К. Лопез у статті [48] пропонує рішення для поєднання методів оцінювання надійності з програмними комплексами за допомогою кодів MatLab. Л. Сімоес у [75], на основі порівняння різних методів оцінювання надійності, визначає оптимальні конструктивні рішення для зварних сталевих комірчастих пластин та зварної колони. У [76] Д. Соколовські проводить аналіз надійності двотаврової балки з гофрованою стінкою, для перевірки її сприйнятливості до випадкової корозії стінки та порівняння результатів надійності першого та другого порядку. Методологія дослідження базується на стохастичному методі скінченних елементів. М. Захір у [89] описує методику розрахунку втомної надійності універсального з'єднання морської платформи.

В Україні дослідженнями надійності конструкцій займається ряд вчених: А.В. Перельмутер [148], В.А. Пашинський [120], О. В. Семко [157], А.В. Махінько [116, 117, 115], Н.О. Махінько [118], О.П. Воскобійник, Р.І. Кінаш [109], С.Б. Усаковський, А. І. Лантух-Лященко.

Треба відмітити важливість робіт С.Ф. Пічугіна [56, 57, 65, 66, 150, 151, 152, 153, 154,], який своїми працями зробив значний внесок у розвиток та поширення досліджень теорії надійності в Україні та за її межами. Варто відзначити, що саме за методикою, розробленою в роботі [151], буде проведено оцінювання надійності спірально-фальцевих силосів у 6 розділі.

Дослідженнями надійності будівельних конструкцій займається велика кількість вчених, як видно із аналізу літератури, проведеного вище. Однак надійність металевих силосних конструкцій, зокрема спірально-фальцевих силосів, досі залишається недостатньо вивченою, оскільки вони набули популярності відносно недавно.

Серед закордонних робіт, які присвячені дослідженням надійності силосних конструкцій, можна виділити наступні. У праці О. Дітлевцена та ін. [24] йдеться про використання даних щодо тиску, що були отримані в експериментах, для оцінки параметрів емпіричної стохастичної моделі навантаження силосу. Отримана модель навантаження силосу досліджується із точки зору її впливу на надійність конструкції. Також масштабне дослідження з оцінювання надійності залізобетонного силосу було зроблено у роботі [22], в якій розглянуто аналіз надійності з урахуванням розвитку механізму руйнування у кільці.

М. Брогі та ін. у своїй роботі [11] дослідили вплив геометричних недосконалостей поверхні оболонки на величину згинального навантаження. Вони довели, що використання стохастичного аналізу дозволяє проводити більш реалістичне моделювання, що призводить до узгодження результатів моделі з експериментальними результатами. М. Голота та ін. [31] теж займаються

геометричними недосконалостями, але з огляду на їх вплив при вітровому навантаженні на силосну конструкцію.

А. Лапко у дослідженні [42] вивчає температурний вплив на силосну конструкцію. Висновками його роботи є те, що теплові дії можуть мати значний вплив на надійність конструкції силосу, а в деяких випадках можуть призвести до серйозних пошкоджень конструкції, якщо розподіл температури в системі оцінений неправильно.

Серед вітчизняних науковців, які займаються надійністю силосних конструкцій, треба відзначити С.Ф.Пічугін, А.В. Махінко, Н.О. Махінко [111, 58, 114, 112, 118]. У роботах проведені масштабні дослідження оцінювання надійності металевих болтових силосів. У роботі [112] представлено в графічному вигляді результати імовірнісного розрахунку багатоболтових з'єднань, зробленого за авторською методикою. Розрахунок надійності багатоболтових з'єднань показав, що при незначній кількості болтів «заміни» – саме вони виступають основною причиною відмови з'єднання, проте при зростанні кількості непроектованих болтів – механізм руйнування буде залежати від імовірнісного обґрунтування навантаження і міцності.

Однак, не дивлячись на велику кількість досліджень надійності металевих силосів, надійність саме спірально-фальцевих силосів не досліджена.

Загальна процедура оцінювання надійності.

Відповідно до будівельних норм ДБН [99], надійність об'єкта визначається як властивість виконувати задані функції протягом розрахункового строку експлуатації, та задає її основні характеристики – безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, живучість. Для сталевих силосів найбільше значення має безвідмовність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку.

Дослідження теорії надійності будівельних конструкцій можна умовно поділити на два потоки [13]: 1) метод часткових коефіцієнтів надійності (граничних станів); 2) ймовірнісний метод (метод теорії надійності).

Сучасні норми проєктування будівельних конструкцій враховують імовірнісний характер навантажень та несучої здатності конструкцій тільки в частині обробки вихідних даних. Метод граничних станів, який закладений в нормах проєктування є на напівімовірнісним, при цьому надійність конструкцій при проєктуванні забезпечується за допомогою використання відповідних коефіцієнтів запасу: коефіцієнт надійності за навантаженням, за матеріалом, коефіцієнт умов роботи, коефіцієнт надійності за призначенням. Ці коефіцієнти не мають достатнього теоретичного та експериментального обґрунтування.

Розрахунок будівельних конструкцій, який відображає їх реальну поведінку при експлуатації, повинен базуватися на теорії надійності, заснованій на імовірнісних методах. Це дозволить дати більш об'єктивну оцінку конструкцій, стосовно їх придатності до нормальної експлуатації.

Методи теорії надійності дають теоретичну основу для правильної організації збирання та обробки статистичних даних, які відносяться до впливів на споруду, характеристик матеріалів та конструкцій та інших розрахункових параметрів. Ці методи найбільш точно відображають імовірнісну природу основних розрахункових величин та взаємозв'язок між зовнішніми впливами та міцністю конструкцій.

Відповідно до [151] умова безвідмовної роботи (неруйнівності) конструкції, має наступний вигляд:

$$\tilde{Y}(t) = \tilde{R}(t) - \tilde{S}(t), \quad (1.7)$$

де $\tilde{R}(t)$ – узагальнена несуча здатність конструкції;

$\tilde{S}(t)$ – узагальнене навантаження на конструкцію;

$\tilde{Y}(t)$ – характеристика резерву несучої здатності.

При дії навантажень, що мало змінюються у часі або тих, що мають одноразовий характер, імовірнісна техніка випадкових величин може застосовуватись без урахування фактору часу t . При цьому функція резерву несучої здатності запишеться як:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} \geq 0. \quad (1.8)$$

Саме за технікою випадкових величин, у даній дисертації буде проведено оцінювання надійності металевих спірально-фальцевих силосів.

Відповідно до цієї методики, у найпростішому випадку розглядається конструкція, навантажена випадковим механічним навантаженням \tilde{q} , яке спричиняє у конструкції випадкові механічні напруження $\tilde{\sigma}$. Міцність конструкції – також випадкова величина, вона визначається випадковими напруженнями руйнування $\tilde{\sigma}_y$ (наприклад, межею текучості для м'якої сталі).

Несуча здатність конструкції дорівнює $\tilde{R} = \tilde{\sigma}_y A$, де A – геометрична характеристика перерізу конструкції; $\tilde{S} = \alpha \tilde{q}$ – зусилля у конструкції від зовнішнього навантаження. Резерв несучої здатності може визначатися також у просторі напружень, тоді $\tilde{R} = \tilde{\sigma}_y$, $\tilde{S} = \tilde{\sigma}$.

Математичне сподівання і стандарт резерву несучої здатності визначається як для лінійної функції:

$$\bar{Y} = \bar{R} - \bar{S}, \quad (1.9)$$

$$\hat{Y} = \sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}. \quad (1.10)$$

Характеристика β називається характеристикою безпеки за О.Р. Ржаніциним [91] або індексом безпеки за С.А Корнеллом [15] та визначається як:

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{1}{V_Y} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}} \quad (1.11)$$

У випадку нормального розподілу $f(Y)$ характеристика безпеки є дуже зручною для визначення ймовірності відмови Q та ймовірності безвідмовної роботи P :

$$Q(Y < 0) = 0,5 - \Phi(\beta), \quad (1.12)$$

$$P(Y \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta).$$

Тут $\Phi(\beta)$ – функція Лапласа.

Для одержання оцінок надійності конструкцій, характер роботи яких залежить від кількох параметрів, можна використовувати прийом з підстановкою ймовірнісних параметрів у детерміністичні рішення завдань надійності таких конструкцій.

У загальному випадку резерв міцності складної конструкції є функцією кількох аргументів:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1.13)$$

У випадках нелінійності цієї функції виконується її лінеаризація із заміною вихідного виразу лінійною функцією виду:

$$Y = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial Y}{\partial X_i}(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n)(X_i - \bar{X}_i) = \bar{Y} + \sum_{i=1}^n A_i(X_i - \bar{X}_i). \quad (1.14)$$

При незначності похибки, що вноситься лінеаризацією, формула для визначення математичного сподівання (1.14) спрощується і зводиться до підстановки математичних сподівань аргументів у вихідну функцію:

$$\bar{Y}(X_1, X_2, \dots, X_n) = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n). \quad (1.15)$$

Середньоквадратичне відхилення (стандарт) резерву стійкості визначається, у випадку незалежності аргументів, як

$$\hat{Y} = \sqrt{\hat{Y}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial Y}{\partial X_i} (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) \right]^2 \hat{X}_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \hat{X}_i^2}. \quad (1.16)$$

1.7. Висновки по стану питання і задачі дисертаційної роботи

У даному розділі виконано огляд сталевих листових конструкцій, їх особливості та основи теорії їх розрахунку. Було розроблено узагальнену класифікація металевих силосів. Проведено аналіз переваг та недоліків кожного типу конструкції металевих силосів та галузь їх застосування. Описано технологію виготовлення спірально-фальцевих силосів, проаналізовано кожен механізм та його функція при монтажу силосу. Розглянуто поетапний процес монтажу конструкції на будівельному майданчику. Проаналізовано переваги та недоліки спірально-фальцевих силосів. Розглянуто теорію визначення тиску сипучого матеріалу на дно та стінки силосів. Проведено огляд робіт в області досліджень металевих силосів та досліджень надійності будівельних конструкцій.

На основі аналізу існуючих робіт, можна зробити висновок, що робота фальцевих ребер при розтягуючих зусиллях та при згину міжфальцевої зони досі залишається дослідженою не в повній мірі. При великій кількості праць із методики оцінювання надійності металевих конструкцій, дослідження надійності спірально-фальцевих силосів відсутні. Це стримує більш широке впровадження цих інноваційних багатофункціональних листових конструкцій.

На підставі наведених висновків у даній дисертаційній роботі було сформульовано мету роботи: вирішення проблеми оцінювання надійності металевих спірально-фальцевих силосів для сипучих матеріалів на основі врахування особливостей конструкції та дійсної роботи під навантаженням.

Результати даного розділу опубліковані у роботі [60].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Наведення узагальненої класифікації металевих силосів. Аналіз переваг та недоліків кожного типу конструкції.
2. Вивчення історії винаходу спірально-фальцевих конструкцій та аналіз сфери застосування цих конструкцій у різних галузях промисловості.
3. Дослідження специфіки конструкції спірально-фальцевих силосів, яка впливає на їх напружено-деформований стан. Аналіз особливості розрахункової схеми спірально-фальцевих силосів. Розгляд алгоритму розрахунку на міцність та стійкість металевих силосів за безмоментною теорією. Моделювання силосу спірально-фальцевого силосу за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР.
4. Розгляд напружено-деформованого стану міжфальцевої зони оболонки з постійною товщиною стінки. Порівняння теоретичних розрахунків із результатами моделювання силосу в програмного комплексу ЛІРА-САПР.
5. Експериментальне дослідження елементів конструкції спірально-фальцевих силосів. Вивчення реальної роботи фальцевого з'єднання штрипса при дії розтягуючих навантажень. Експериментальне визначення роботи оболонки в міжфальцевій зоні при згині.
6. Огляд прикладів будівництва та досвіду експлуатації металевих спірально-фальцевих силосів на території України.
7. Розробка методики оцінювання надійності металевих спірально-фальцевих силосів.
8. Одержання чисельних значень надійності спірально-фальцевого силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами, обґрунтування загальної оцінки надійності сталевих спірально-фальцевих силосів, розрахованих за діючими нормами.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ

2.1. Особливості винаходу і розвитку спірально-фальцевих силосів

Винахідник системи подвійного фальцювання Ксавер Ліпп (нар. 1933 р., м. Стіллау, Німеччина) розпочав свою винахідницьку діяльність у 1955 р. з розроблення сегментарно-згинаючого верстату, який може виготовляти гнуті труби та коліна потрібних розмірів [87]. На цю розробку ним був отриманий патент у 1958 році (рис. 2.1).

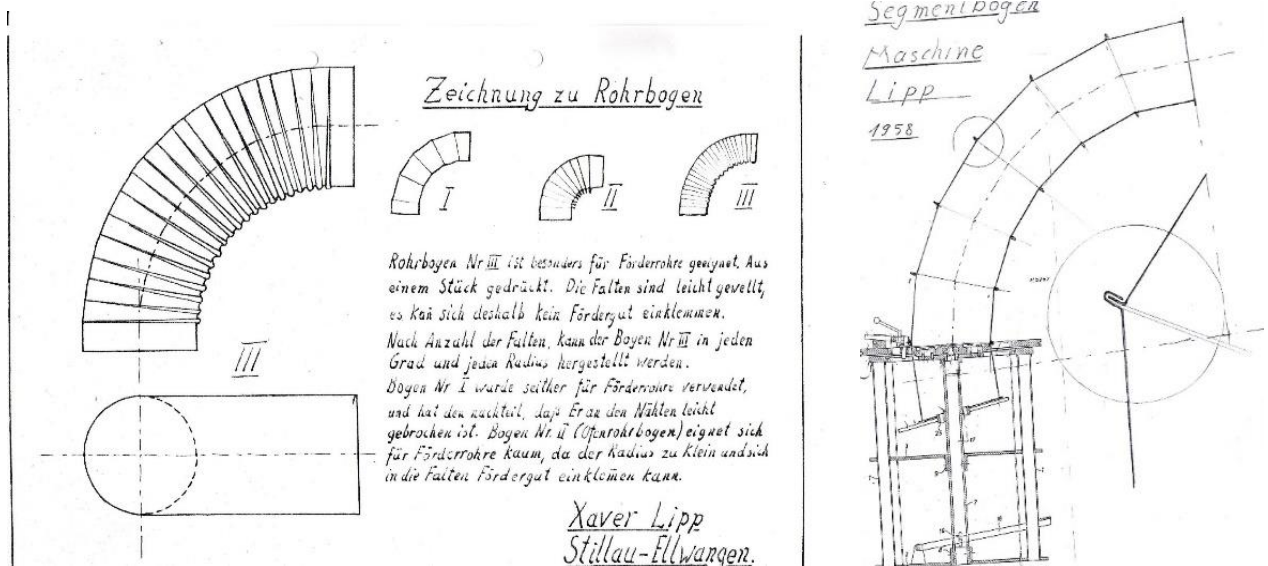


Рис. 2.1. Патент на сегментарно-згинаючий верстат для виготовлення труб та колін, 1958 р.

У 1957 році винахідник паралельно працює над обробкою листового металу та формуванням металевих пластин. За допомогою верстатів (рис. 2.2), із розташуванням пари роликів один за одним, плавно і точно формується листовий метал, у будь-який бажаний профіль.

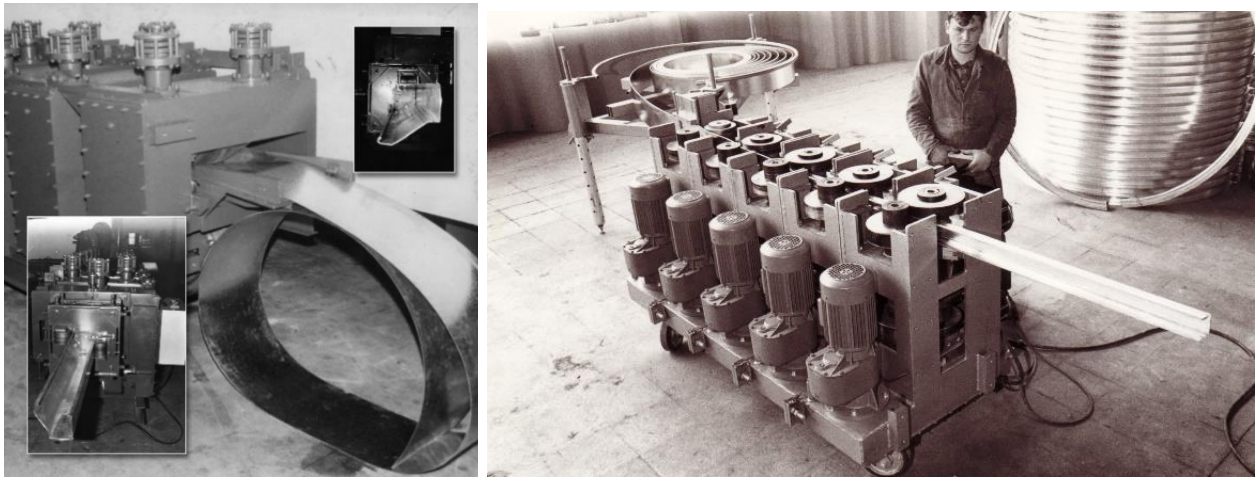


Рис. 2.2. Верстати для обробки листового металу

На початку 1960-х років винахідник розробляє поздовжню фальцювальну машину (рис. 2.3). За допомогою цього компактного верстата можна закругляти та фальцювати листи в поздовжньому напрямку. Кінцеві продукти різного діаметру використовуються у сільському господарстві, наприклад, як водостічні труби, труби для печей або як повітропроводи для подачі сіна.

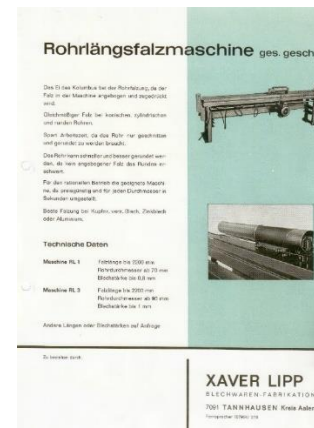


Рис. 2.3. Поздовжня фальцювальна машина

У 1967 році Ксавер Ліпп працює над розробкою технології подвійного фальцювання (рис. 2.4). У той час для виробництва силосів для зберігання кормів для тварин, метал проходив декілька етапів обробки: розрізання, формування та

збирання на будівельному майданчику. Винахідник хотів зробити це простіше і обробляти лист з рулону нескінченно – без проміжних етапів. Ця ідея лягла в основу технології виробництва спірально-фальцевих силосів. Технологія будівництва, винайдена і запатентована Ксавером Ліппом у 1969 році, дозволила раціонально і економічно будувати силоси на будівельному майданчику. У 1969 році в Німеччині був побудований перший такий силос. І з початку 1970-х років в Європі почали використовувати силоси з тонкими стінами. Протягом десяти років вивчення і дослідження на практиці ця технологія успішно зарекомендувала себе, і з початку 1970-х років почалося великомасштабне виробництво оцинкованих сталевих силосів [60].

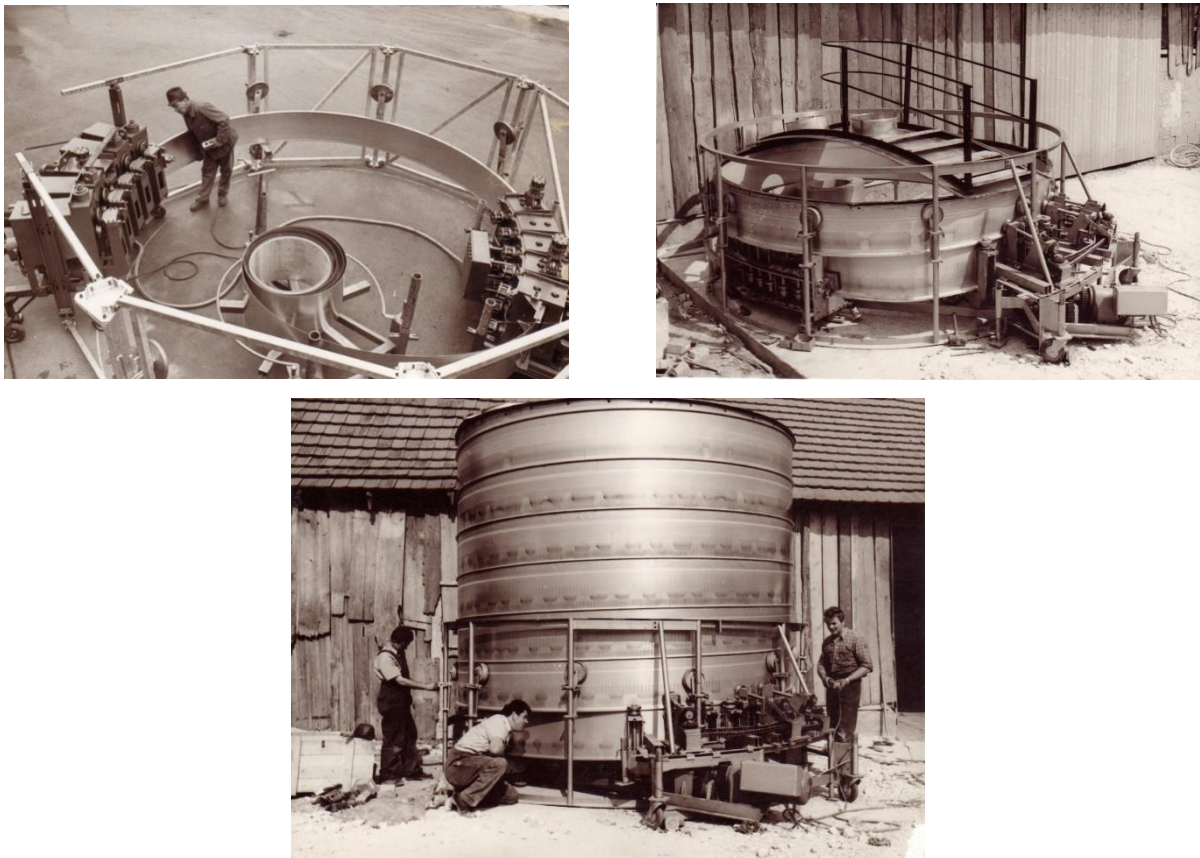


Рис. 2.4. Будівництво першого спірально-фальцевого силосу

Виробництво труб будь-якого діаметру і без обмежень по довжині з одного смугового матеріалу – було ще одним великим викликом, який Ксавер Ліпп прийняв на початку своєї діяльності. Паралельно з будівництвом великих силосів і резервуарів, з моменту винаходу своєї системи подвійного складання Ксавер

Ліпп інтенсивно займався виробництвом труб малого діаметру за цією технологією (рис. 2.5), У 1968 році він розробив і побудував компактний верстат, з якого нескінченно вигвинчувалася труба малого діаметру.

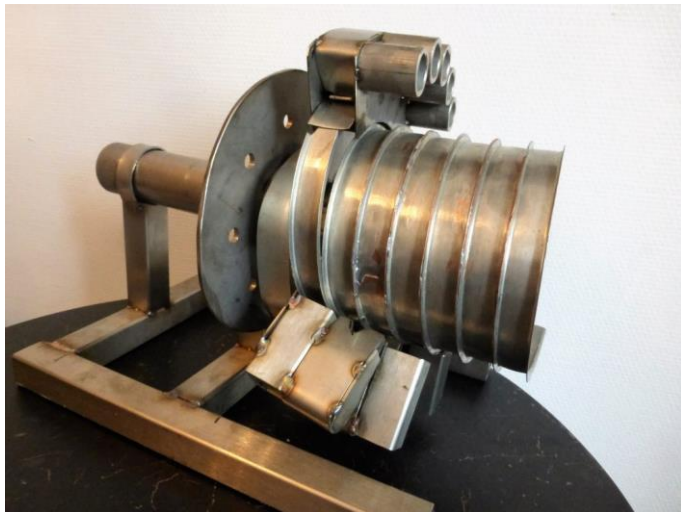
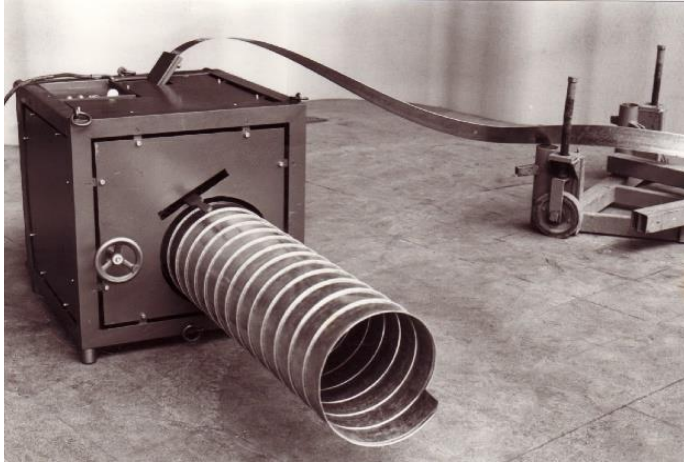


Рис. 2.5. Виробництво труб малого діаметру

На початку 1970-х років Ксавер Ліпп разом з університетами Мюнхена та Хоенхайма розпочав проектування та будівництво сільськогосподарських біогазових установок. Перші установки досягли позитивних результатів у виробництві біогазу (рис. 2.6). Для демонстрації можливостей використання альтернативних джерел енергії у 1978 році був переобладнаний автомобіль, джерелом енергії для якого слугував біогаз.



Рис. 2.6. Спірально-фальцевий ферментер

З 1975 року починається розробка системи подвійного фальцювання з горизонтальним процесом намотування (рис. 2.7). Верстат був винайдений Ксавером Ліппом для виробництва невеликих силосів і резервуарів діаметром до 3-х метрів. Машина була розміщена у виробничому цеху таким чином, що створена ємність розгорталася по горизонтальній спіралі. Нескінченно ємність можна було розрізати на відрізки будь-якої довжини і транспортувати на будівельний майданчик, де вона могла слугувати контейнером для зберігання.

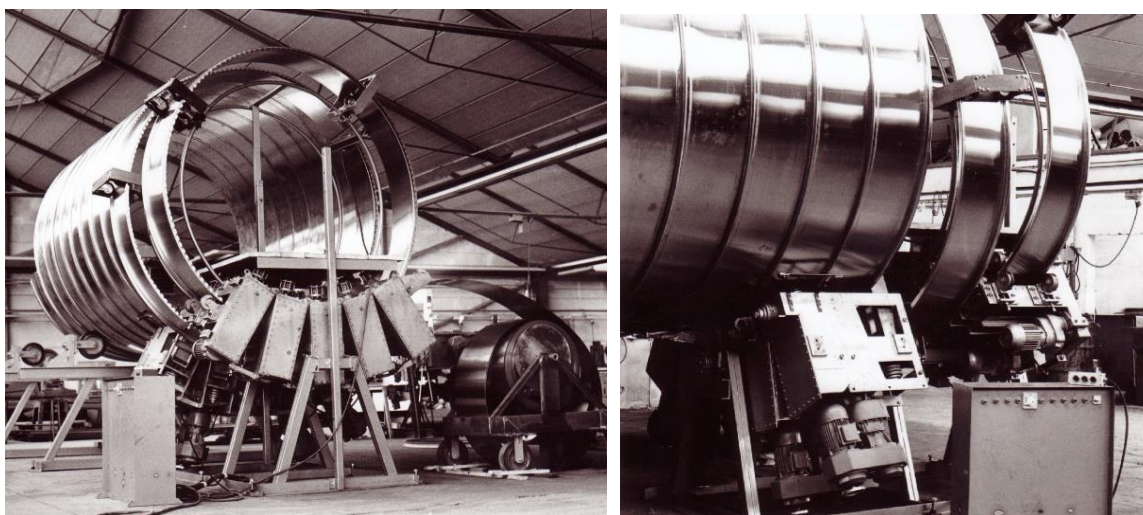


Рис. 2.7. Верстат подвійного фальцювання з горизонтальним процесом намотування

У 1982 році Ксавер Ліпп був нагороджений медаллю Рудольфа Дизеля за винахід і розробку системи подвійного фальцювання.

На початку вісімдесятих років Ксавер Ліпп розробив спеціальний пристрій, за допомогою якого можна було покривати ванти на мостах за технологією подвійного фальцювання. Таким чином, ванти мостів можна було захистити від погодних впливів. За цією технологією візок машини рухається вгору і одночасно обгортає трос, який потрібно захистити, завальцьованим листовим металом (рис. 2.8).

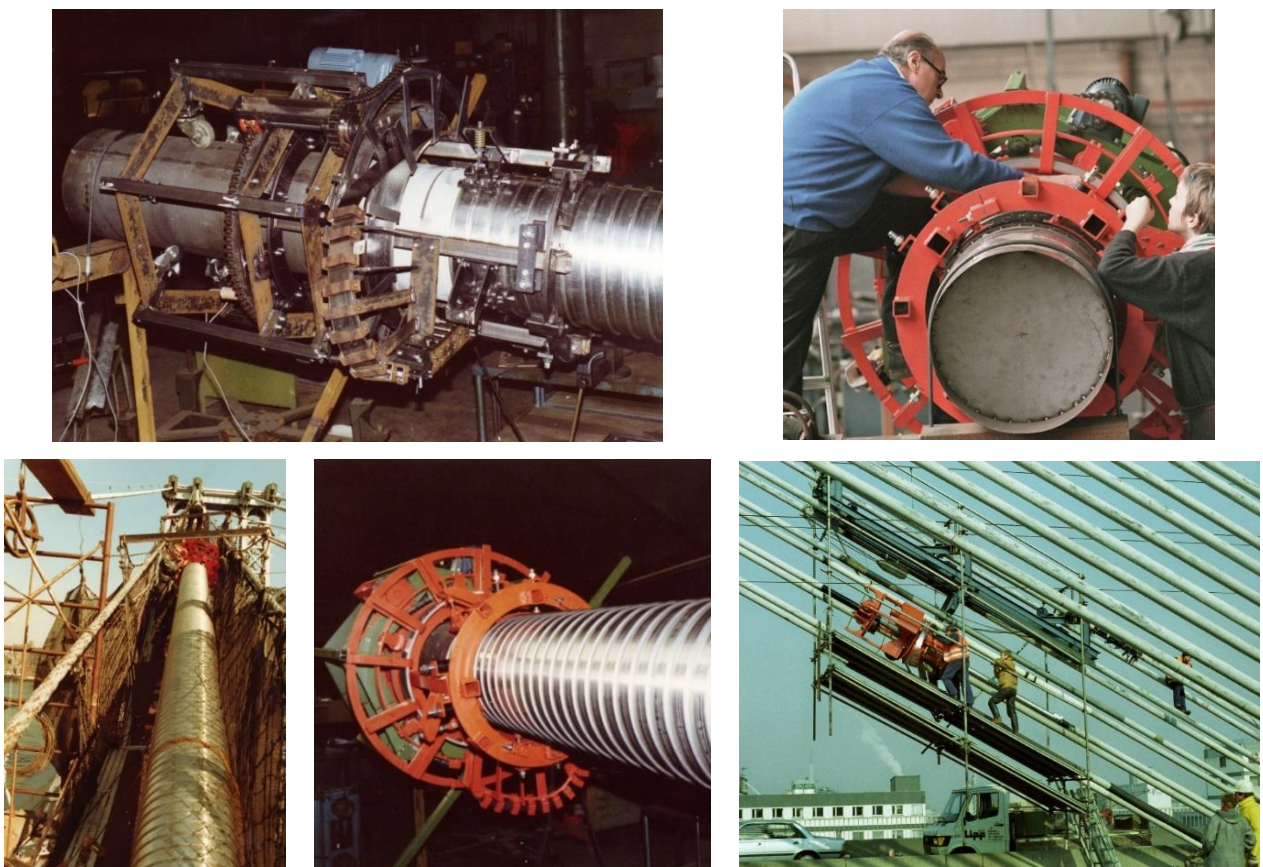


Рис. 2.8. Верстат для захисту мостових вант

З 1994 року починається робота над розробкою нового комбінованого матеріалу LIPP-INOX. Тонкий високоякісний лист нержавіючої сталі з'єднується з оцинкованим листом за допомогою спеціального клейкого матеріалу, і цей новий матеріал використовується для виробництва ємностей за технологією

подвійного шва. Внутрішня частина резервуарів виготовлена з нержавіючої сталі, а зовнішня - з оцинкованої сталі, в якості несучого матеріалу. Вода або агресивні матеріали тепер можуть зберігатися всередині резервуарів, а оцинкований листовий метал ззовні створює економічно ефективний кінцевий продукт. Якість і стабільність залишаються незмінними. За цей винахід Ксавер Ліпп був нагороджений премією Баден-Вюртемберга за інновації у 2005 році.

Паралельно з проектуванням біогазових установок, відбувається робота над розробкою технічного оснащення до них: мішалки, пристрої захисту від надлишкового тиску, насоси тощо. У 1997 році винахідник подає заявку на патент на свою технічну ідею – шахтну мішалку (рис. 2.9), яка дозволяє оптимально перемішувати рідку біомасу [144]. Технологія успішно встановлюється на біогазових установках по всьому світу.

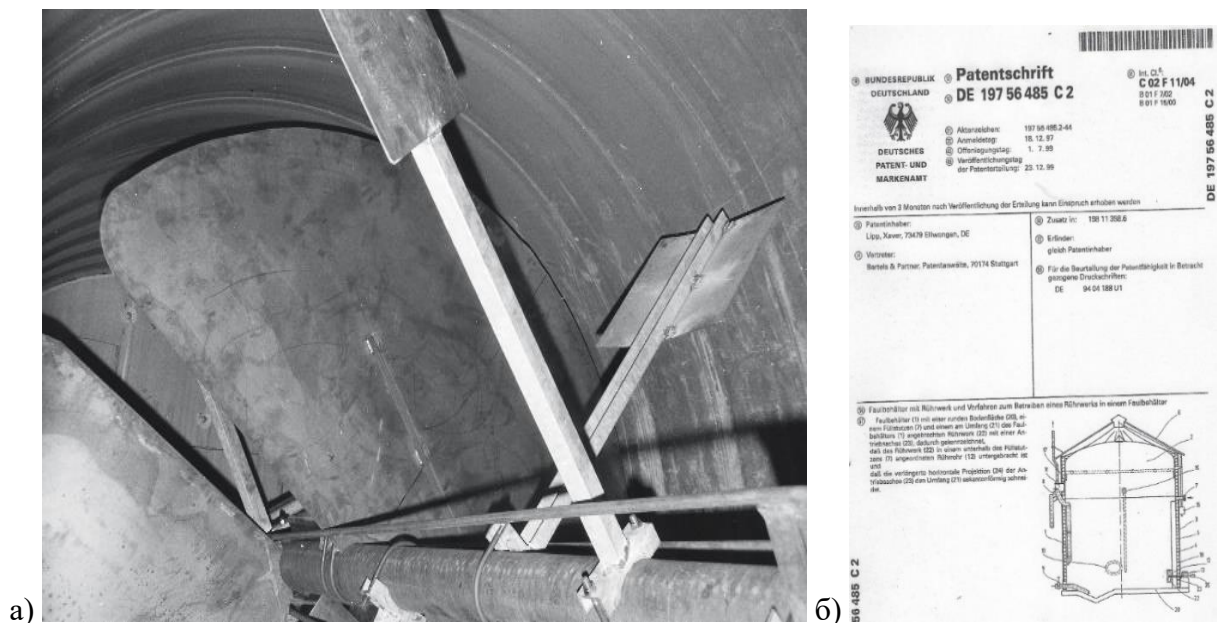


Рис. 2.9. Технологія перемішування: а) шахтна мішалка; б) патент

До 2010 року товщина металу для системи подвійного фальцювання була обмежена 4 мм, а максимальний об'єм ємності становив приблизно 6 000 м³.

Однак зі збільшенням попиту на металеві ємності, все частіше постає питання про збільшення об'ємів резервуарів та силосів для зберігання різних матеріалів,

У 2010 – 2012 роках винахідник розробив новий верстат подвійного фальцювання, який дозволяє формувати листовий метал більшої товщини. Силосна машина SM 60 працює з металом товщиною до 6 мм та може виготовляти контейнери значно більшого об'єму.

З 2012 року Ксавер Ліпп працює на розробкою технології зварювання резервуарів. Винахідник створює унікальний і водночас простий принцип виробництва резервуарів у кілька технічних етапів. В автоматизованому процесі сталева смуга потрапляє в спеціальну машину і спочатку попередньо формується, а потім зварюється на наступному етапі. Отриманий контейнер одночасно обертається по спіралі і утворює абсолютно герметичний, і в той же час дуже стійкий зварний резервуар. За свої нові ідеї з технології зварювання контейнерів, винахідник у 2017 році отримав кілька патентів.

Зварні резервуари різного діаметру та різної висоти можна виготовляти безпосередньо на місці за короткий час. Крім зберігання сипучих матеріалів, вони також ідеально підходять для зберігання питної води, харчових продуктів, етанолу або нафти. Технологія дозволяє використовувати сталь різних марок та високолеговані нержавіючі сталі, а автоматизований процес зварювання гарантує незмінно високу якість зварного шва. Попереднє профілювання сталевих стрічок перед процесом зварювання забезпечує додаткову стабільність резервуару.

2.2. Розгляд галузі застосування спірально-фальцевих силосів

Конструкції спірально-фальцевого типу є універсальними та економічними, вони можуть ефективно застосовуватись як силоси для різних видів сипучих матеріалів, резервуари для зберігання рідин, метантенки в складі біоенергетичних установок тощо [59]. Нижче наводиться аналітичний огляд галузі фактичного і можливого застосування цих інноваційних конструкцій із

вказанням їхніх технічних характеристик, типу застосованого металу та основного обладнання.

Всі нижче перераховані види силосних ємностей та їх аксесуари можуть бути виготовлені з таких типів металів: нержавіюча сталь VERINOX, дуплексний матеріал із оцинкованої сталевих стрічки зовні та з нержавіючої сталі всередині, оцинкована/чорна сталь. У всіх типах силосних ємностей можливе встановлення прохідних отворів, будь-якого розміру і форми, навіть у разі подальшої модернізації. Для технічного оснащення ємностей доступний широкий асортимент аксесуарів: ізоляція даху, дно, насосні системи, технологія змішування, оглядові вікна, сходи, драбини, платформи, з'єднувальні деталі, люки та інше обладнання для забезпечення технологічних процесів.

Силоси для сипучих матеріалів

Спірально-фальцеві силоси (рис. 2.10) придатні для зберігання різних видів сипучих матеріалів від зернових культур до тріски деревини і цементу та використовуються як у сільському господарстві так і у промисловості.



Рис. 2.10. Спірально-фальцеві силоси для зберігання зерна

Загальні технічні характеристики силосів для сипучих матеріалів: діаметр від 3 до 40 м; висота від 2 до 40 м; об'єм від 100 до 15.000 м³; тип металу – всі типи перераховані вище; обладнання – за запитом технологічного процесу.

Силос, що використовується для виробництва кормів для тварин

Силос (рис. 2.11) підходить для оптимального цілорічного зберігання (силосування) цукрових буряків та інших коренеплодів, які дають високий вихід біогазу з гектара оброблюваної землі. Після подрібнення матеріал перекачується безпосередньо в газонепроникний силос, де зберігається високоякісний силос з цукрових буряків.



Рис. 2.11. Силос для зберігання буряків

Технічні характеристики силосів для зберігання кормів: об'єм від 100 до 10.000 м³; тип металу – всі типи перераховані вище; обладнання – за запитом технологічного процесу.

Спіральньо-фальцеві ємності для зберігання рідин

Різні галузі промисловості потребують професійних рішень для будівництва установок і ємностей для зберігання і обробки рідин (рис. 2.12), а також

гнучкості в плані розмірів, вибору матеріалів і обладнання. При будівництві ємностей для зберігання рідин, вибір найкращого матеріалу, який буде відповідати всім технічним характеристикам та водночас бути економічно вигідним, є важливим фактором якості. Наприклад, муніципальні/промислові стічні води і шлами або певні технологічні, проміжні і кінцеві продукти хімічної, фармацевтичної та харчової промисловості ставлять високі вимоги до матеріалу ємностей. Система подвійного фальцювання LIPP має можливість використовувати різноманітні матеріали для будівництва ємностей, починаючи від оцинкованої сталі, комбінованого матеріалу Verinox і закінчуючи високолегованою нержавіючою сталлю.

Типи спірально-фальцевих ємностей: для стічної, технічної, протипожежної, дощової води; буферні, змішувальні та компенсаційні; накопичувальні мулові; для фільтрування, активації, кінцевого відстоювання тощо.



Рис. 2.12. Ємності для зберігання рідин

Технічні характеристики спіральньо-фальцевих ємностей: діаметр від 3 до 50 м; висота від 2 до 35 м; об'єм від 40 до 10.000 м³; рівень рН від 3 до 13, далі за запитом; тип металу – будь-який вказаний вище; обладнання – за запитом технологічного процесу.

Ємності для рідкого добрива



Рис. 2.13. Резервуари для зберігання рідкого добрива

Технічні характеристики резервуарів: діаметр від 3 до 50 м; висота від 2 до 35 м; об'єм від 40 до 10.000 м³; рівень рН від 5 до 10, далі за запитом, тип металу – всі типи, перераховані вище; обладнання – встановлення всіх одиниць, перерахованих вище та можливе додаткове оснащення, в залежності від технологічних потреб.

Спіральньо-фальцеві метантенки.

Метантенки (ферментери або ємності для зброджування) – герметичні ємності, що забезпечують зброджування осадів без доступу кисню повітря, при підтримці оптимальної температури зброджуваного осаду. На відміну від двоярусних відстійників і освітлювачів-перегнивачів, у метантенках здійснюють

підігрівання осадів до 33 чи 53 °С, їх інтенсивне перемішування та утилізацію утвореного біогазу [144].

Компанією LIPP створено чотири різних типів метантенків (рис. 2.14 – 2.17), кожен з яких підходить для різних сфер застосування.

1. *Модульний реактор KomBio* із вбудованим газовим акумулятором (рис. 2.14). Технічні характеристики: об'єм від 100 м³ до 3000 м³; робочий тиск до 200 Ра. Реактор поєднує сучасний промисловий газовий акумулятор і високопродуктивний метантенк. Стаціонарна конструкція даху, що може бути утеплена, забезпечує захист мембрани газового акумулятора від атмосферних впливів і, отже, значно продовжує термін служби. Крім того, обігрів реактора KomBio знаходиться зовні ємності з нержавіючої сталі (Verinox), що забезпечує хорошу тепловіддачу по всій висоті ємності. Ізоляція до 200 мм дозволяє використовувати установку як у холодних, так і в гарячих регіонах по всьому світу. Додатковою особливістю KomBio Reactor є запатентована технологія перемішувача, завдяки якій метантенк підходить для широкого спектру субстратів та забезпечує рівномірне перемішування ємності.



Рис. 2.14. Модульний реактор KomBio із вбудованим газовим акумулятором

2. *Універсальний метантенк з мембранним дахом* (рис. 2.15). Технічні характеристики: об'єм від від 200 м³ до 5000 м³; робочий тиск до 700 Ра. Універсальний метантенк призначений для використання на великих промислових та муніципальних підприємствах. Корпус виконаний із нержавіючої сталі (Verinox), що у поєднанні зі звареним мембранним дахом із нержавіючої сталі, забезпечує найвищу якість внутрішньої частини ємності. Конструкція оснащена технологією зовнішнього нагріву, яка завдяки гарній теплопровідності сталі, забезпечує рівномірне нагрівання по всій висоті ємності. Гарна ізоляція стін та даху ємності зводить до мінімуму втрати тепла у процесі ферментації.

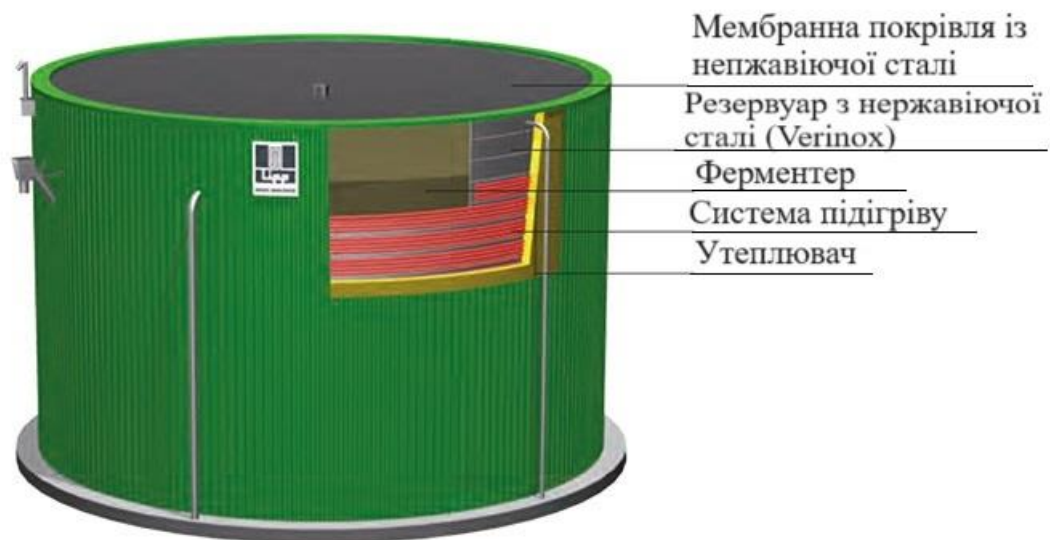


Рис. 2.15. Універсальний метантенк з мембранним дахом

3. *UniCentralmix* – метантенк із зовнішнім нагрівом та центральним перемішувачем (рис. 2.16). Технічні характеристики: об'єм від 100 м³ до 7000 м³; робочий тиск до 3000 Ра. Центральне перемішування знижує потребу в енергії та забезпечує рівномірне перемішування субстрату. Гладкі внутрішні стінки також зменшують утворення відкладень у метантенку.

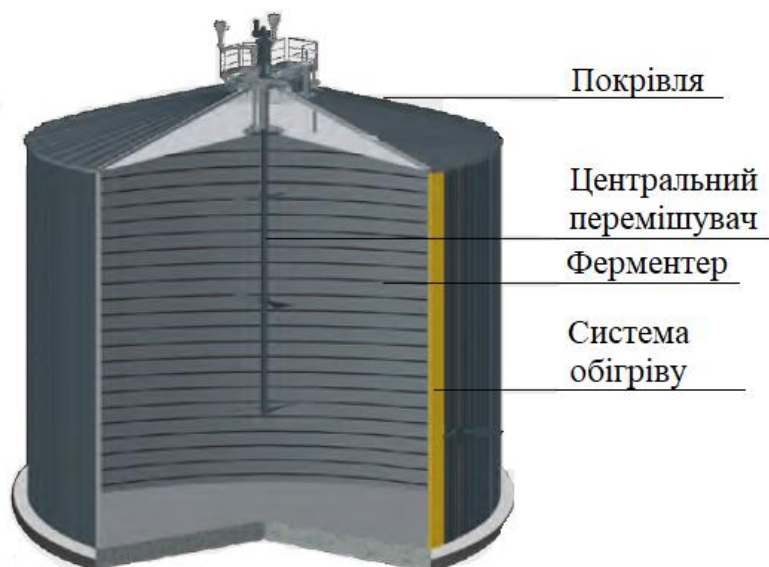


Рис. 2.16. Метантенк UniCentralmix

4. Метантенк *EcoDigester* (рис. 2.17). Технічні характеристики: об'єм від 100 м³ до 10 000 м³; робочий тиск до 700 Па. Використовується для сільськогосподарського застосування, гнучка конструкція дозволяє працювати з різними субстратами та додатками. Метантенк може бути виконаний із газовим акумулятором або без нього, у залежності від потреб виробництва. Тип конструкції покрівлі залежить від вимог виробничого процесу.

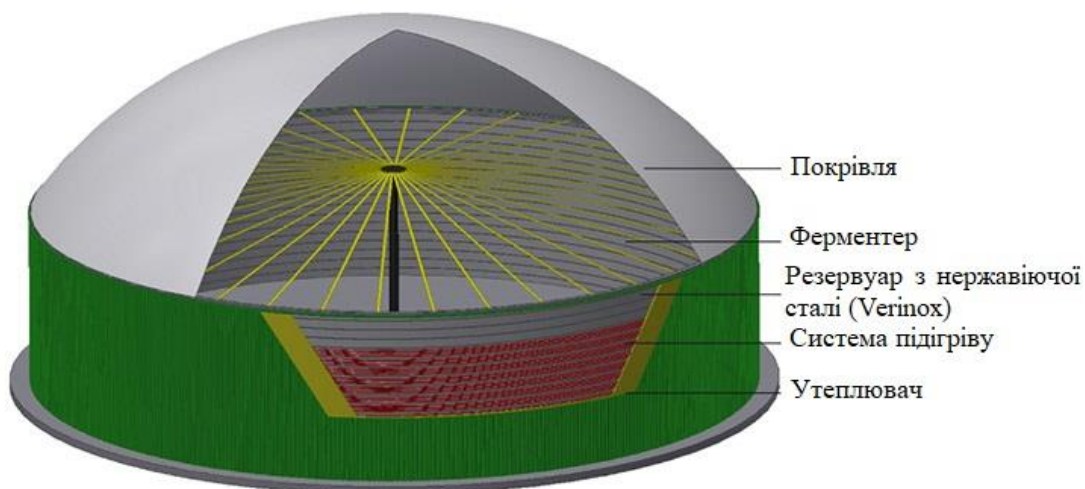


Рис. 2.17. Метантенк EcoDigester

Пост-метантенк

Для забезпечення ефективної утилізації залишкових газів та підвищення ефективності біогазової установки LPP пропонує три гнучкі пост-метантенки: універсальний, KomBio, Eсо [142].

Універсальний пост-метантенк (з об'ємом камери від 200 м³ до 5 000 м³) поставляється із високоякісною діафрагмовою кришкою з нержавіючої сталі, і призначений для використання із зовнішнім газовим акумулятором. Він особливо підходить для збору залишкових газів. *KomBio* (з об'ємом камери метантенка до 3500 м³) являє собою резервуар із вбудованим газовим акумулятором. Запатентований пост-метантенк є гнучким до субстрату, а також захищає газовий накопичувач від вітру, погодних умов та УФ-випромінювання. Третій варіант – *пост-метантенк Eсо* (з об'ємом камери зброджування від 100 м³ до 10 000 м³), який доступний із газовим накопичувачем або без нього, а також із різними варіантами конструкцій даху (рис. 2.18).



Рис. 2.18. Конструкції даху пост-метантенків

Технічні характеристики пост-метантенків: об'єм від 200 м³ до 5 000 м³, більші розміри за запитом; робочий тиск від 0 до 700 Па, далі за запитом; тип металу – всі типи, перераховані вище; обладнання – встановлення всіх одиниць, перерахованих вище, та можливе додаткове оснащення в залежності від технологічних потреб.

Спірально-фальцеві газові накопичувачі

У технологічних процесах виробництво газу не є безперервним. Саме тому для утилізації газу (наприклад, на теплоелектростанції) потрібен акумулятор (рис. 2.19), щоб компенсувати коливання тиску під час видобутку газу і заповнити проміжки часу, необхідні для ремонту та обслуговування установки.

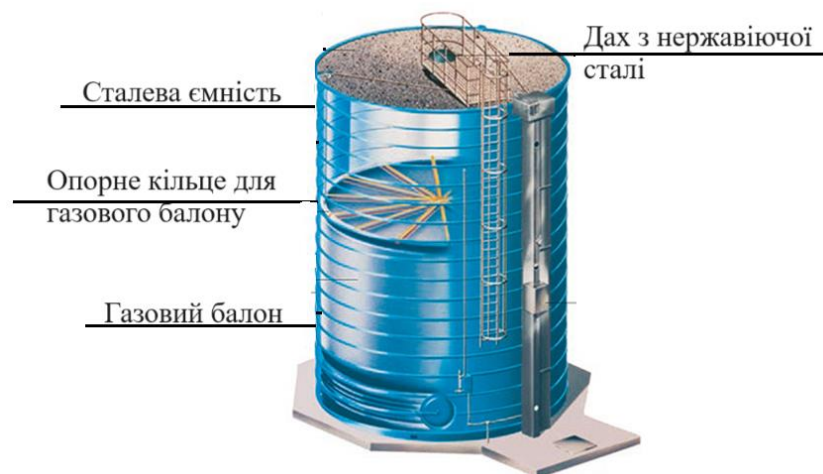


Рис. 2.19. Спірально-фальцеві газові накопичувачі

Компанія LIPP розробила систему для безнапірного (до макс. 500 Па) зберігання сухого газу, яка була використана в більш ніж 300 проєктах по всьому світу за останні 30 років і більше. Доступні сховища об'ємом від 30 м³ до 5000 м³ в залежності від продуктивності в кожному конкретному випадку.

Газовий накопичувач складається з двох частин:

1. Балон для зберігання газу у формі кулі.
2. Сталева ємність для захисту балону від механічних пошкоджень та впливу атмосферних явищ.
3. Ємність, виготовлена за технологією LIPP Double-Seam System. Балон для зберігання газу виготовлений з поліефірної тканини, спеціально ламінованої ПВХ з обох боків для покращення газостійкості та захисту від ультрафіолетового випромінювання. Він підвішується у контейнері за допомогою опорного кільця. Тиск газу підвищується за необхідності між газовим накопичувачем і місцем використання за допомогою компресорів.

Технічні характеристики спіраль-фальцевих газових накопичувачів: об'єм від 30 м³ до 5 000 м³; матеріал, що зберігається: каналізаційний газ, звалищний газ, біогаз; металева ємність розрахована на зберігання без тиску, контейнер для зберігання газу з тиском від 0 до 500 Па; матеріал: ємність – оцинкована сталь; дах – нержавіюча сталь; балон для зберігання газу – поліефірні тканини з ПВХ; обладнання – вимірювальна радіолокаційна система; захист від надлишкового/недостатнього тиску, люк доступу, що закривається на замок; датчик газу, сходи, драбини, платформи, з'єднувальні деталі, люки.

Спірально-фальцеві баки-акумулятори для проміжного зберігання відновлюваної енергії

Теплоаккумуляуючий резервуар (рис. 2.20) – це індивідуальне рішення для проміжного зберігання теплоти відновлюваних джерел енергії з ефективним об'ємом від 200 м³ до 2 000 м³. Доцільне акумуляування тепла є необхідною умовою для ефективного використання тепла від біогазових установок, когенераційних установок на біомасі, сонячних електростанцій або інших

джерел тепла. Буферний накопичувач із гнучкою ємністю є ідеальним рішенням для цього.



Рис. 2.20. Спірально-фальцевий теплоакumuлюючий бак

Стінки ємності – спірально-фальцевий циліндр, дно – мембрана, встановлена на підконструкцію та закріплена на бетонний фундамент, дах – скатний, сендвіч-панелі на сталевому каркасі.

Технічні характеристики: об'єм від 200 м³ до 2000 м³; висота до 20 м; матеріал, що зберігається – вода для опалення; робоча температура до 95 С°; утеплення – мінеральна вата 200-400 мм; обшивка – трапецієподібний листовий метал.

Особливе застосування спірально-фальцевих конструкцій

1. Модульний склад шатрового типу для тимчасового зберігання зернових культур.

Склад являє собою циліндричну ємність із плоским мембранним днищем та покриттям шатрового типу (рис. 2.21) [128].

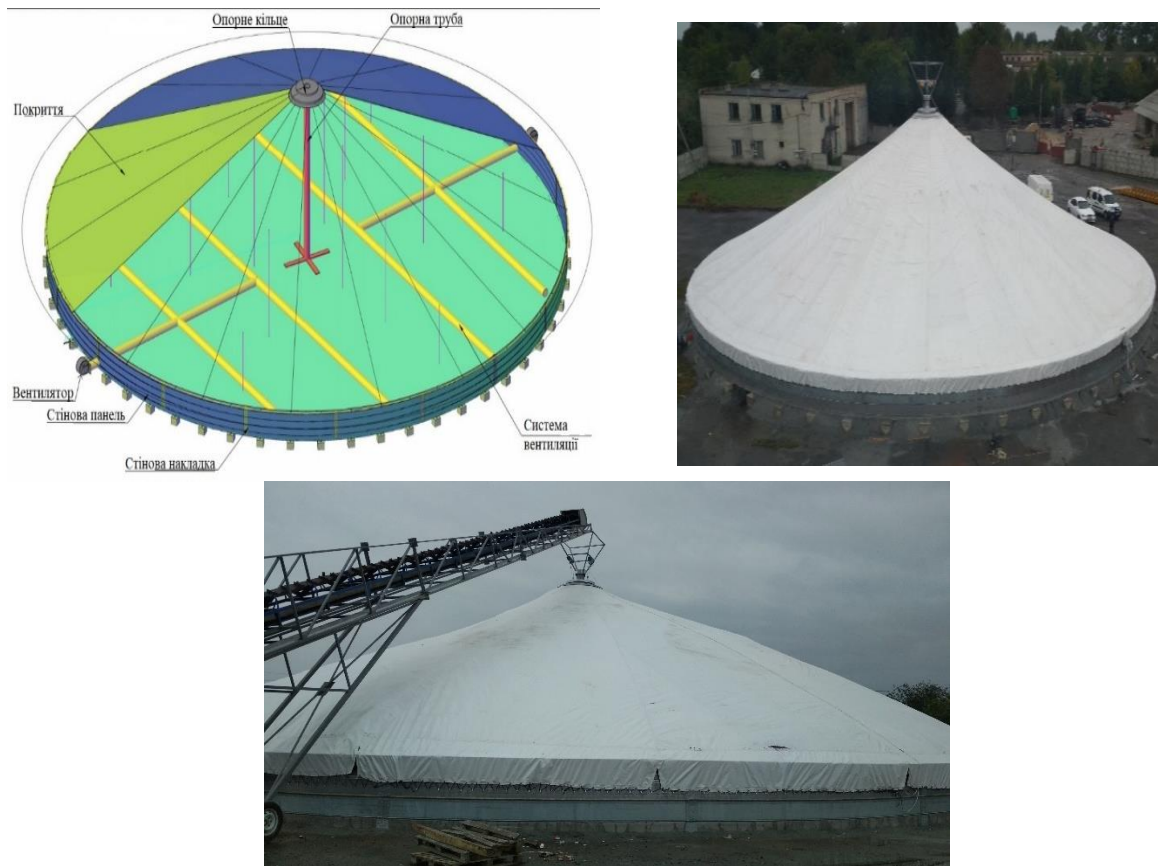


Рис. 2.21. Модульний склад шатрового типу для тимчасового зберігання зернових культур

Циліндричний корпус – це система спірального з'єднання сталеві стрічки шляхом подвійного вальцювання, розділена на секції, які об'єднані накладками для можливості розбирання сховища та складання його на іншому місці. Завдяки особливостям технології створення циліндру сховища, стінові панелі мають міцні вальцьовані шви шириною 30-40 мм загальною товщиною 11-32 мм із зовнішнього боку сховища, кожен виток якої дає додаткове ребро жорсткості всієї конструкції.

Дах сховища являє собою просторову конусну конструкцію, зібрану з несучих тросів і мембрани (тарпаулін 300). Тарпаулін 300 – це міцний плетений поліетилен, товщиною 0,46 мм та вагою 300 г на 1 м².

Конструкція покрівлі виключає потрапляння у склад атмосферних опадів, проникнення птахів і забезпечує максимальну місткість.

Плоске мембранне днище (підкладка) являє собою плоску мембрану, виготовлену із секторів тарпауліну 120, зшитих між собою герметично.

2. Металевий бункер-укриття

Конструкція підземного металевого укриття (рис. 2.22) призначена для розміщення в польових умовах командних пунктів та для укриття особового складу підрозділів, які виконують завдання у зоні бойових дій [156].

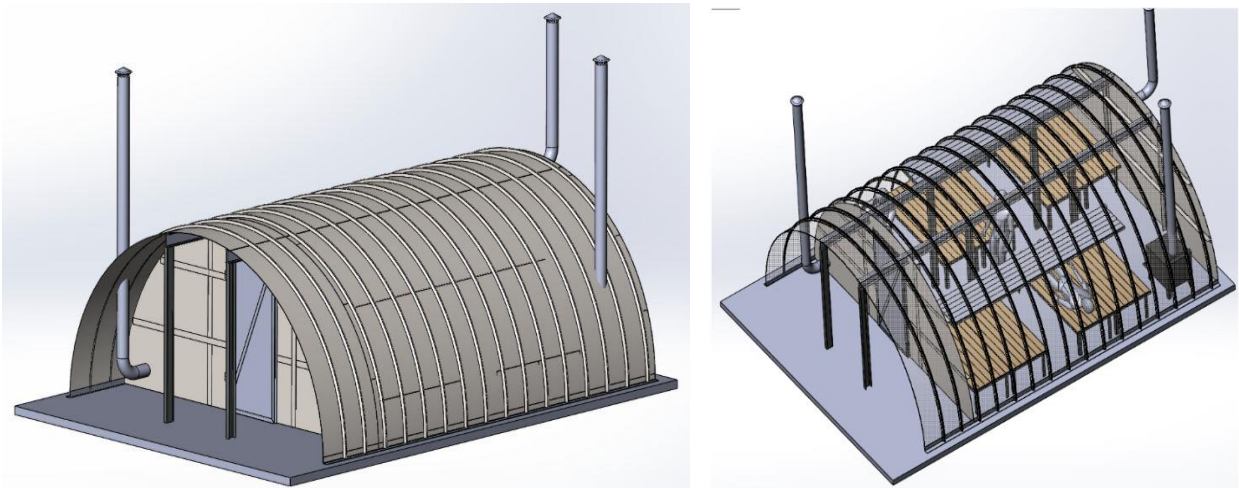


Рис. 2.22. Металеве сховище уніфіковане МСУ- 46.60.23

Технічні характеристики сховища: ширина – 4,6 м; довжина 6 м; висота 2,3 м; матеріал корпусу – оцинкована конструкційна сталь DX51D+Z, а роче покриття – товщиною 2 мм, торцеві стіни – товщиною 3 мм, загальна вага 2,6 т.

Корпус виконано методом спірально-фальцевого з'єднання металевих штрипса за німецькою технологією LIPP Double-Seam System.

Бункер розрахований на занурення на глибину до 4 м від верхньої частини корпусу укриття.

Виготовлення конструкції відбувається у два етапи. На першому етапі відбувається формування спірально-фальцевого циліндра потрібного діаметра та висоти, після чого корпус розрізається у поздовжньому напрямку на дві частини. Другий етап передбачає підсилення арочного покриття каркасом із швелерів та монтаж торцевих стін. Готова конструкція (рис. 2.23) перевозиться на місце монтажу за допомогою автотранспорту.



Рис. 2.23. Конструкція бункера-сховища, готова до транспортування

Після транспортування конструкцію монтують у котлован за допомогою автокрану та засипають, забезпечуючи вихід з бункера (рис. 2.24).



Рис. 2.24. Монтаж бункера-сховища

Бункер оснащується вентиляційною системою, піччю-буржуйкою, ліжками та іншим необхідним обладнанням для комфортного та безпечного перебування всередині.




Узагальнені дані всіх типів конструкцій зібрані в таблиці 2.1.


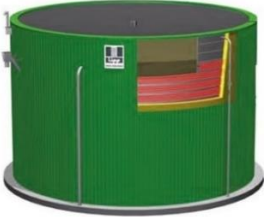

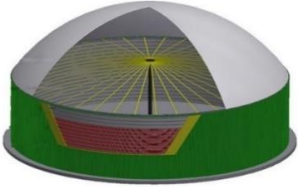
Таблиця 2.1

Загальні дані щодо параметрів спірально-фальцевих силосів, застосованих у різних галузях промисловості




| Тип кон-ції | Матеріал, що зберігається | Конструкція | Діапазон об'єму, м ³ | Геометричні характеристики | | Особливості матеріалу, що зберігається, які впливають на конструкцію | Навантаження на конструкцію |
|-------------|--|---|---------------------------------|----------------------------|-----------|--|--|
| | | | | Діаметр, м | Висота, м | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Силос | Зернові культури |  | 100-15 000 | 5 – 40 | 3 – 40 | Схильність до самозігрівання та спікання | Залежить від питомої ваги 6-9 кН/м ³ та геометричних характеристик споруди |
| | Тріска деревини |  | 100-15 000 | 5 – 40 | 3 – 40 | Схильність до злежування та спікання, погана сипучість | Залежить від питомої ваги 3-5 кН/м ³ та геометричних характеристик споруди |
| | Продукти переробки гірничих промисловостей (цемент, кокс та ін.) |  | 100-15 000 | 5 – 40 | 3 – 40 | Схильність до злежування, мілко-дисперсність | Залежить від питомої ваги 7-16 кН/м ³ та геометричних характеристик споруди |

Продовження таблиці 2.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------|---|--|--------------|---------|--------|----------------------------|---|
| Ємності для рідин | Вода (питна, стічні води, технічна вода та ін.) |  | 100 – 10 000 | 5 – 50 | 3 – 35 | Рівень рН від 3 до 13 | Залежить від питомої ваги 10 кН/м ³ та геометричних характеристик споруди |
| | Рідке добриво (відходи фермерства) |  | 40 – 10 000 | 20 – 45 | 3 – 35 | Рівень рН від 5 до 10 | Залежить від питомої ваги 10-11 кН/м ³ та геометричних характеристик споруди |
| | Вода для опалення |  | 200 – 2 000 | від 4 | до 20 | Робоча температура до 95°C | Залежить від питомої ваги 10 кН/м ³ та геометричних характеристик споруди |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------|--|---|-------------|------|------|--|------------|
| Метангенк | Відходи тваринництва та рослинництва, біогаз |  | 100 – 3500 | 6-50 | 3-35 | Високий рівень рН, потреба в перемішуванні та підігріванні | 0-200 Па |
| | Відходи тваринництва та рослинництва |  | 100 – 7000 | 6-50 | 3-35 | Високий рівень рН, потреба в перемішуванні та підігріванні | 0 -2000 Па |
| | Відходи тваринництва та рослинництва |  | 100 – 7000 | 6-50 | 3-35 | Високий рівень рН, потреба в перемішуванні та підігріванні | 5-3000 Па |
| | Відходи тваринництва та рослинництва |  | 100 – 10000 | 6-50 | 3-35 | Високий рівень рН, потреба в перемішуванні та підігріванні | 0-700 Па |

Продовження таблиці 2.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------|-------------------|--|----------------|------|------|------------------------------------|------------|
| Пост-метантенк | Залишкові гази |  | 150 – 7500 | 6-50 | 3-35 | Утворення надлишкового тиску | 0 – 700 Па |
| | Залишкові гази |  | до 3500 | 6-50 | 3-35 | Утворення надлишкового тиску | 0 – 700 Па |
| | Залишкові гази |  | 100 – 10000 | 6-50 | 3-35 | Утворення надлишкового тиску | 0 – 700 Па |

Продовження таблиці 2.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|---|--|--|-------|-------|--|---|
| Газгольдер | газ стічних вод, звалищний газ, біогаз і CO ² |  | 50 – 5000 | від 4 | до 20 | Утворення надлишкового тиску | 0 – 500 Па |
| Склад шагрового типу | Зернові культури |  | 100 – 2000 | від 4 | до 3 | Схильність до самозігрівання та спікання | Залежить від питомої ваги 6-9 кН/м ³ та геометричних характеристик споруди |
| Бункер-укриття | Укриття для людей |  | ширина – 4,6 м; довжина – 6 м; висота – 2,3м | 4,6 | 2,3 | Тип ґрунту та глибина розміщення сховища | Залежить від питомої ваги ґрунту 18 кН/м ³ та геометричних характеристик сховища |

2.3. Висновки по розділу

Для розв'язання поставленої задачі дослідження, у даному розділі було зібрано та досліджено історію винаходу спірально-фальцевих конструкцій.

На основі зібраної інформації зроблено аналіз галузі застосування спірально-фальцевих силосів. При дослідженні застосування конструкцій у різних галузях промисловості було проаналізовано закордонний та вітчизняний досвід. Зібрано технічні характеристики ємностей спірально-фальцевого типу в залежності від функціонального призначення.

Окрім традиційного застосування спірально-фальцевих силосних ємностей, розглянуто приклади особливого застосування конструкцій спірально-фальцевого типу на території України. В умовах воєнного стану спірально-фальцеві конструкції виявилися перспективними для влаштування мобільних модульних складів шатрового типу для тимчасового зберігання зернових культур. Описано спірально-фальцеву конструкцію підземного металевого укриття для розміщення в польових умовах командних пунктів та укриття для особового складу підрозділів, які виконують завдання у зоні бойових дій.

Широке застосування металевих спірально-фальцевих конструкцій, яке продовжує розширюватись, підтверджує унікальність даних конструкцій та ефективність компанії винахідника.

За результатами даного розділу було створено таблицю із загальними даними, щодо параметрів спірально-фальцевих силосів, застосованих у різних галузях промисловості.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [59, 144, 146, 156, 128].

РОЗДІЛ 3

РОЗВИТОК МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ

3.1. Специфіка конструкції спірально-фальцевого силосу

Конструкція спірально-фальцевого циліндричного силосу формується за допомогою спеціального обладнання, яке навиває металевий штрипс шириною 495 мм та товщиною 2-4 мм по спіралі з одночасним формуванням фальцевого ребра замкнутого типу. Фальцевий замок розташований зовні стінки силосу під незначним кутом до горизонтальної площини і утворює кільцеві ребра. Фальцеві ребра висотою l_0 , складаються із верхньої та нижньої половинки, які відрізняються своєю геометрією, жорсткістю та піддатливістю. Крок кільцевих ребер 365 мм (рис. 3.1).

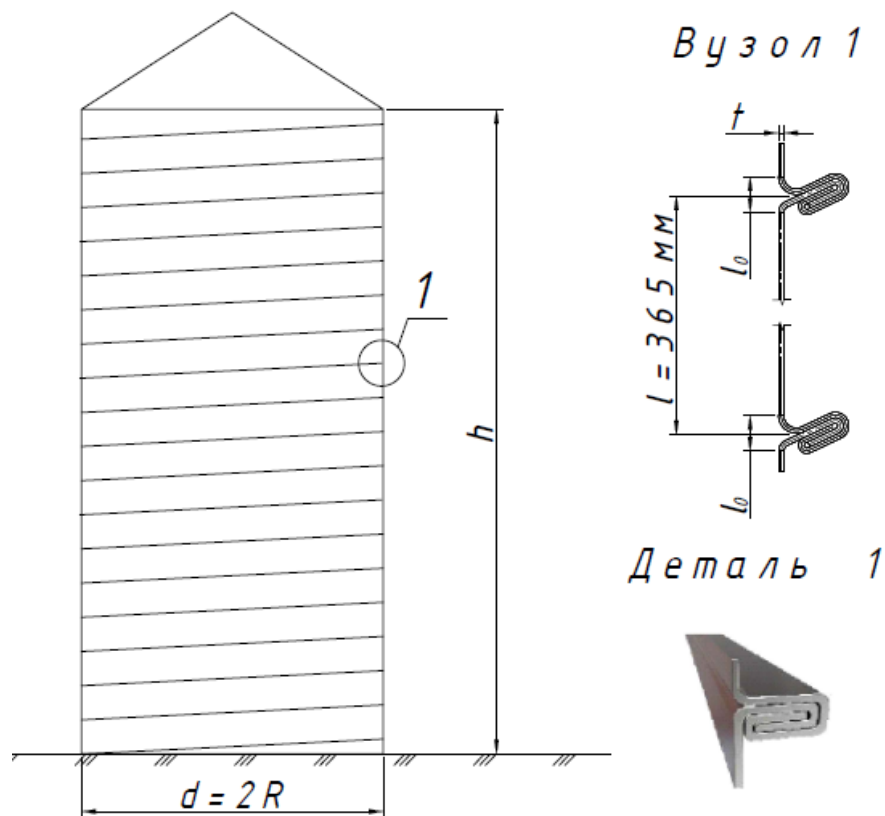


Рис. 3.1. Конструкція спірально-фальцевого силосу

Конструктивні рішення оболонки силосів спіральньо-фальцевого типу суттєво відрізняються від традиційних металевих збірних силосів із гофрованих панелей на болтових з'єднаннях.

Специфіка конструкції спіральньо-фальцевого силосу, яка впливає на їх напружено-деформований стан, полягає в наступному [64]:

- Ребра розміщуються по спіралі, але під незначним кутом нахилу витка, близьким 1° .
- Вказані ребра фальцевого типу працюють в умовах складного напруженого стану. Вони не тільки підвищують жорсткість конструкції оболонки силосу на розтяг та згин у кільцевому напрямку, але в той же час знижують жорсткість конструкції уздовж твірної за рахунок закруглень у місцях переходу стінки оболонки в переріз ребра. Поздовжні зусилля, які утворюються у стінці циліндричної оболонки, у місцях розміщення ребер, передаються із верхньої частини на нижню з ексцентриситетом, що призводить до появи додаткового згинаючого меридіонального моменту, який у свою чергу викликає місцево-радіальну деформацію стінки в міжфальцевій зоні.
- 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 ряді випадків зовнішніх впливів, наприклад, від вітрового навантаження, потребує розгляду розрахунку оболонки, як конструктивно-нелінійної системи.
- Досить частий крок витків фальцевого ребра та малий кут їх нахилу дозволяє розглядати його як систему близько розташованих горизонтальних ребер, а напружений стан заповненого силосу як осесиметричний. При цьому формується часте розміщення ліній обурення безмоментного напруженого стану. Коли докритичний стан приймається безмоментним, у даній конструкції він повинен розглядатись моментним, при дії як тільки поздовжнього стискаючого зусилля, так і при одночасній дії поздовжнього та

внутрішнього тиску, особливо при початкових неправильностях. Для таких конструкцій найбільш ймовірними неправильностями при навананні є прогини міжфальцевої зони в сторону зовнішньої поверхні (викривлення стінки між ребрами), які близькі до осесиметричного вигляду в кільцевому напрямку.

3.2. Порівняння методик визначення навантажень та впливів на конструкцію силосу за різними нормативними документами

Основними навантаженнями та впливами на силос є: горизонтальні та вертикальні (за рахунок тертя) навантаження від тиску сипких матеріалів із врахуванням центрального вивантаження силосу; власна вага конструкції; навантаження від снігу на покриття; вплив температури; навантаження від термопідвісок; навантаження від тиску вітру (для незаповненого силосу).

Перераховані навантаження, за виключенням власної ваги, відносяться до тимчасових (довготривалих та короткочасних).

Нормативні документи України щодо розрахунку навантаження на силосні конструкції. Основними нормативними документами в Україні, що регламентують питання визначення навантажень на силосні конструкції в Україні, є ДБН В2.2-8-98 [101] та ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [106]. ДБН В2.2-8-98 [101] регламентує питання проектування силосних ємностей, класифікацію їх конструкцій, визначення навантажень та зусиль в елементах, ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [106], у свою чергу, визначає лише дії на конструкції. Ці два документи регламентують правила розрахунку навантажень від сипких матеріалів, які виникають всередині ємностей.

1. ДБН В2.2-8-98 Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна.

Відповідно до ДБН В2.2-8-98 [101], рівномірно розподілений по периметру нормативний горизонтальний тиск сипких матеріалів P_h^n (кгс/м²) на стіни силосів на глибині Z (м), від верху засипу, визначається за формулою:

$$P_h^n = \frac{\gamma \rho}{f} (1 - e^{-\lambda f z / \rho}), \quad (3.1)$$

де ρ – гідравлічний радіус поперечного перерізу силосу, м, що визначається за

$$\rho = \frac{A}{U} = \frac{\pi r^2}{\pi d} = \frac{r}{2};$$

r, d – радіус та діаметр силосу, м;

A, U – площа і периметр поперечного перерізу силосу відповідно м² і м;

λ – коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу, характеризується відношенням середніх значень горизонтального і вертикального тиску згідно п.

$$4.6 [101] \text{ та визначається за формулою: } \lambda = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right);$$

e – основа натурального логарифму;

γ – питома вага сипких матеріалів, кгс/м³, приймається згідно з табл. А.1 [101];

φ – кут внутрішнього тертя, град, приймається згідно з табл. А.1 [101];

f – коефіцієнт тертя сипких матеріалів об стіни силосу, приймається згідно з табл. А.1 [101].

При розрахунках конструкцій верх засипання допускається приймати для силосу діаметром 12 м і більше – на рівні 1/3 від низу висоти конуса засипу. У даному випадку глибина Z (м) від верха засипання визначена за формулою:

$$z = h + \frac{d}{2} \operatorname{tg} \varphi \frac{1}{3}, \text{ де } h \text{ – висота від верху силосу до верху воронки чи забутки.}$$

Кільцевий горизонтальний тиск сипких матеріалів на стіни круглих силосів приймається рівномірно розподіленим по всьому периметру стінки з висотою зони кільцевого навантаження, рівного 1/4 діаметра силосу. Зона може займати будь-яке положення по висоті. Нормативне значення кільцевого горизонтального тиску P_{h1}^n визначається за формулою:

$$P_{h1}^n = a_1 P_h^n, \quad (3.2)$$

де a_1 – коефіцієнт місцевого підвищення тиску, що приймається згідно з вимогами 4.11. [101] у залежності від відношення h/d .

Сума граничних розрахункових значень рівномірно розподілених горизонтальних тисків із граничними розрахунковими значеннями кільцевих горизонтальних тисків визначається за формулою:

$$\sum P_i = \gamma_{fm} (P_h^n + P_{hl}^n), \quad (3.3)$$

де γ_{fm} – коефіцієнт надійності за навантаженням.

Нормативне значення вертикального тиску сипкого матеріалу, що передається на стіни силосу силами тертя, визначається за формулою:

$$P_f^n = f P_h^n, \quad (3.4)$$

Розрахунковий вертикальний тиск визначаємо за формулою: $P_f^n = 1,3 f P_h^n$.

Вертикальний тиск на днище силосу P_v^n від дії сипкого матеріалу визначається за формулою:

$$P_v^n = \frac{a_4}{\lambda} P_h^n, \quad (3.5)$$

де a_4 – коефіцієнт, який приймається за рекомендованим додатком Б [101].

При виконанні умови $h < 1,5\sqrt{A}$, стіни силосу повинні бути перевірені на зусилля за вимогами від тиску, як стіни бункера, за формулами: $P_{hz}^n = \lambda \gamma Z$, $P_{fz}^n = f P_{hz}^n$.

Розрахунковий вертикальний тиск визначається за формулою: $P_{fz}^n = 1,3 f P_{hz}^n$.

У залежності від того, які результати розрахунку на навантаження від горизонтального та вертикального тисків на стінку більші, як для силосу чи як для бункера, ті значення й приймаються при розрахунках стінки силосу.

Також враховується зміна температури зовнішнього повітря та перепаду температури за товщиною стін шляхом додаткового горизонтального тиску сипкого матеріалу на стінку силосу. З метою полегшення розрахунків тиск прийнятий рівномірно розподіленим по периметру і висоті.

Нормативне значення цього тиску P_{ht}^n , МПа (кгс/см²), визначається за формулою:

$$P_{ht}^n = \frac{k_t \alpha_t T_1 E_m}{\frac{d}{2t} \frac{E_m}{E_c} + (1 - \nu)}, \quad (3.6)$$

де T_1 – середня добова амплітуда коливання температури зовнішнього повітря (град), що приймається $2\theta_1$, де θ_1 визначається згідно з ДБН В.1.2–2:2006 [100];

E_m – модуль деформації стиснення сипкого матеріалу, визначається за формулою $E_m = 250 \cdot (P_h^n)^{0,63}$;

E_c – модуль пружності матеріалу стін силосу;

k_t – коефіцієнт, який для сталевих стін дорівнює 2,5;

α_t – коефіцієнт лінійної температурної деформації матеріалу стін, 1/град;

d – внутрішній діаметр силосу, м;

t – товщина стін, м;

ν – початковий коефіцієнт поперечних деформацій (коефіцієнт Пуассона).

Граничне розрахункове навантаження від додаткового горизонтального тиску зерна на стінку силосу, що враховує перепад температури, визначено за формулою: $P_{ht}^p = \gamma_{fm} P_{ht}^n$, де γ_{fm} - коефіцієнт надійності за навантаженням.

Граничне розрахункове снігове рівномірно розподілене навантаження розраховується відповідно до діючих будівельних норм.

Граничне розрахункове вітрове рівнорозподілене по периметру стінки силосу, у залежності від типу місцевості, розраховується відповідно до діючих будівельних норм.

2. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Єврокод 1: Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари.

У цьому нормативному документі передбачено, що значення навантажень при русі сипкого матеріалу в силосній конструкції залежать від гнучкості ємності, класу впливів, категорії поверхні стінки та величини ексцентриситету при завантаженні та розвантаженні. У зв'язку з цим, наведено різні процедури визначення горизонтального тиску p_{hf} , дотичного тиску тертя p_{wf} та вертикального тиску p_{vf} на корпус ємності при завантаженні та симетричні тиски при розвантаженні p_{he} і p_{we} . Симетричні навантаження від заповнення та вивантаження гнучких силосів визначаються за формулами, наведеними в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Формули визначення впливів на вертикальні стіни гнучких силосів

| Впливи на вертикальні стінки гнучких силосів | Навантаження від заповнення | Навантаження від вивантаження |
|--|---|---|
| Горизонтальний тиск | $p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z)$ | $p_{he} = C_h p_{pf}$ |
| Дотичний тиск від сил тертя | $p_{wf}(z) = \mu p_{ho} Y_J(z)$ | $p_{we} = C_w p_{wf}$ |
| Підвищення рівномірного навантаження, як зміна місцевого навантаження | $p_{hf.u} = p_{hf} (1 + 0,5C_{pf})$ $p_{wf.u} = p_{wf} (1 + C_{pf})$ | $p_{he.u} = p_{he} (1 + 0,5C_{pe})$ $p_{we.u} = p_{we} (1 + C_{pe})$ |
| Примітки: $p_{ho} = \gamma K z_o$, $z_o = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U}$, $Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_o}$ | | |

Позначення у табл. 3.1:

γ – характеристичне значення питомої ваги;

μ – характеристичне значення коефіцієнта тертя об стінки для матеріалу, що ковзає по вертикальній стінці;

K – характеристичне значення коефіцієнта бокового тиску;

z – глибина під еквівалентною поверхнею матеріалу;

A – площа внутрішнього поперечного перетину силосу;

U – периметр внутрішнього поперечного перетину силосу;

C_h – коефіцієнт при розвантаженні для горизонтального тиску;

C_w – коефіцієнт при вивантаженні для дотичного тиску тертя об стінку;

C_{pf} – коефіцієнт місцевого навантаження при заповненні (коефіцієнт збільшення навантаження);

C_{pe} – коефіцієнт місцевого навантаження при вивантаженні (коефіцієнт збільшення навантаження).

Характеристичні значення сипкого матеріалу приймаються згідно з табл. Е.1 [106].

Варто відзначити, що при визначенні максимального навантаження p_{hf} , p_{wf} , p_{vf} для циліндра, використовуються різні крайні значення параметрів сипкого матеріалу (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Значення параметрів для різних видів навантаження на стінку силосу

| | Прийняте характеристичне значення | | |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Коефіцієнт тертя об стінки μ | Коефіцієнт бокового тиску K | Питома вага матеріалу γ |
| Для вертикальної стінки або циліндра | | | |
| Максимальний нормальний тиск на вертикальну стінку | Нижнє | Верхнє | Верхнє |
| Максимальний дотичний тиск тертя на вертикальну стінку | Верхнє | Верхнє | Верхнє |
| Максимальні вертикальні навантаження на воронку і днище силосу | Нижнє | Нижнє | Верхнє |

У табл. 3.3 вказані значення сипкого матеріалу γ , φ_r , φ_i , K , які враховуються у розрахунках горизонтального та вертикального навантаження, у залежності від норм проектування.

Таблиця 3.3

Значення питомої ваги γ , кута природнього укосу φ_r , кута внутрішнього тертя φ_i та коефіцієнта бокового тиску K сільськогосподарських культур

| Нормативний документ | Назва сипкого матеріалу | Питома вага γ , кН/м ³ | Кут природнього укосу φ_r | Кут внутрішнього тертя φ_i | Коефіцієнт бокового тиску K |
|--|-------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| ДБН | Всі зернові та бобові | 8 | 25 | 25 | 0,406 |
| ДСТУ | Пшениця | 7,5* – 9** | 34 | 27* – 34** | 0,49* – 0,6** |
| | Кукурудза | 7* – 8** | 35 | 27* – 35** | 0,46* – 0,6** |
| | Ячмінь | 7* – 8** | 31 | 24* – 32** | 0,53* – 0,65** |
| | Соя | 7* – 8** | 29 | 22* – 29** | 0,57* – 0,7** |
| Примітки: * нижнє характеристичне значення; ** верхнє характеристичне значення питомої ваги γ взяті згідно табл. Е.1 ДСТУ; * нижнє характеристичне значення; ** верхнє характеристичне значення кута внутрішнього тертя φ_i та коефіцієнта бокового тиску K , розраховані за формулами (4.1) та (4.2), (4.5) та (4.6) ДСТУ | | | | | |

Як видно, з табл. 3.3 розбіжності в значеннях питомої ваги γ незначні, у той час, як кут природнього укосу φ_r , кут внутрішнього тертя φ_i та коефіцієнт бокового тиску K мають значні відхилення. У табл. 3.4 наведені значення коефіцієнта тертя об стіни.

Таблиця 3.4

Значення коефіцієнта тертя об стіни μ

| Нормативний документ | Назва сипкого матеріалу | Тип стіни | Коефіцієнт тертя об стінки μ |
|--|-------------------------|----------------|----------------------------------|
| ДБН | Всі зернові та бобові | металеві стіни | 0,4 |
| | | бетонні стіни | 0,4 |
| ДСТУ | Пшениця | Тип стіни D1 | 0,21* – 0,28** |
| | | Тип стіни D2 | 0,33*– 0,44** |
| | Кукурудза | Тип стіни D1 | 0,18* – 0,27** |
| | | Тип стіни D2 | 0,29*– 0,45** |
| | Ячмінь | Тип стіни D1 | 0,21* – 0,28** |
| | | Тип стіни D2 | 0,28*– 0,38** |
| | Соя | Тип стіни D1 | 0,21* – 0,28** |
| | | Тип стіни D2 | 0,33*– 0,44** |
| <p>Примітки: * нижнє характеристичне значення; ** верхнє характеристичне значення, розраховані за формулами (4.3) та (4.4) ДСТУ</p> <p>Категорії поверхні стінок наведені в табл. 4.1 ДСТУ:</p> <p>тип стіни D1 – класифікується як «дуже гладка» - полірована неіржавіюча сталь;</p> <p>тип стіни D2 – класифікується як «гладка» - гладка маловуглецева сталь (зварні, болтові конструкції).</p> | | | |

Наведені в табл. 3.4 величини коефіцієнта тертя об стіни μ показують велику розбіжність у значеннях у залежності від нормативних документів.

Варто відзначити, що розрахунок горизонтальних та вертикальних тисків на стіни силосів за ДБН має такі відмінності від ДСТУ: не враховуються форми потоку в процесі вивантаження, не виконується поділ силосних конструкцій за гнучкістю, а отже розрахунок горизонтального та вертикального тисків для всіх типів конструкцій виконується за однією формулою. Не враховується також статистичний розкид характеристик сипких матеріалів, а саме: характеристичне значення питомої ваги для всіх зернових культур, прийняте $\gamma = 8 \text{ kH} / \text{m}^3$, кут природного укосу та кут внутрішнього тертя відповідають одному значенню

$\varphi = 25^\circ$. Також варто відзначити, що в ДБН наведений у табл. А.1 коефіцієнт тертя об стіни, як для металевих, так і для бетонних силосів, відповідає значенню $\mu = 0,4$.

Для порівняння розрахунків за цими будівельними нормами були визначені нормативні горизонтальні та вертикальні від сил тертя тиски, що діють на стіни силосної ємності за обома стандартами (рис.3.2).

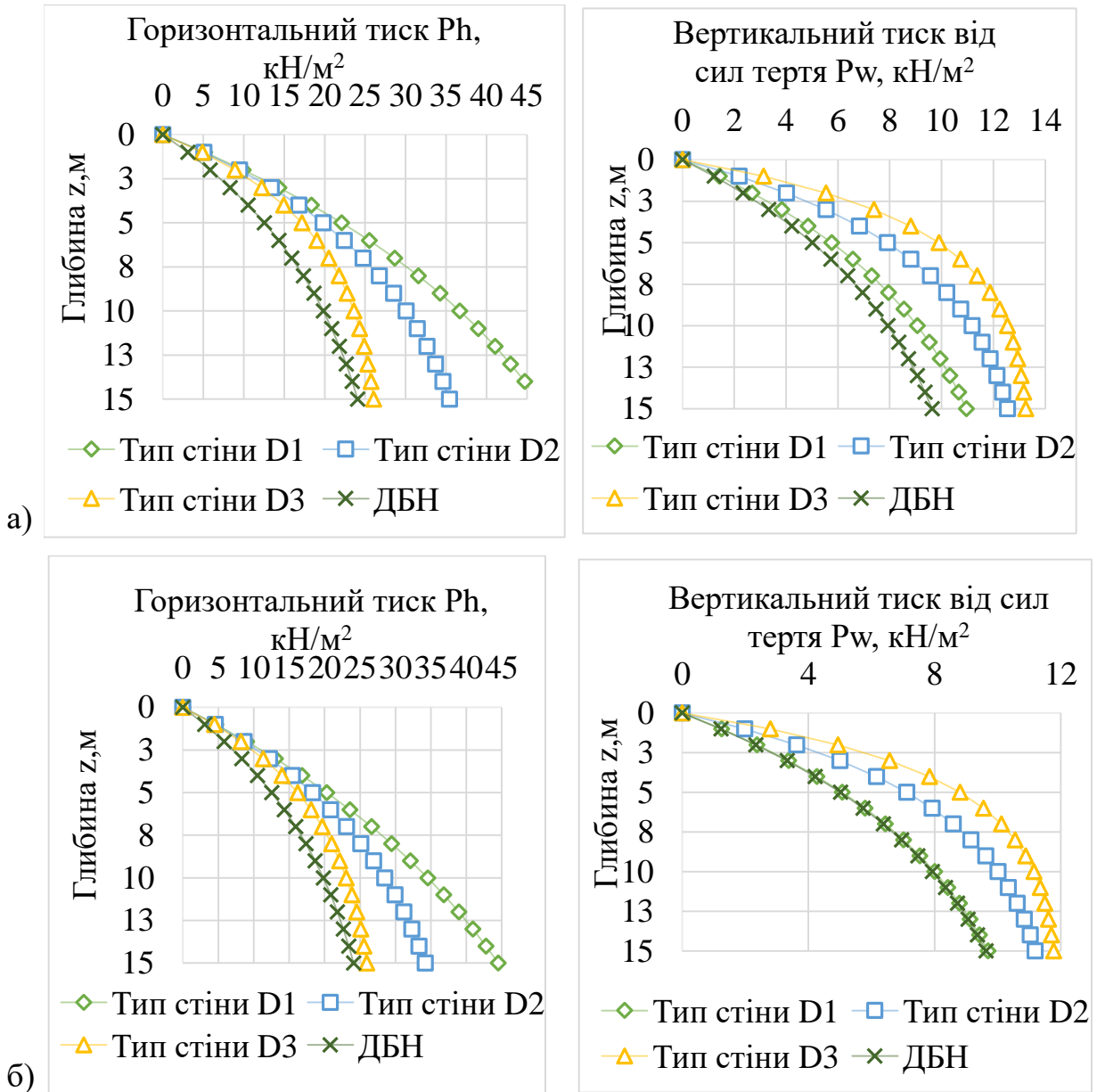


Рис. 3.2. Значення горизонтального та вертикального тисків сипкого матеріалу на стіни гнучкого силосу: а) пшениця; б) кукурудза; в) ячмінь; г) соя. (Примітка: тип стіни вказаний у таблиці 3.4)

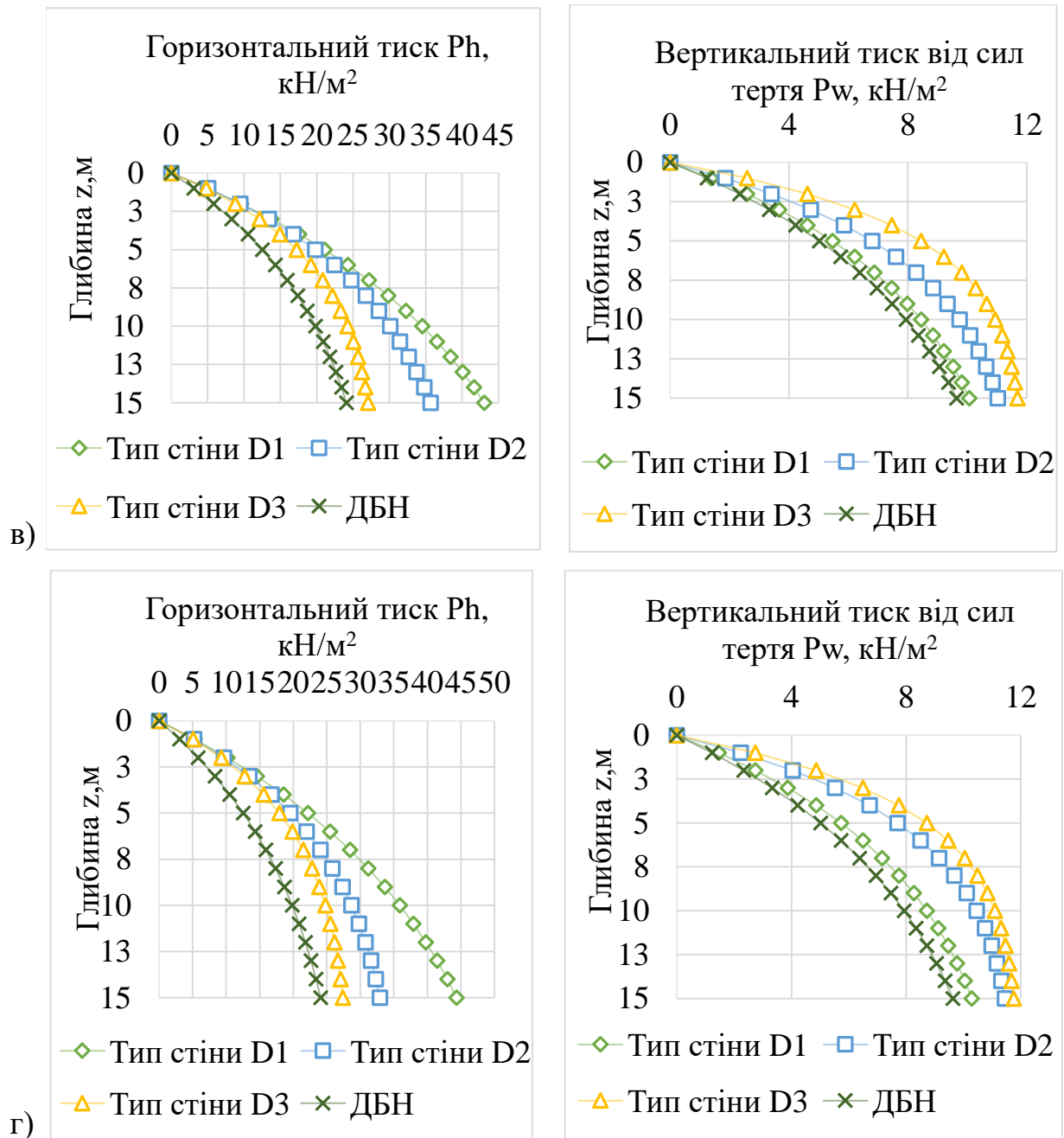


Рис. 3.2. (продовження). Значення горизонтального та вертикального тисків сипкого матеріалу на стіни гнучкого силосу: а) пшениця; б) кукурудза; в) ячмінь; г) соя. (Примітка: тип стіни вказаний у таблиці 3.4)

Для розрахунку використані наступні дані. Геометричні параметри силосу: діаметр 6 м, висота 15 м. Силос такого розміру за ДСТУ класифікується як гнучкий, а отже, розрахунок горизонтальних та вертикальних тисків за обома нормами виконується за однією формулою. Для оцінки впливу характеристик сипучого матеріалу на навантаження, які він викликає в силосній конструкції,

були зроблені розрахунки від дії різних матеріалів, таких як: пшениця, ячмінь, кукурудза та соя.

На рисунку 3.2 можна спостерігати зростання тисків при збільшенні глибини силосу. Значення нормативних горизонтальних тисків на стінку силосу за ДСТУ, при яких враховувався розкид характеристик сипких матеріалів на 27 – 48 % більші ніж при розрахунках за ДБН; нормативних вертикальних тисків від сил тертя – на 1 – 23 %. Варто відзначити, що максимальна різниця значень горизонтального тиску між двома нормами, досягає максимальних відхилень у 48%, при типові стіни D1, яка за ДСТУ характеризується як дуже гладка. Тоді як різниця вертикальних тисків від сил тертя за двома нормами досягає максимальних відхилень у 23% при типові стіни D2, яка за ДСТУ характеризується як гладка. З цього випливає, що значення коефіцієнту тертя об стіни має значний вплив на розрахунок горизонтального тиску. Проаналізувавши отримані графіки, можна стверджувати, що розкид характеристик сипких матеріалів значно впливає на величини горизонтального та вертикального тисків, які виникають у гнучкому силосі.

3.3. Особливості розрахункової схеми спірально-фальцевого силосу

В якості розрахункової схеми всього силосу приймається складова система із коротких оболонок, з'єднаних між собою горизонтальними фальцевими ребрами замкнутого типу (рис. 3.1). Короткі складові оболонки, висотою l , називаються «обичайками».

За рахунок горизонтальних фальцевих ребер поздовжнє зусилля передається з ексцентриситетом на стінку силосу, що призводить до утворення додаткового згинаючого моменту, який у свою чергу викликає деформацію стінки в міжфальцевій зоні (початкову неправильність).

Характерною особливістю спірально-фальцевого силосу є його тонкостінність ($r/t = 1000 \div 4500$), що призводить до необхідності розраховувати стінку на міцність.

Розрахунок стінки силосу слід проводити по деформованій схемі (рис. 3.3), так як застосування наближеної методики в геометрично лінійній постановці не відображає реальної роботи конструкції стінки та не дає запас міцності, оскільки не враховує додаткові згинаючі моменти, викликані геометрично нелінійним характером деформування оболонки силосу. Наявність початкових неправильностей (радіальний прогин міжфальцевої зони) також призводить до зниження несучої здатності стінки, як при розрахунку на стійкість, так і міцність.

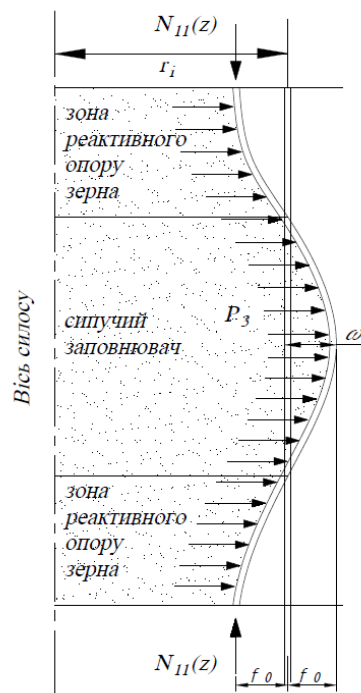


Рис. 3.3. Деформована розрахункова схема силосу при розрахунку на міцність із врахуванням початкового прогину назовні силосу

Розрахунок спірально-фальцевих силосів детально розглянутий у [64]. У [64] прийнята розрахункова схема, яка у випадку заповненого силосу може розглядатись на всі навантаження, вказані в ДБН [101], як у більш простій, так і в уточненій постановці.

Спрощена постановка (рис. 3.4, а) (у сенсі вводу вихідної інформації для ЕОМ) зводиться до розрахунку окремої обичайки в припущенні, що висота ділянки однієї товщини, розрахункове горизонтальне навантаження та повний вертикальний тиск, постійні та дорівнюють їх максимальним значенням. Для нижньої зони максимальні значення прийняті на рівні верху нижньої обичайки.

Більш уточнена постановка (рис. 3.4, б) розрахунку на міцність зводиться до розрахунку всього силосу, як циліндричної оболонки з частим дискретним розміщенням кільцевих ребер фальцевого типу на дії змінного по висоті горизонтального та вертикального навантаження, при цьому в межах кожної обичайки ці навантаження приймаються постійними та рівними: горизонтальне навантаження – максимальному значенню розрахункового навантаження на рівні низу кожної обичайки, поздовжнє зусилля від вертикального навантаження – максимальному значенню зусилля в даній обичайці, яке прикладається до її нижнього краю.

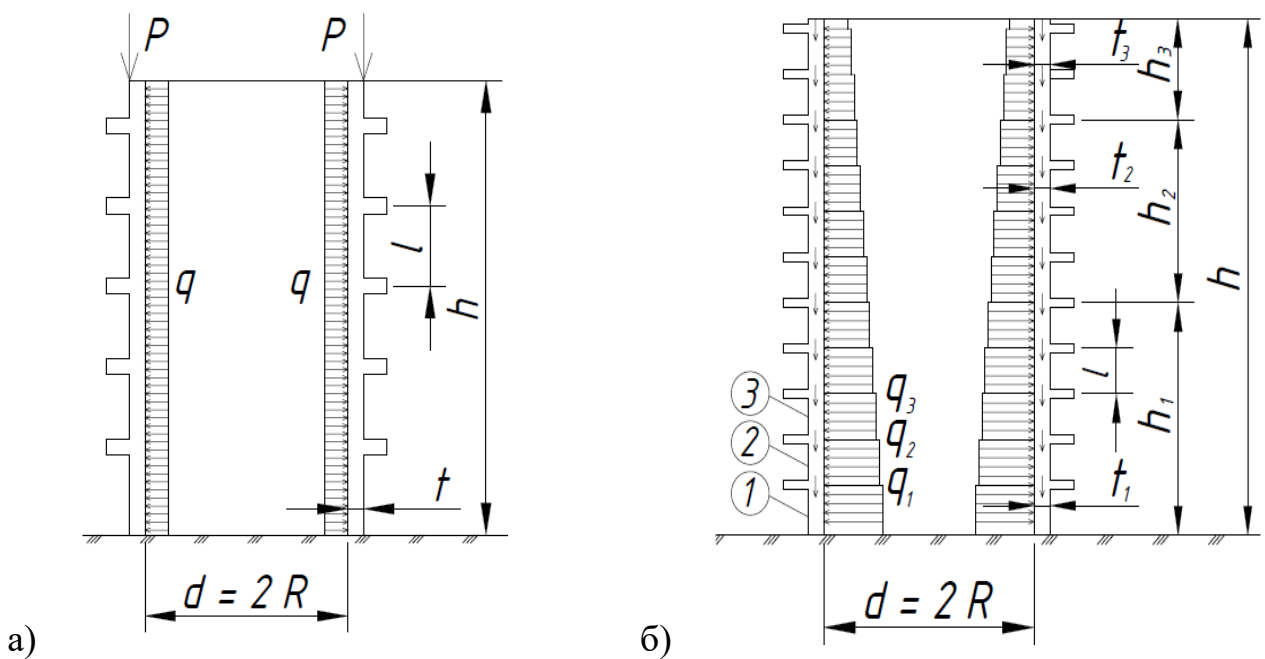


Рис. 3.4. Розрахункові схеми силосу

а) спрощена постановка; б) уточнена постановка

3.4. Алгоритм розрахунку металевого силосу за безмоментною теорією

Розглянемо тонкостінну циліндричну оболонку металевого силосу, утворену обертанням довкола осі z лінії, що описується рівнянням $r=r(z)$, та знаходиться під дією сипучого матеріалу (рис. 3.5). Двома меридіональними та двома кільцевими перерізами, виділимо зі стінки силосу безкінечно малий елемент та розглянемо його рівновагу. На виділений елемент будуть діяти нормальні напруження. У відповідності з безмоментною теорією розрахунку циліндричних оболонок вважається, що напруження σ_i та σ_j по площі граней розподілені рівномірно. По гранях діють сили $N_i = \sigma_i \cdot dS_j \cdot t$ та $N_j = \sigma_j \cdot dS_i \cdot t$. На внутрішню поверхню виділеного елемента діє тиск сипучого матеріалу, котрий дає рівнодійну $P_i \cdot dS_i \cdot t$.

Меридіональні та кільцеві напруження у тонкостінній циліндричній оболонці [102]:

$$\sigma_i = \frac{N_i}{2t_i}; \quad (3.7)$$

$$\sigma_j = \frac{N_j}{t_j}; \quad (3.8)$$

де t_i – товщина стінки;

N_i, N_j – меридіональні та кільцеві зусилля в стінці.

Меридіональні та кільцеві зусилля в стінці силосу:

$$N_i = \frac{\gamma_f}{2\gamma_c} r(\gamma z - P_f^n(z)) + \frac{\gamma_{fm}}{\gamma_c} rP_h^n + N_i^G; \quad (3.9)$$

$$N_j = \frac{\gamma_f}{\gamma_c} rP_h^n(z)(1 + a_1) + \frac{\gamma_{fm}}{\gamma_c} rP_t^n. \quad (3.10)$$

N_i^G – поздовжнє зусилля в стінці від ваги покрівлі, обладнання та снігу;

P_f^n, P_h^n – нормативні вертикальний та горизонтальний тиск сипучого матеріалу на стінку, визначаються за формулами (3.1) та (3.4).

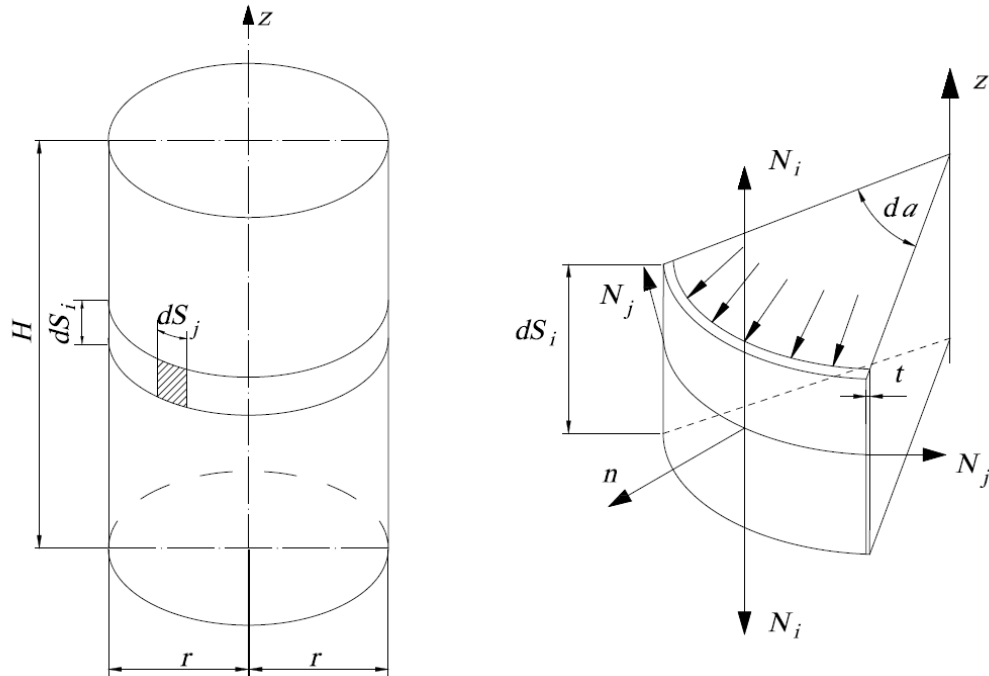


Рис. 3.5. До розрахунку металевого силосу

P_{ht}^n – нормальний тиск від додаткового горизонтального тиску зерна на стінку силосу, що враховує перепад температури визначається за формулою (3.6) або за формулою:

$$P_{ht}^n = K_{t1} P_h^n, \quad (3.11)$$

де K_{t1} – коефіцієнт [101], що приймається рівним:

- 0,40 - для сталевих стін силосів;
- 0,20-для монолітних залізобетонних;
- 0,15 - для збірних залізобетонних при товщині стін менше 15 см і 0,10 - при їх товщині 15 см і більше.

γ_f, γ_{fm} – коефіцієнти надійності за навантаженнями;

γ_c – коефіцієнт умов роботи, який приймається 1,0.

Перевірка загальної міцності стінки, яка знаходиться у безмоментному напруженому стані, згідно 14.1 [102] виконується за формулою:

$$\frac{\gamma_m}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_i^2 - \sigma_i \sigma_j + \sigma_j^2 + 3\tau^2} \leq 1, \quad (3.12)$$

де τ – дотичні напруження у точці стінки оболонки, яка розглядається;

R_y – розрахунковий опір сталі за границею текучості.

У роботі розглядається осесиметрична задача, тому дотичні напруження відсутні, формула (3.12) приймає вигляд:

$$\frac{\gamma_m}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_i^2 - \sigma_i \sigma_j + \sigma_j^2} \leq 1. \quad (3.13)$$

На міцність перевіряється найбільш напружена обичайка в залежності від товщини стінки.

3.5. Напружено-деформований стан металевого спіральньо-фальцевого силосу

Приймаємо силос як систему, яка складається із коротких оболонок (обичайок) (рис. 3.6) та розглянемо напружено-деформований стан обичайки, яка має по краях пружні шпангоути.

При побудові розрахункової моделі використані рівняння позовжньо-поперечного згину відносно радіальних переміщень для симетрично навантаженої оболонки. В якості визначальних параметрів прийняті: $P(x)$, $P_1(x)$ – відповідно горизонтальний та вертикальний тиск сипучого матеріалу, $N_1(x)$ – позовжні зусилля від вертикального тиску сипучого матеріалу $P_1(x)$, ваги стінки

N_{01} та конструкцій покриття N_0 , $\omega(x)$ – прогин (радіальне переміщення) в обичайці, $M(x)$ – поздовжній згинаючий момент в обичайці, $\sigma^u(x), \sigma^k(x)$ – відповідно поздовжні та кільцеві напруження.

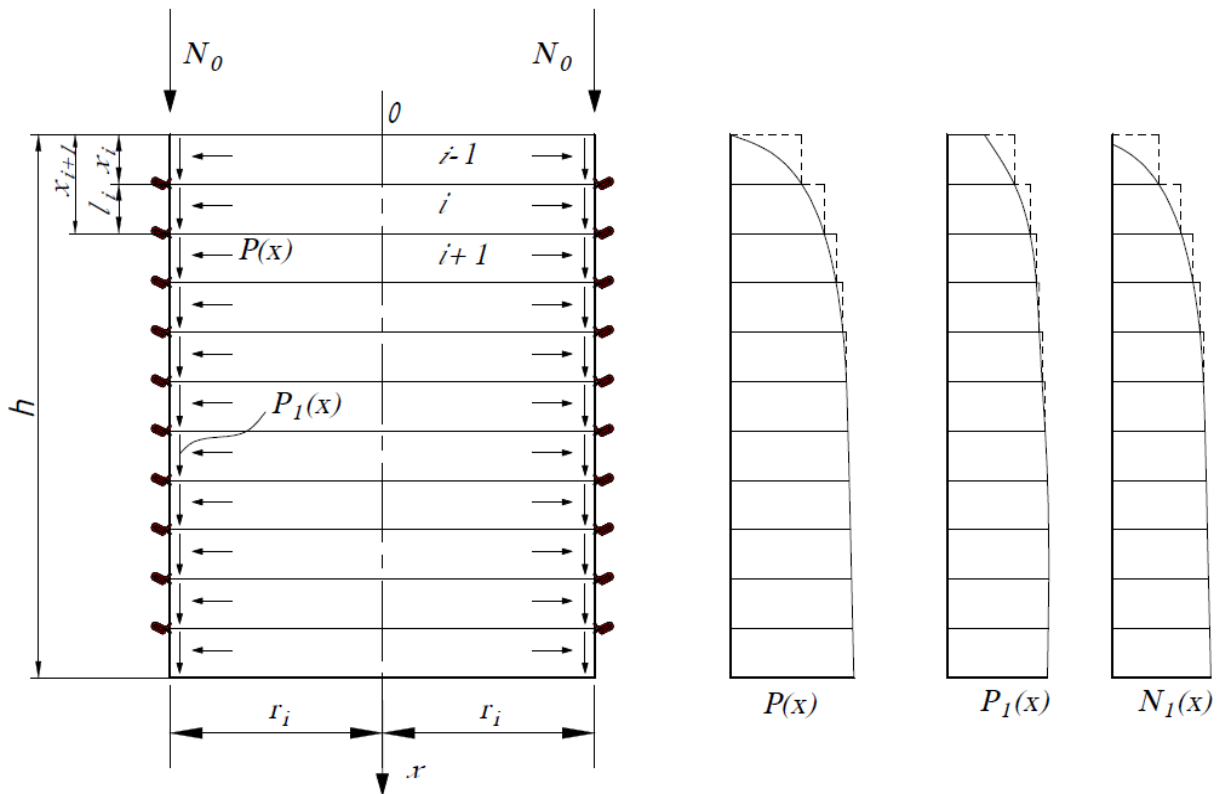


Рис. 3.6. Схема навантаження оболонки силосу

Відповідно горизонтальний та вертикальний тиск зерна визначаються виразами (3.1) та (3.4):

$$P(x) = P_h^n = \frac{\gamma \rho}{f} [1 - \exp(-\lambda f x / \rho)],$$

$$P_1(x) = P_f^n = f P_h^n.$$

Відповідно до ДБН В2.2-8-98 [101] поздовжні зусилля $N_1(x)$ від вертикального тиску сипучого матеріалу на днище силосу $P_v^n(x)$, ваги стінки N_{01} та конструкцій покриття N_0 визначаються за формулою:

$$N_1(x) = \rho(\gamma x - P_v^n) + N_{01}(x) + N_0, \quad (3.14)$$

$$N_{01}(x) = \gamma_s trz, \quad (3.15)$$

де γ_s – питома вага металу оболонки.

Розглядаємо рівняння рівноваги поздовжньо-поперечного згину відносно радіальних переміщень для симетрично навантаженої циліндричної оболонки, яке має вигляд:

$$\omega^{IV}(x) + 4\beta^4 \omega(x) = P(x) + \frac{\nu N_1(x)}{r} - e \cdot \frac{dP_1(x)}{dx}, \quad (3.16)$$

$$\text{де } 4\beta = \frac{Et}{Dr^2}, \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 t^2}}$$

$$D - \text{циліндрична жорсткість, } D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)},$$

E – модуль пружності матеріалу оболонки,

ν – коефіцієнт Пуассона,

t – товщина стінки,

r – радіус силосу.

Оскільки інтегрування зручніше проводити на основі відношень, записаних у безрозмірному вигляді, приведемо рівняння рівноваги симетрично навантаженої циліндричної оболонки (3.16) до безрозмірної координати $\xi = \beta x$.

$$\omega^{IV}(\xi) + 4\omega(\xi) = \frac{1}{\beta^4 D} \Phi(x) \quad (3.17)$$

де $\Phi(x)$ – функція навантажень, $\Phi(x) = P(x) + \frac{\nu N_1(x)}{r} - e \cdot \frac{dP_1(x)}{dx}$,

e – відстань від лінії прикладання дотичних зусиль до середньої поверхні оболонки.

Рішення диференційного рівняння поздовжньо-поперечного згину обичайки (3.17) записується у вигляді:

$$\omega(\xi) = C_1 V_1(\xi_i) + C_2 V_2(\xi_i) + C_3 V_3(\xi_i) + C_4 V_4(\xi_i) + \frac{1}{4\beta^4 D_0} \int_0^\xi V_4(\xi_i - \xi_{ii}) \Phi(\xi_{ii}) d\xi_{ii}, \quad (3.18)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4 – постійні інтегрування;

$V_1(\xi_i), V_2(\xi_i), V_3(\xi_i), V_4(\xi_i)$ – фундаментальні функції Крилова О.М. [92]

Функції Крилова визначаються наступними виразами:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1(\xi) = ch\xi \cos \xi; \\ V_2(\xi) = \frac{1}{2} [ch\xi \sin \xi + sh\xi \cos \xi]; \\ V_3(\xi) = \frac{1}{2} sh\xi \sin \xi; \\ V_4(\xi) = \frac{1}{4} [ch\xi \sin \xi - sh\xi \cos \xi]. \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Функції Крилова V_1, V_2, V_3, V_4 мають наступні властивості. По-перше, вони зв'язані між собою простими диференційними відношеннями :

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}V_1(\xi) = -4\beta V_4(\xi); \\ \frac{d}{dx}V_2(\xi) = \beta V_1(\xi); \\ \frac{d}{dx}V_3(\xi) = \beta V_2(\xi); \\ \frac{d}{dx}V_4(\xi) = \beta V_3(\xi). \end{cases} \quad (3.20)$$

По-друге, при значенні аргументу, рівному нулю, всі вирази дорівнюють нулю, окрім функції $V_1(0) = 1$.

Розглянемо напружено-деформований стан обичайки, на яку діють зусилля опору пружних фальцевих ребер, при сумісній дії навантажень від сипучого матеріалу:

- горизонтального тиску $P(x)$ та вертикального тиску $P_1(x)$;
- постійного поздовжнього зусилля стиску N_0 , яке являє собою вертикальне навантаження від надсилосних конструкцій;
- змінного зусилля стиску $N_{01}(x)$ від власної ваги стінки;
- ексцентричного прикладення дотичних зусиль відносно серединної поверхні.

Для спрощення задачі приймаються наступні допущення:

- шпангоути розміщені горизонтально;
- оболонка силосу складається із обичайок, які обмежені шпангоутами;
- у межах обичайки $P = const$, $N_{01} = const$;
- шпангоути пружні і розтягуються у радіальному напрямку ω_0 .

$$\omega_0 = \frac{T_r^2}{EA}$$

де T_r – реактивна поздовжня сила,

A – площа поперечного перерізу шпангоута (фальцевого ребра).

По кінцям обичайки довжиною l_i діють поперечні сили $Q_{l,i}$ та $Q_{l,i+1}$, рівні половині відповідних реактивних тисків шпангоутів на тонкостінну оболонку при її деформації під дією внутрішнього тиску сипучого матеріалу, крайові моменти $M_{l,i}$ та $M_{l,i+1}$, котрі замінюють дію відсічених частин оболонки та осьові зусилля $N_{l,i}$ та $N_{l,i+1}$ від дії вертикальних навантажень (рис. 3.7)

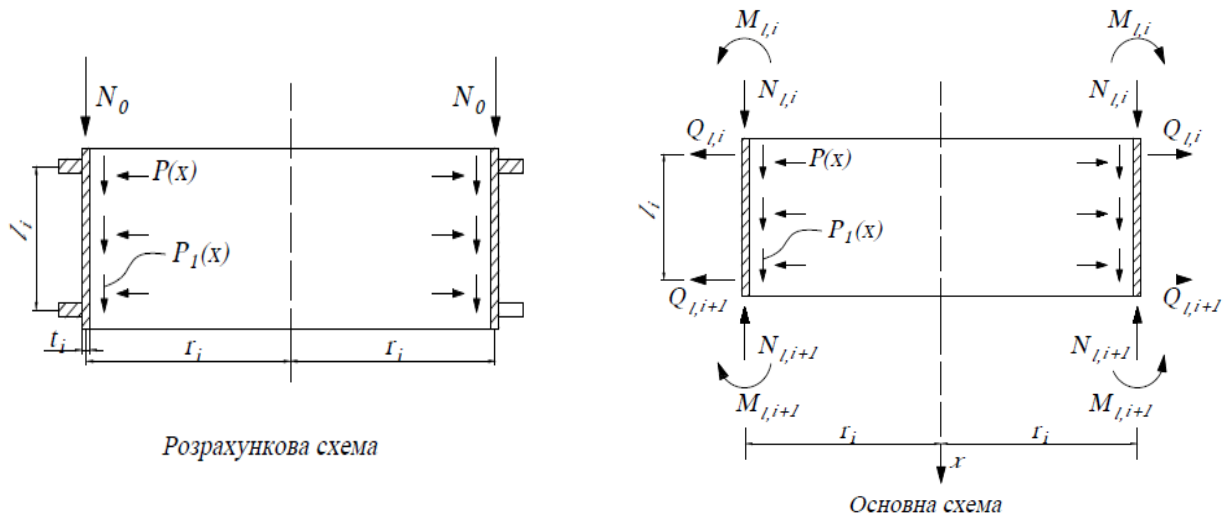


Рис. 3.7. Схема навантаження обичайки металевого спірально-фальцевого силосу

Рішення задачі відбувається для кожної обичайки. Перенесемо початок декартової системи координат (x_i, r) на межу двох обичайок, вісь x направимо вниз. Координата x_i змінюється в області $x_i[0, l_i]$, де l_i - крок фальцевих ребер.

Інтегруючи вираз (3.18) для прийнятої схеми завантаження i -ї обичайки, отримуємо [108]:

$$\begin{aligned} \omega(\xi) = & C_1 V_1(\xi_i) + C_2 V_2(\xi_i) + C_3 V_3(\xi_i) + C_4 V_4(\xi_i) + \\ & + \frac{1}{4\beta^4 D} \left(P + \frac{\nu N_1}{r} - e P_1 \right) [1 - V_1(\xi_i)] \end{aligned} \quad (3.21)$$

Шляхом послідовного диференціювання виразу (3.21) отримаємо:

$$\begin{aligned} \omega'(\xi) = & -4\beta C_1 V_4(\xi_i) + \beta C_2 V_1(\xi_i) + \beta C_3 V_2(\xi_i) + \beta C_4 V_3(\xi_i) + \\ & + \frac{1}{\beta^3 D} (P + \frac{\nu N_1}{r} - eP_1) V_4(\xi_i) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \omega''(\xi) = & -4\beta^2 C_1 V_3(\xi_i) - 4\beta^2 C_2 V_4(\xi_i) + \beta^2 C_3 V_1(\xi_i) + \beta^2 C_4 V_2(\xi_i) + \\ & + \frac{1}{\beta^2 D} (P + \frac{\nu N_1}{r} - eP_1) V_3(\xi_i) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \omega'''(\xi) = & -4\beta^3 C_1 V_2(\xi_i) - 4\beta^3 C_2 V_3(\xi_i) - 4\beta^3 C_3 V_4(\xi_i) + \beta^3 C_4 V_1(\xi_i) + \\ & + \frac{1}{\beta D} (P + \frac{\nu N_1}{r} - eP_1) V_2(\xi_i) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Для того, щоб рішення (3.21 – 3.24) застосувати для силосу, який складається із ряду обичайок, для кожної обичайки приймаємо свою локальну систему відліку координати ξ_i та зводимо розрахунок для кожної обичайки умовами неперервності на межі $\xi_i = \beta l_i (x_i - l_i)$ двох обичайок. При цьому серединну поверхню обичайки відносимо до ортогональної системи координат (x,y,z).

Для визначення постійних інтегрування C_1, C_2, C_3, C_4 використовуємо наступні граничні умови. Під дією рівномірно розподіленого по перерізу навантаження краї i -ї обичайки зазнають згин [82, 108].

При $\xi_i = \tilde{\xi} = 0$, ($\xi_i = \tilde{\xi} = \beta l_1$) у силу симетрії:

$$\omega'''(\tilde{\xi}) = \frac{Q(\tilde{\xi})}{D} = -\frac{T}{2}; \quad (3.25)$$

$$\omega'(\tilde{\xi}) = \varphi(\tilde{\xi}) = 0. \quad (3.26)$$

При $\xi_i = \bar{\xi} = \beta l_1 / 2$:

$$\omega'(\bar{\xi}) = \varphi(\bar{\xi}) = 0. \quad (3.27)$$

$$\omega'''(\bar{\xi}) = \frac{Q(\bar{\xi})}{D} = 0. \quad (3.28)$$

З вказаних умов (приймавши $\xi_i = \bar{\xi}$) отримуємо:

$$C_1 = \frac{T_r^2}{EA}; \quad (3.29)$$

$$C_2 = 0; \quad (3.30)$$

$$C_3 = \frac{\Phi}{2\beta^3 D} \cdot \frac{V_3(\bar{\xi})V_2(\bar{\xi}) - V_1(\bar{\xi})V_4(\bar{\xi})}{\frac{t}{A}[V_2(\bar{\xi}) - 4V_4^2(\bar{\xi})] + \frac{\beta}{2}[V_1(\bar{\xi})V_2(\bar{\xi}) + 4V_3(\bar{\xi})V_4(\bar{\xi})]}; \quad (3.31)$$

$$C_4 = \frac{\Phi}{2\beta^3 D} \cdot \frac{V_2^2(\bar{\xi}) + 4V_4^2(\bar{\xi})}{\frac{t}{A}[V_2(\bar{\xi}) + 4V_4^2(\bar{\xi})] + \frac{\beta}{2}[V_1(\bar{\xi})V_2(\bar{\xi}) + 4V_3(\bar{\xi})V_4(\bar{\xi})]}; \quad (3.32)$$

Враховуючи, що

$$T = 2\beta^3 DC_4, \quad (3.33)$$

Знайдемо силу взаємодії між фальцевим ребром та краєм обичайки, підставив (3.32) в (3.33).

$$T = \frac{\Phi[V_2^2(\bar{\xi}) + 4V_4^2(\bar{\xi})]}{\frac{t}{A}[V_2(\bar{\xi}) + 4V_4^2(\bar{\xi})] + \frac{\beta}{2}[V_1(\bar{\xi})V_2(\bar{\xi}) + 4V_3(\bar{\xi})V_4(\bar{\xi})]}; \quad (3.34)$$

Підставивши (3.34) в (3.29):

$$C_1 = \frac{\Phi r^2}{EA} \frac{V_2^2(\bar{\xi}) + 4V_4^2(\bar{\xi})}{\frac{t}{A}[V_2(\bar{\xi}) + 4V_4^2(\bar{\xi})] + \frac{\beta}{2}[V_1(\bar{\xi})V_2(\bar{\xi}) + 4V_3(\bar{\xi})V_4(\bar{\xi})]}; \quad (3.35)$$

Підставимо $C_1, C_3, C_4 (C_2 = 0)$ у вирази (3.21) – (3.24) та знайдемо вирази для визначення прогинів та зусиль у будь-якому перерізі i -ї обичайки, при цьому приймаємо $\xi_i = \xi$.

$$\omega(\xi) = \frac{P + \nu N_1 / r - eP_1}{2\beta^3 D \alpha(\bar{\xi})} \cdot \left[\frac{r^2}{EA} 2\beta^2 D n_2(\bar{\xi}) V_1(\xi) + n_1(\bar{\xi}) V_3(\xi) + \right. \\ \left. + n_2(\bar{\xi}) V_4(\xi) + \frac{1}{2\beta} \alpha(\bar{\xi}) V_1(\xi) \right] ; \quad (3.36)$$

$$M(\xi) = \frac{P + \nu N_1 / r - eP_1}{2\beta \alpha(\bar{\xi})} \cdot \left[-\frac{r^2}{EA} 8\beta^3 D n_2(\bar{\xi}) V_3(\xi) + n_1(\bar{\xi}) V_1(\xi) + \right. \\ \left. + n_2(\bar{\xi}) V_2(\xi) + \frac{2}{\beta} \alpha(\bar{\xi}) V_3(\xi) \right] ; \quad (3.37)$$

$$Q(\xi) = \frac{P + \nu N_1 / r - eP_1}{2\alpha(\bar{\xi})} \cdot \left[-\frac{r^2}{EA} 8\beta^3 D n_2(\bar{\xi}) V_2(\xi) - n_1(\bar{\xi}) V_4(\xi) + \right. \\ \left. + n_2(\bar{\xi}) V_1(\xi) + \frac{2}{\beta} \alpha(\bar{\xi}) V_2(\xi) \right] , \quad (3.38)$$

$$\text{де } \alpha(\bar{\xi}) = \frac{t}{A} n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2} n_3(\bar{\xi}) ,$$

$$n_1(\bar{\xi}) = V_2(\bar{\xi}) \cdot V_3(\bar{\xi}) - V_1(\bar{\xi}) \cdot V_4(\bar{\xi}) ,$$

$$n_2(\bar{\xi}) = V_2^2(\bar{\xi}) + 4V_4^2(\bar{\xi}) ,$$

$$n_3(\bar{\xi}) = V_1(\bar{\xi}) \cdot V_2(\bar{\xi}) + 4V_3(\bar{\xi}) \cdot V_4(\bar{\xi}) ,$$

$$\xi = \beta x , \quad \bar{\xi} = \beta l_1 / 2$$

Прогин та поздовжній згинаючий момент у характерних перерізах i -ї обичайки – по краях та в середині:

а) при $\xi = \bar{\xi} = 0$ ($\xi = \bar{\xi} = \beta l_1$) – на контурі обичайки.

$$\omega(\tilde{\xi}) = \frac{(P + \nu N_1 / r - eP_1)r^2}{EA} \cdot \frac{n_2(\bar{\xi})}{\frac{t}{A}n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2}n_3(\bar{\xi})}; \quad (3.39)$$

$$M(\tilde{\xi}) = \frac{(P + \nu N_1 / r - eP_1)r^2}{2\beta} \cdot \frac{n_1(\bar{\xi})}{\frac{t}{A}n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2}n_3(\bar{\xi})}; \quad (3.40)$$

б) при $\xi = \bar{\xi} = \beta l_1 / 2$ – у середині обичайки:

$$\omega(\bar{\xi}) = \frac{(P + \nu N_1 / r - eP_1)r^2}{Et} \cdot \left[1 + \frac{2\beta n_5(\bar{\xi})}{\frac{t}{A}n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2}n_3(\bar{\xi})} \right]; \quad (3.41)$$

$$M(\bar{\xi}) = -\frac{(P + \nu N_1 / r - eP_1)r^2}{2\beta} \cdot \frac{n_4(\bar{\xi})}{\frac{t}{A}n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2}n_3(\bar{\xi})}, \quad (3.42)$$

де $n_4(\bar{\xi}) = V_2(\bar{\xi})n_2(\bar{\xi}) - V_1(\bar{\xi})n_1(\bar{\xi}) - V_3(\bar{\xi})n_3(\bar{\xi})$;

$n_5(\bar{\xi}) = n_1(\bar{\xi})V_3(\bar{\xi}) - n_2(\bar{\xi})V_4(\bar{\xi}) - \frac{1}{4}n_3(\bar{\xi})V_1(\bar{\xi})$

Розрахувавши прогин та згинаючий момент у характерних перерізах i -ї обичайки (3.39-3.42), знаходимо кільцеві зусилля – по краях та в середині:

$$N_s(\tilde{\xi}) = \frac{Et}{r} \omega(\tilde{\xi}) - \nu N_1; \quad (3.43)$$

$$N_s(\bar{\xi}) = \frac{Et}{r} \omega(\bar{\xi}) - \nu N_1. \quad (3.44)$$

Знаходимо фіброві поздовжні та кільцеві напруження $\sigma^u(\tilde{\xi}), \sigma^k(\tilde{\xi})$ на краю та в середині обичайки:

а) при $\xi = \tilde{\xi} = 0$ ($\xi = \tilde{\xi} = \beta l_1$) – на контурі обичайки:

$$\sigma^u(\tilde{\xi}) = \frac{N_1}{t} \pm \frac{M(\tilde{\xi})}{W}; \quad (3.45)$$

де $W = \frac{t^2}{6}$;

$$\sigma^k(\tilde{\xi}) = \frac{N_s(\tilde{\xi})}{t}; \quad (3.46)$$

б) при $\xi = \bar{\xi} = \beta l_1 / 2$ – у середині обичайки:

$$\sigma^u(\bar{\xi}) = \frac{N_1}{t} \pm \frac{M(\bar{\xi})}{W}; \quad (3.47)$$

$$\sigma^k(\bar{\xi}) = \frac{N_s(\bar{\xi})}{t}. \quad (3.48)$$

По максимальним значенням напружень перевіряємо інтенсивність фібрових напружень:

$$\frac{\gamma_m}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_u^2(\xi) - \sigma_u(\xi)\sigma_k(\xi) + \sigma_k^2(\xi)} \leq 1. \quad (3.49)$$

Розглянуто напружено-деформований стан проміжної ділянки (між фальцевими ребрами) оболонки з постійною товщиною стінки. Ділянка пружно з'єднана з сусідніми обичайками та зазнає напружено-деформований стан типу поздовжньо-поперечного згину.

3.6. Порівняння теоретичних розрахунків з розрахунками методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛПРА - САПР

Розглянемо напружено-деформований стан стінки металевого спіральньо-фальцевого силосу, який має наступні параметри: радіус – 4 м, висота циліндричної частини – 20 м, крок кільцевих ребер 0,365 м, площа фальцевого ребра для штрипса товщиною 3 мм $A=5,09 \text{ см}^2$, матеріал корпусу – сталь С235,

$R_y(x) = 235 \text{ МПа}$ модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, нижні 16 ярусів стінки прийняті товщиною $t = 3 \text{ мм}$, верхні 38 ярусів стінки прийняті товщиною $t = 2 \text{ мм}$. Сталевий силос призначений для постійного зберігання сухого зерна з характеристиками: $\gamma = 8 \text{ кН/м}^3$, $\lambda = 0,406$, $\varphi = 25^\circ$, $\mu = 0,4$. Використовуючи формули (3.3, 3.4 та 3.14), знаходимо навантаження від зерна в нижньому ярусі: $P(x) = 9,19 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}$, $P_1(x) = 1,28 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}$, $N_1(x) = 1718,7 \frac{\text{Н}}{\text{см}}$.

Прогини на контурі обичайки та всередині визначаються за формулами (3.39), (3.41):

$$\omega(\tilde{\xi}) = \frac{(P + \nu N_1 / r - e P_1) r^2}{EA} \cdot \frac{n_2(\tilde{\xi})}{\frac{t}{A} n_2(\tilde{\xi}) + \frac{\beta}{2} n_3(\tilde{\xi})};$$

$$\omega(\xi) = \frac{(P + \nu N_1 / r - e_p P_1) r^2}{Et} \cdot \left[1 + \frac{2\beta n_5(\xi)}{\frac{t}{A} n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)} \right].$$

Складова $e_p \tilde{P}$ враховує початкові нерівності оболонки та має невелике значення, вважаємо його незначним та не враховуємо в розрахунках.

Параметр оболонки визначається за формулою:

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 t^2}} = 4 \sqrt{\frac{3(1-0,3^2)}{400^2 \cdot 0,3^2}} = 0,117 \frac{1}{\text{см}}.$$

Функції Кривола визначаються за формулами (3.19), на контурі обичайки дорівнюють:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1(\xi) = ch\xi \cos \xi = ch(4,28) \cos(4,28) = -15,086; \\ V_2(\xi) = \frac{1}{2} [ch\xi \sin \xi + sh\xi \cos \xi] = \\ = \frac{1}{2} [ch(4,28) \sin(4,28) + sh(4,28) \cos(4,28)] = -24,012; \\ V_3(\xi) = \frac{1}{2} sh\xi \sin \xi = \frac{1}{2} sh(4,28) \sin(4,28) = -16,47; \\ V_4(\xi) = \frac{1}{4} [ch\xi \sin \xi - sh\xi \cos \xi] = \\ = \frac{1}{4} [ch(4,28) \sin(4,28) - sh(4,28) \cos(4,28)] = -4,47 \end{array} \right.$$

Значення $n_1(\xi) - n_5(\xi)$ на контурі обичайки дорівнюють:

$$n_1(\xi) = V_2(\xi) \cdot V_3(\xi) - V_1(\xi) \cdot V_4(\xi) = -24,012 \cdot (-16,466) - (-15,086) \cdot (-4,466) = 328,$$

$$n_2(\xi) = V_2^2(\xi) + 4V_4^2(\xi) = (-24,012)^2 + 4 \cdot (-4,466)^2 = 656,36,$$

$$n_3(\xi) = V_1(\xi) \cdot V_2(\xi) + 4V_3(\xi) \cdot V_4(\xi) = (-15,086) \cdot (-24,012) + 4 \cdot (-16,466) \cdot (-4,466) = 656,38,$$

$$n_4(\xi) = V_2(\xi)n_2(\xi) - V_1(\xi)n_1(\xi) - V_3(\xi)n_3(\xi) = -24,012 \cdot 656,36 - (-15,086) \cdot 328 - (-16,466) \cdot 656,383 = -4,466,$$

$$n_5(\xi) = n_1(\xi)V_3(\xi) - n_2(\xi)V_4(\xi) - \frac{1}{4}n_3(\xi)V_1(\xi) = 328 \cdot (-16,466) - 656,36 \cdot (-4,466) - \frac{1}{4} \cdot 656,36 \cdot (-15,086) = 6,003$$

У середині обичайки функції Кривола дорівнюють:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1(\xi) = ch\xi \cos \xi = ch(2,14) \cos(2,14) = -2,331; \\ V_2(\xi) = \frac{1}{2} [ch\xi \sin \xi + sh\xi \cos \xi] = \\ = \frac{1}{2} [ch(2,14) \sin(2,14) + sh(2,14) \cos(2,14)] = 0,682; \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} V_3(\xi) = \frac{1}{2} sh \xi \sin \xi = \frac{1}{2} sh(2,14) \sin(2,14) = 1,766; \\ V_4(\xi) = \frac{1}{4} [ch \xi \sin \xi - sh \xi \cos \xi] = \\ = \frac{1}{4} [ch(2,14) \sin(2,14) - sh(2,14) \cos(2,14)] = 1,475. \end{cases}$$

Значення $n_1(\xi) - n_5(\xi)$ всередині обичайки дорівнюють:

$$n_1(\xi) = V_2(\xi) \cdot V_3(\xi) - V_1(\xi) \cdot V_4(\xi) = 0,682 \cdot 1,766 - (-2,331) \cdot 1,475 = 4,641,$$

$$n_2(\xi) = V_2^2(\xi) + 4V_4^2(\xi) = 0,682^2 + 4 \cdot 1,475^2 = 9,163,$$

$$n_3(\xi) = V_1(\xi) \cdot V_2(\xi) + 4V_3(\xi) \cdot V_4(\xi) = (-2,331) \cdot 0,682 + 4 \cdot 1,766 \cdot 1,475 = 8,828,$$

$$n_4(\xi) = V_2(\xi)n_2(\xi) - V_1(\xi)n_1(\xi) - V_3(\xi)n_3(\xi) = 0,682 \cdot 9,163 - (-2,331) \cdot 4,641 - \\ - 1,766 \cdot 8,828 = 1,475,$$

$$n_5(\xi) = n_1(\xi)V_3(\xi) - n_2(\xi)V_4(\xi) - \frac{1}{4}n_3(\xi)V_1(\xi) = 4,641 \cdot 1,766 - 9,163 \cdot 1,475 - \\ - \frac{1}{4} \cdot 8,282 \cdot (-2,331) = -0,17$$

Прогини на контурі обичайки та всередині визначаються за формулами (3.39), (3.41):

$$\begin{aligned} \omega(\bar{\xi}) &= \frac{(P + \nu N_1 / r - e P_1) r^2}{EA} \cdot \frac{n_2(\bar{\xi})}{\frac{t}{A} n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2} n_3(\bar{\xi})} = \\ &= \frac{(9,19 + 0,3(-1718,7)/400) \cdot 400^2}{2,1 \cdot 10^7 \cdot 5,09} \cdot \frac{656,357}{\frac{0,3}{5,09} \cdot 656,357 + \frac{0,117}{2} \cdot 656,383} = 0,1 \text{ см} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega(\xi) &= \frac{(P + \nu N_1 / r - e_p P_1) r^2}{Et} \cdot \left[1 + \frac{2\beta n_5(\xi)}{\frac{t}{A} n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)} \right] = \\ &= \frac{(9,19 + 0,3(-1718,7)/400) \cdot 400^2}{2,1 \cdot 10^7 \cdot 5,09} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot 0,117 \cdot (-0,17)}{\frac{0,3}{5,09} \cdot 9,163 + \frac{0,117}{2} \cdot 8,828} \right] = 0,193 \text{ см} \end{aligned}$$

Відповідно до наведених вище розрахунків, отримуємо: на контурі обичайки – $\omega(\tilde{\xi}) = 1\text{мм}$; всередині обичайки – $\omega(\bar{\xi}) = 1,93\text{мм}$. Графік прогинів в обичайці наведено на рис. 3.8

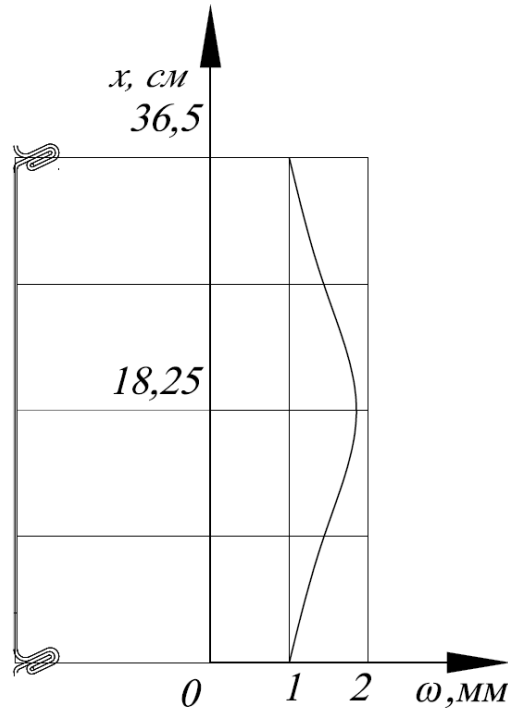


Рис. 3.8. Графік прогинів обичайки

Для порівняння розрахунків у програмному комплексі ЛІРА-САПР було змодельовано силосну конструкцію відповідних розмірів та з відповідними навантаженнями.

Скінченно-елементна розрахункова модель силосу (рис. 3.10) розроблена в лінійній постановці. До розрахункової моделі сталевих конструкцій каркасу силосу включені:

- стінка силосу;
- горизонтальні ребра жорсткості стінки силосу;
- стержневий купольний каркас покриття.

Стінка силосу змодельована плоскими оболонковими СЕ типу 44 «чотирикутний елемент оболонки», які встановлені у вертикальній площині. Фальцеве ребро змодельоване СЕ типу 5 «просторовий стрижень».

Загальний вигляд моделі наведений на рисунку 3.9. Яруси стінки між кільцевими ребрами змодельовані оболонковими SE різної товщини з модулем пружності сталі, що відповідає марці сталі С 235.

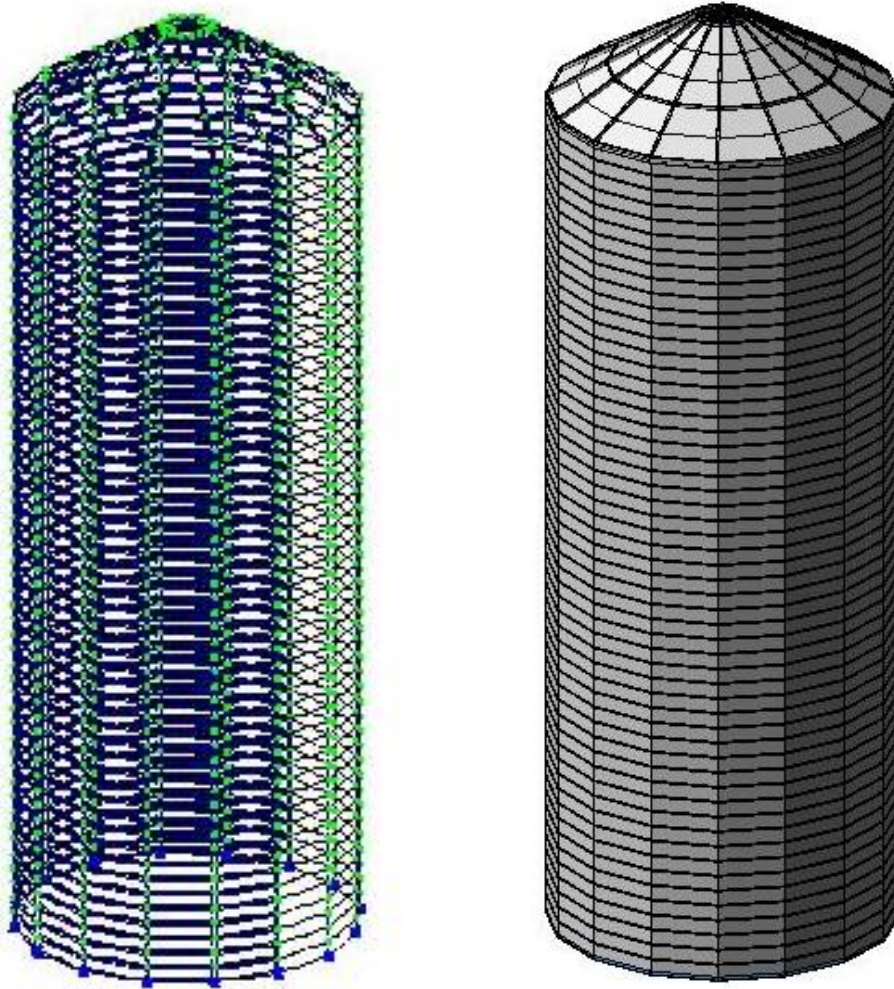


Рис. 3.9. Загальний вигляд розрахункової моделі силосу

За результатами розрахунку в програмному комплексі ЛІРА-САПР отримуємо ізополя напружень оболонки по N_x та N_y від заданої комбінації навантажень (рис. 3.10 – 3.11). На рисунках ізополів напружень у SE моделі максимальні і мінімальні чисельні величини наведені у вигляді розмірно-колірної шкали, що розташована зліва кожного рисунку у одиниці виміру kH/cm^2 .

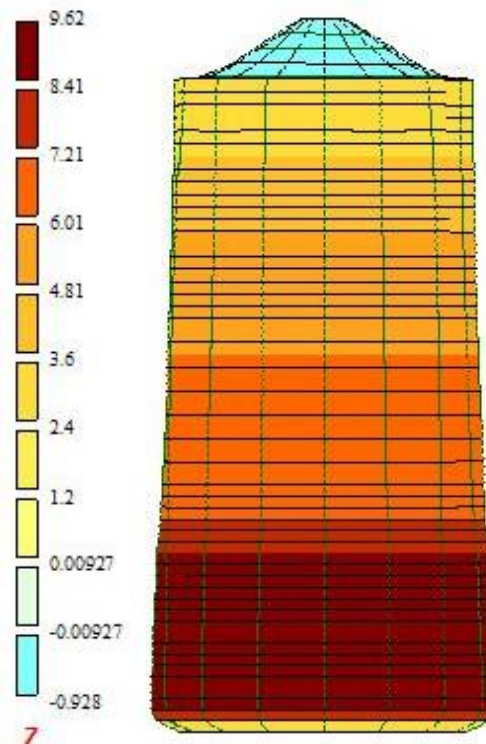


Рис. 3.10. Ізополя напружень по N_x від комбінації навантажень

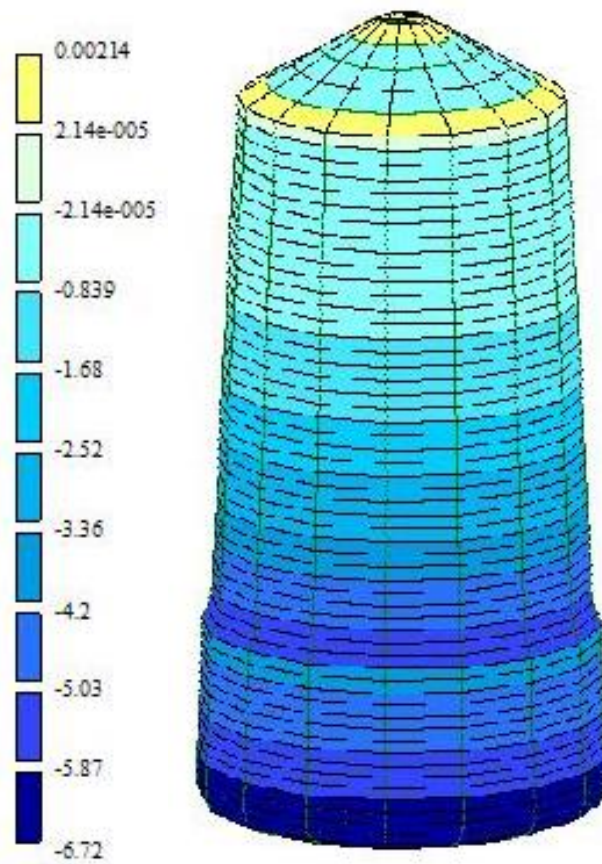


Рис. 3.11. Ізополя напружень по N_y від комбінації навантажень

Мозаїка переміщень для даного силосу від навантажень у ЛІРА-САПР наведена на рисунку 3.12. Величини наведені у вигляді розмірно-колірної шкали, що розташована зліва рисунку у одиницях виміру мм.

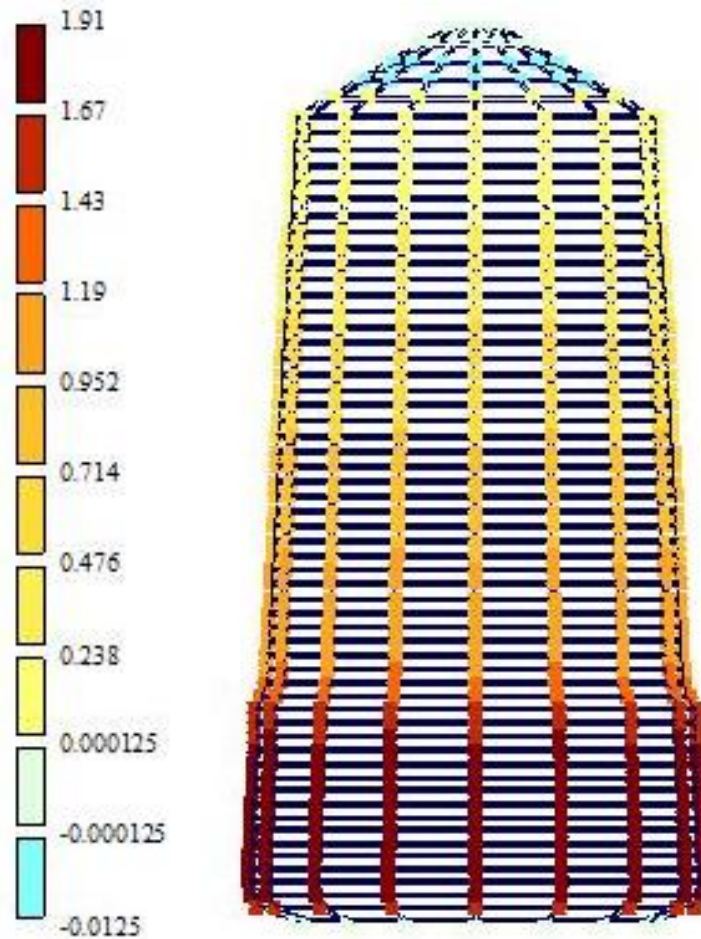


Рис. 3.12. Мозаїка переміщень силосу

Як видно з рисунку 3.12, максимальні переміщення стінки силосу знаходяться на нижніх, найбільш навантажених ярусах та відповідають значенню $\omega = 1,91 \text{ мм}$. Різниця між переміщенням розрахованим за формулою (3.41) та максимальними переміщеннями стінки силосу в програмного комплексу ЛІРА-САПР складає 1%.

Для точнішого аналізу переміщень була створена більш детальна модель у ЛІРА-САПР (модель із меншими розмірами скінченних елементів, для відстеження переміщень міжфальцевої та фальцевої зони). Модель являє собою 3 яруси спіральньо-фальцевої оболонки, висота ярусу 36,5 см, радіус оболонки

$r=4$ м, товщина стінки $t=4$ мм, площа фальцевого ребра для штрипса товщиною 4 мм $A=7,35$ см², матеріал корпусу – сталь С235, $R_y(x) = 235$ МПа модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$. Для спрощення розрахунків, на конструкцію прикладався тільки горизонтальний тиск зерна $P(x) = 2,74 \frac{H}{\text{см}^2}$.

Проводимо розрахунки за наведеним вище алгоритмом, відповідно до формул (3.51), (3.53) отримуємо такі значення переміщень: на контурі обичайки – $\omega(\tilde{\xi}) = 0,37$ мм; у середині обичайки – $\omega(\bar{\xi}) = 0,466$ мм.

Для розрахунку в ЛІРА-САПР була створена скінчено-елементна модель за характеристиками оболонки наведеної вище. Загальний вигляд моделі наведений на рисунку 3.13. Яруси стінки між кільцевими ребрами змодельовані оболонковими СЕ типу 44 «чотирикутний елемент оболонки», які встановлені у вертикальній площині, товщиною 4 мм із модулем пружності сталі, що відповідає марці сталі С 235. Фальцеве ребро змодельоване СЕ типу 41 «прямокутний елемент оболонки» площею 7,35 см².

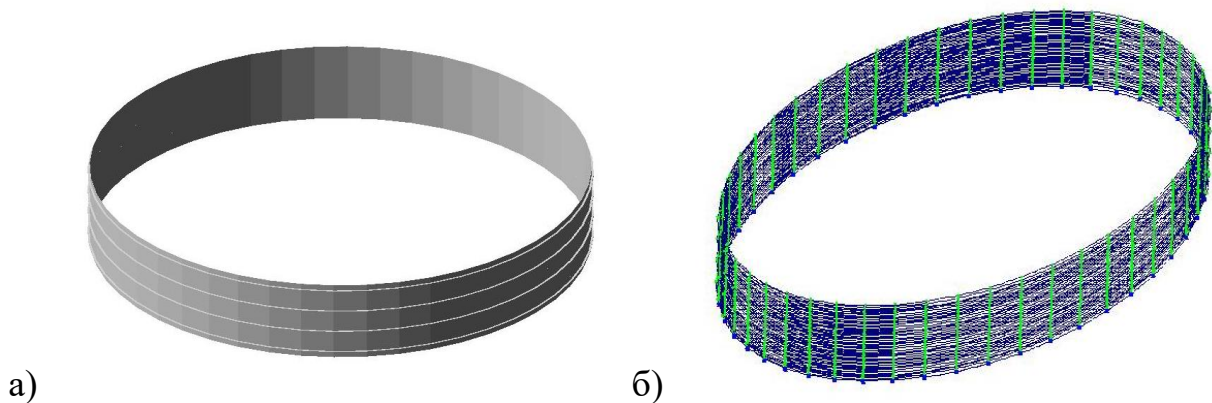


Рис. 3.13. Загальний вигляд моделі оболонки: а) 3-D модель; б) скінчено-елементна модель

Переміщення за розрахунками в ЛІРА-САПР відповідають наступним значенням: на контурі обичайки – $\omega = 0,353$ мм; у середині обичайки – $\omega = 0,448$ мм. Мозаїка переміщень для даного силосу від горизонтального тиску

в ЛІРА-САПР наведена на рисунку 3.14. Величини, наведені у вигляді розмірно-колірної шкали, що розташована зліва рисунку у одиницях виміру мм.

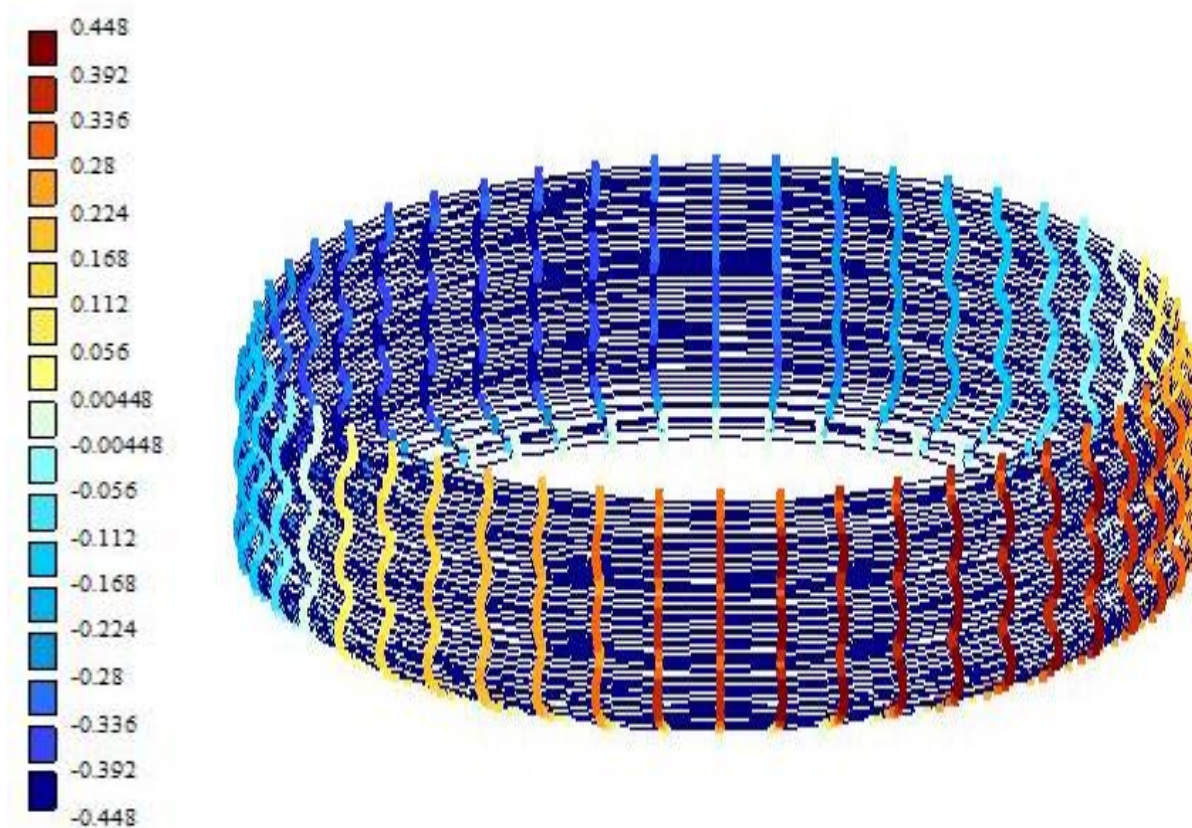


Рис. 3.14. Мозаїка переміщень вузлів оболонки

Різниця значень переміщень розрахованих за допомогою формул (3.39), (3.41) та визначених у програмному комплексі ЛІРА-САПР складає: на контурі обичайки – 4,8%; у середині обичайки – 3,8%.

3.7.Висновки по розділу

У даному розділі відображено специфіку конструкції спіральньо-фальцевих силосів, яка впливає на їх напружено-деформований стан.

Проведено порівняння методик визначення навантажень та впливів на конструкції силосу за різними нормативними документами. Порівняння показало, що розрахунок горизонтальних та вертикальних тисків на стіни силосів

за ДБН має такі відмінності від ДСТУ: не враховуються форми потоку в процесі вивантаження; не виконується поділ силосних конструкцій за гнучкістю, а отже, розрахунок горизонтального та вертикального тисків для всіх типів конструкцій виконується за однією формулою; не враховується статистичний розкид характеристик сипких матеріалів. При подальшому аналізі на числовому прикладі, відзначених вище відмінностей між нормативними документами, було отримано наступні результати: значення нормативних горизонтальних тисків на стінку силосу за ДСТУ, при яких враховувався розкид сипких матеріалів на 27 – 48 % більші, ніж при розрахунках за ДБН; значення нормативних вертикальних від сил тертя тиски – більші на 1 – 23 %. Варто відзначити, що максимальна різниця значень горизонтального тиску між двома нормами, досягає максимальних відхилень у 48%, при типові стіни D1, яка за ДСТУ характеризується як дуже гладка. Тоді як різниця вертикальних тисків від сил тертя за двома нормами, досягає максимальних відхилень у 23% при типові стіни D2, яка за ДСТУ характеризується як гладка. З цього випливає, що значення коефіцієнту тертя об стіни має значний вплив на розрахунок горизонтального тиску.

Проаналізовано особливості розрахункової схеми спірально-фальцевих силосів. Наведено алгоритм розрахунку на міцність металевого силосу за безмоментної теорією.

Розглянуто напружено-деформований стан міжфальцевої ділянки оболонки з постійною товщиною стінки. Ділянка пружно з'єднана із сусідніми обичайками та зазнає напружено-деформований стан, типу поздовжньо-поперечного згину. Проаналізовано алгоритм розрахунку прогину та згинаючого моменту в характерних перерізах обичайки.

Проведено порівняння теоретичних розрахунків із розрахунками методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР на двох різних моделях. Для порівняння розрахунків було змодельовано силосну конструкцію та прикладено відповідні навантаження від сипучого матеріалу. Результат

розрахунку за формулами показав наступні прогини: на контурі обичайки – $\omega(\tilde{\xi}) = 1\text{мм}$; всередині обичайки – $\omega(\bar{\xi}) = 1,93\text{мм}$. За розрахунком методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САІР максимальні переміщення стінки силосу відповідають значенню $\omega = 1,91\text{мм}$. Різниця між переміщенням розрахованим за формулою та максимальним переміщеннями стінки силосу в програмному комплексі ЛІРА-САІР складає 1%.

Для точнішого аналізу переміщень була створена більш детальна модель у ЛІРА-САІР (модель із меншими розмірами скінченних елементів, для відстеження переміщень міжфальцевої та фальцевої зони). При порівнянні розрахунків різниця значень переміщень визначених за допомогою формул (3.39), (3.41) та в програмному комплексі ЛІРА-САІР складає: на контурі обичайки – 4,8%; у середині обичайки – 3,8%.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВОГО СИЛОСУ

Відповідно до специфіки конструкції спірально-фальцевого силосу, наведеної в п.3.1, фальцеві ребра суттєво впливають на напружено-деформований стан силосної ємності. Відмінністю фальцевого ребра від інших видів стикових елементів, є те, що жорсткість та піддатливість фальцевого ребра, суттєво відрізняються при стиску та розтягу оболонки. Сипучий матеріал викликає в силосній конструкції зусилля розтягу в кільцевому та зусилля стиску у меридіональному напрямках, однак при дії вітру в незаповненій силосній ємності виникають не тільки меридіональні напруження стиску, а й розтягу. Нерівномірне осідання фундаменту також призводить до різнонаправлених поздовжніх зусиль у стінці оболонки [119]. Враховуючи аналіз галузі застосування спірально-фальцевих ємностей, зроблений в 2 розділі, відомо, що цей тип конструкцій застосовується не тільки для зберігання сипучих матеріалів, а й таких, які викликають у конструкції зусилля розтягу в двох напрямках, кільцевому та меридіональному. Поздовжні зусилля в місцях розміщення ребер передаються з ексцентриситетом, що призводить до появи згинаючого меридіонального моменту, який в свою чергу викликає згин в міжфальцевій зоні та одночасне розкриття фальцевого замка. Згин міжфальцевої зони стін спірально-фальцевих силосів (рис. 4.1) є найпоширенішою причиною руйнування конструкції. Це явище, як правило, є раптовим і може призводити до катастрофічних наслідків.

Додатковими причинами згину стінки спірально-фальцевих силосів є допущення помилок в процесі зведення корпусу, які призводять до таких наслідків: 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.



Рис. 4.1. Згин міжфальцевої зони стінки спіраль-фальцевого силосу

Аналізуючи вище перераховані умови роботи спіраль-фальцевих силосних ємностей, стає зрозумілим важливість, як дослідження фальцевого замку на розтягуючі навантаження, так і дослідження міжфальцевої зони оболонки силосу на згин.

4.1. Експериментальне дослідження фальцевого замку на розтягуючі навантаження

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

Для експериментального дослідження був взятий елемент стінки спіральньо-фальцевого силосу для зберігання тріски деревини. Габарити силосу – діаметр 8м, висота корпусу 17 м, загальний об’єм зберігання матеріалу 650 м³. У стінці силосу було зроблено технологічний отвір для монтажу оглядового люку. Вирізаний елемент стінки був розділений на 10 експериментальних зразків (рис. 4.2). Експериментальне дослідження проводилось в лабораторії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» на розривній машині ГМС-50 (див. додаток В).

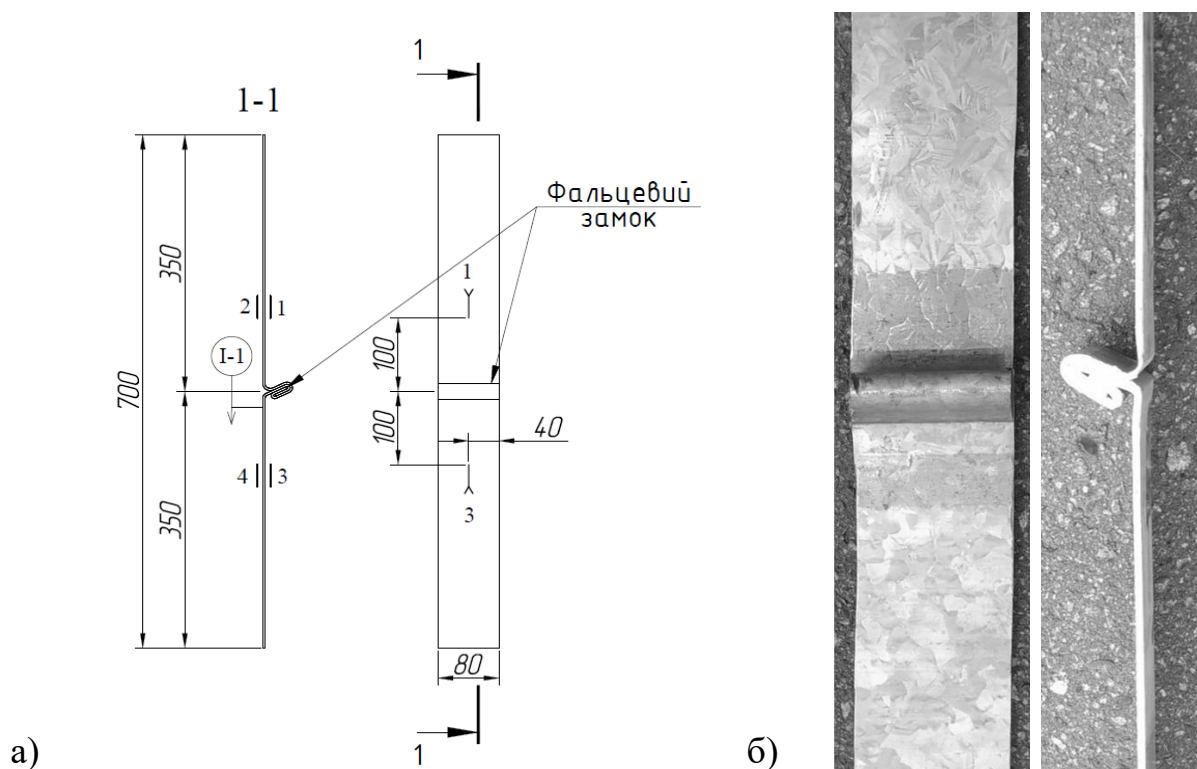


Рис. 4.2. Експериментальний зразок: а) розташування та нумерація тензодатчиків та індикаторів на зразках; 1 – 4 – тензодатчики; I – 1 – індикатори годинникового типу; б) загальний вигляд

Характеристики зразка – марка сталі DX51D+Z140, ширина – 80 мм, довжина 700 мм, товщина – 4 мм. Ширина зразка прийнята з умови надійного закріплення у випробувальній машині, довжина – з умови надійного закріплення

зразка та можливості визначити поведінку стінки силосу під час руйнування фальцевого з'єднання.

Сталь DX51D+Z140 – низьковуглецева сталь для холодної формозміни у вигляді листів і смуг із металевим покриттям, яке нанесене методом безперервного гарячого занурення відповідно до вимог європейського стандарту EN 10346 та його українського аналога ДСТУ EN 10346. Аналогом сталі DX51D+Z140 є сталь С245.

Для визначення характеристик сталі DX51D+Z140 було проведене випробування на розтягування на 4 плоских зразках (рис. 4.3). 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. 4.3,б). 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 $A = 16\%$ [105].

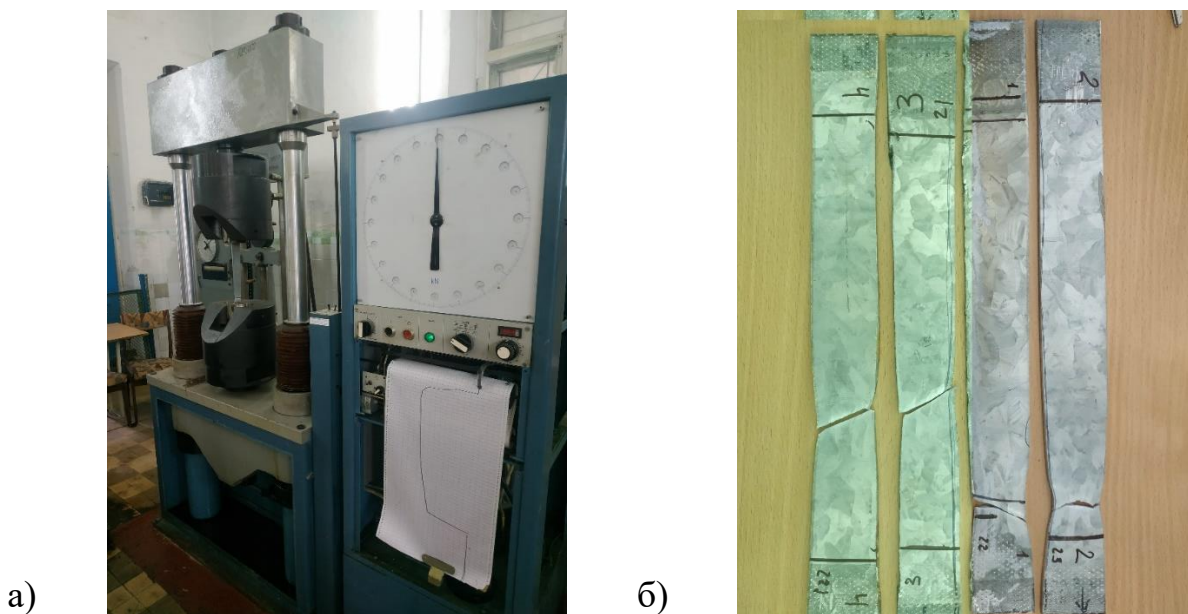


Рис. 4.3. Випробування на розтяг: а) загальний вигляд; б) зразки після випробування

Для визначення величини розкриття фальцевого замка використовувалися індикатори годинникового типу із 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 4.2. Показання з тензодатчиків знімалися за допомогою автоматичного вимірювача деформацій АД-4.

Загальний вигляд експериментального зразка з розміщенням на ньому тензодатчиків та індикатору годинникового типу зображено на рис. 4.4.

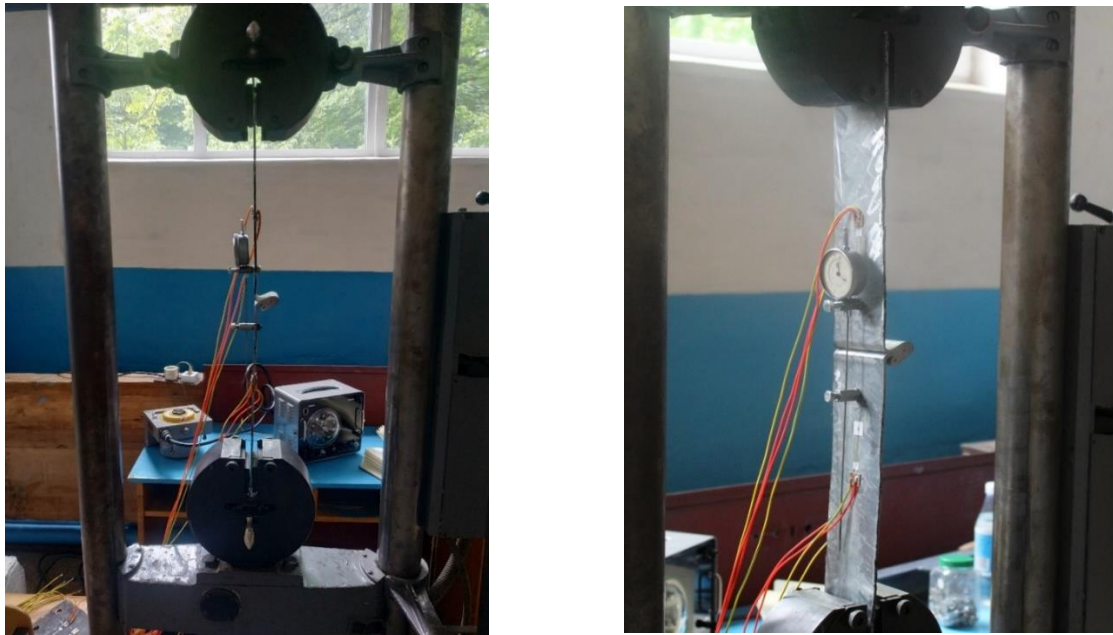


Рис. 4.4. Загальний вигляд експериментального зразка у випробувальній машині

Етапи експерименту: закріплення зразка у випробувальній машині (рис. 4.4), 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 у статичному режимі в межах від 0 кН до 21 кН.

Результати експерименту виявили, що при навантаженні розтягуючим навантаженням у межах 4 – 4,5 кН відбувається зависання навантаження,

утворюється поверхнева тріщина в першому вигині замка. Повне розкриття першого згину фальцевого замка – у межах 7 – 8 кН. Розкриття другого згину починається при навантаженні у межах 8 – 9 кН, в проміжку 9 – 15 кН спостерігається поворот з'єднання із 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 табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Етапи руйнування фальцевого замка в залежності від розтягуючого навантаження

| Навантаження, кН | 0 | 2,5 | 4,5 | 8 |
|--------------------|---|---|---|---|
| Характер розкриття |  |  |  |  |
| Навантаження, кН | 15 | 20 | 14 | 10 |
| Характер розкриття |  |  |  |  |

Повний характер розкриття фальцевого замка до його руйнування наглядно показано на графіку (рис. 4.5).

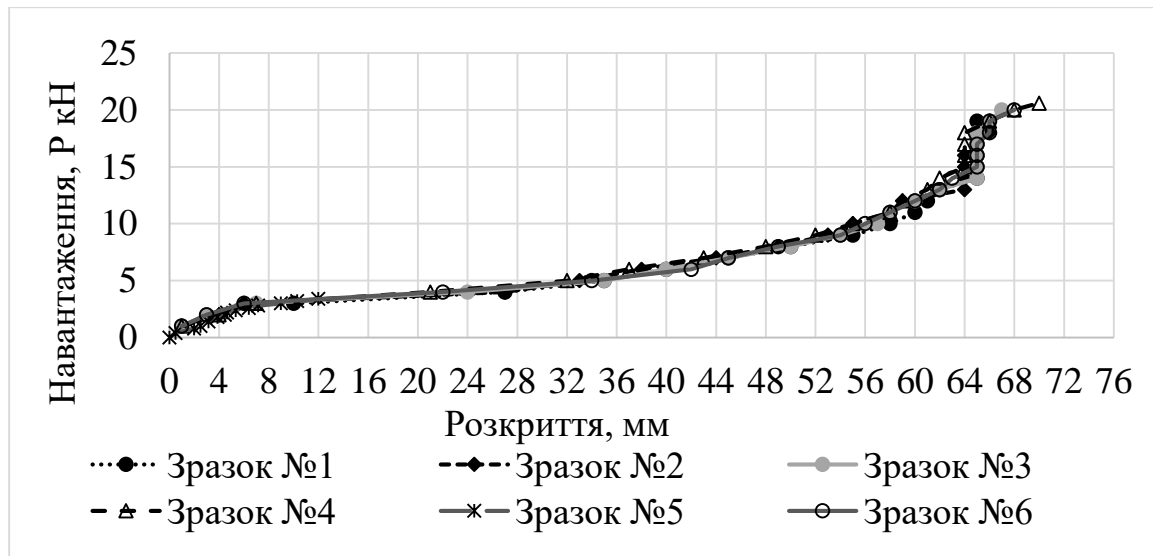


Рис. 4.5. Характер розкриття фальцевого замка

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що при навантаженнях на зразок у межах $P = 0 \dots 3$ кН конструкція працювала пружно, оскільки при розвантаженні до рівня $P = 1,5$ кН ніяких залишкових деформацій не фіксувалось (рис. 4.6).

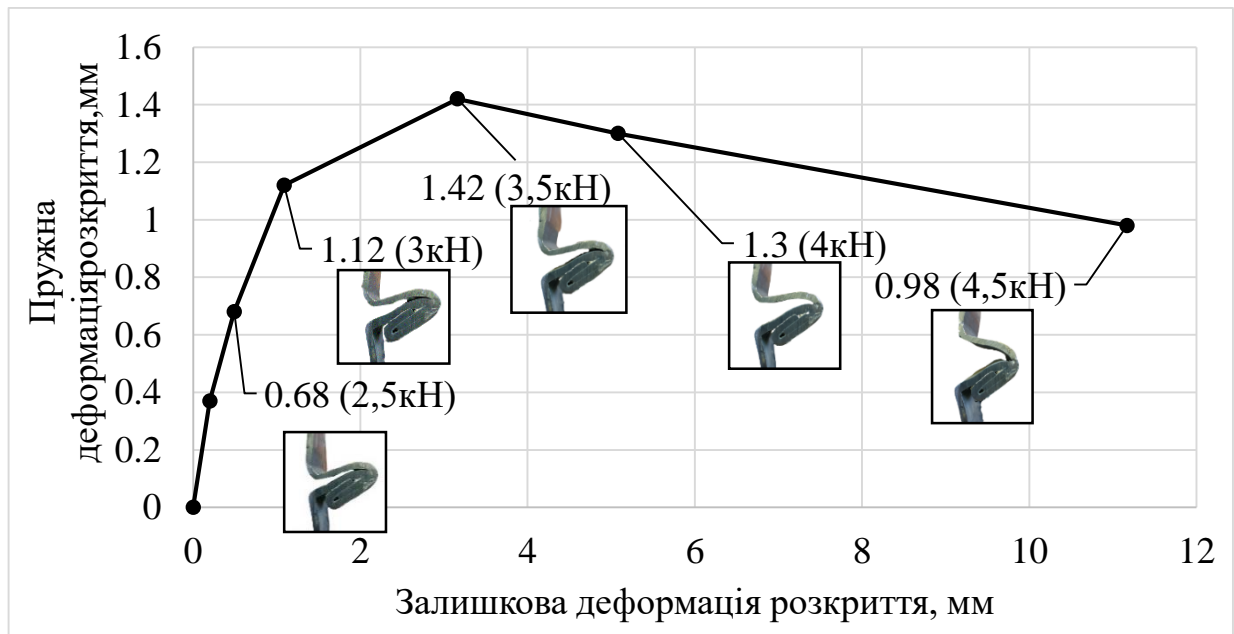


Рис. 4.6. Графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замка за цикл

При збільшенні навантаження на фальцеве з'єднання, вимірювальні прилади фіксували збільшення залишкових деформацій у 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.

На рисунку 4.6 виносна лінія вказує точну величину пружного розкриття, у дужках надається величина навантаження, яке викликає це розкриття, під виносною розміщене зображення розкриття фальця на даному етапі експерименту.

На рисунку 4.7 зображений загальний графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замка за цикл різних зразків.

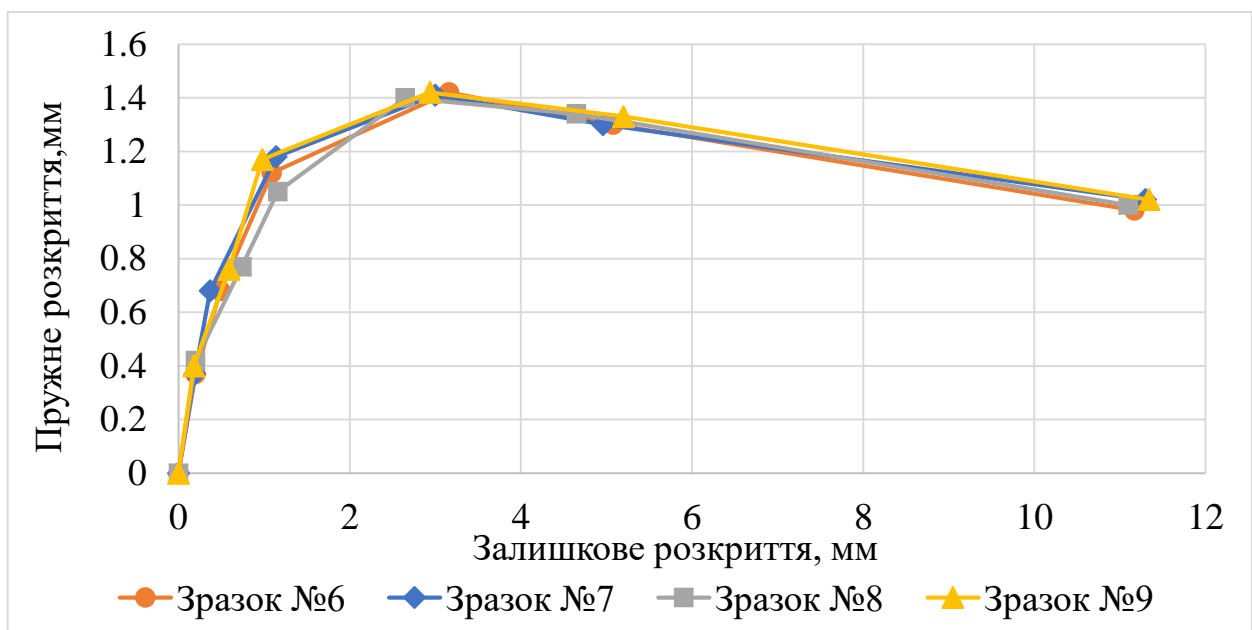


Рис. 4.7. Загальний графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замка за цикл різних зразків

На графіку 4.7 видно, що криві залежності різних зразків мають однаковий характер, однак важливо відмітити, що саме на початкових навантаженнях у межах 2 – 3 кН зразки мають деякі відмінності у величинах деформацій розкриття. Такі розбіжності пояснюють, що на етапі зведення силосу, з якого були взяті зразки, могло бути проведено корегування роботи фальцевої машини,

що вплинуло на силу обтискання фальців роликками. Не дивлячись на початкові розбіжності, всі зразки закінчили пружну стадію роботи при навантаженні 3,5 кН.

На графіку залежності повного розкриттям фальцевого замка від циклічного навантаження (рис. 4.8) можна простежити весь процес розкриття фальцевого замка на всіх етапах експерименту.

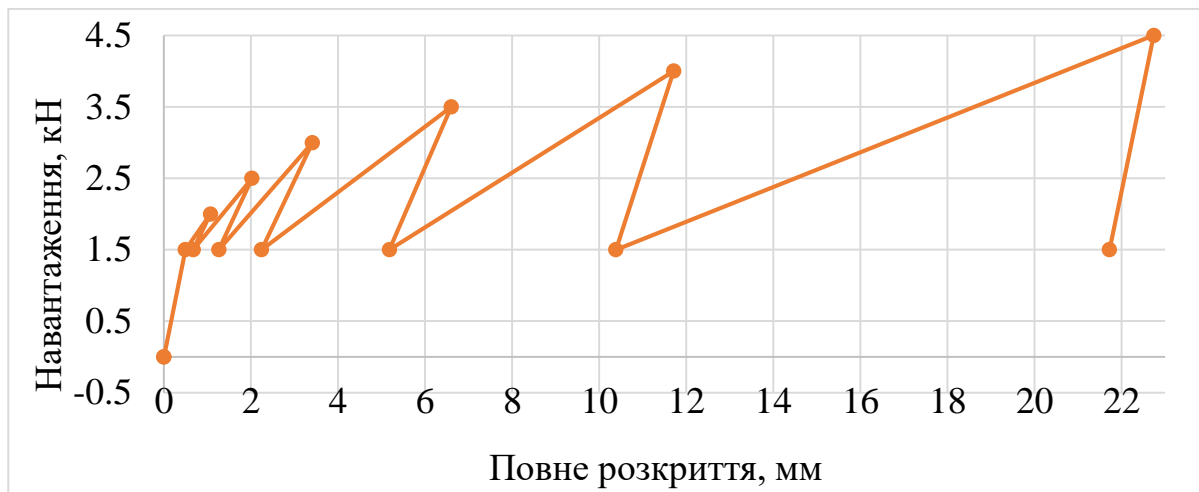


Рис. 4.8. Графік залежності повного розкриття фальцевого замка від циклічного навантаження

Аналіз відносних деформацій, які були виміряні за допомогою АВД-4, показав, що фальцеве ребро та прилегла оболонка працюють у 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. 4.9). Як видно з рис. 4.9, деформації, виміряні тензорезисторами 1, 3 та 2, 4, які розміщені дзеркально по відношенню до фальцевого з'єднання, але з різних сторін стінки силосу (див. рис. 4.2), свідчать про їх сумісну роботу до навантаження в 4,5 кН. Після межі в 4,5 кН графіки деформацій розходяться, у цей час з'являється тріщина металу першого згину фальця та починається його розкриття. Варто відзначити, що перед початком розкриття першого згину, величини деформації тензорезисторів 1 та 2 досягають своїх максимальних значень. У цей же час покази 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.

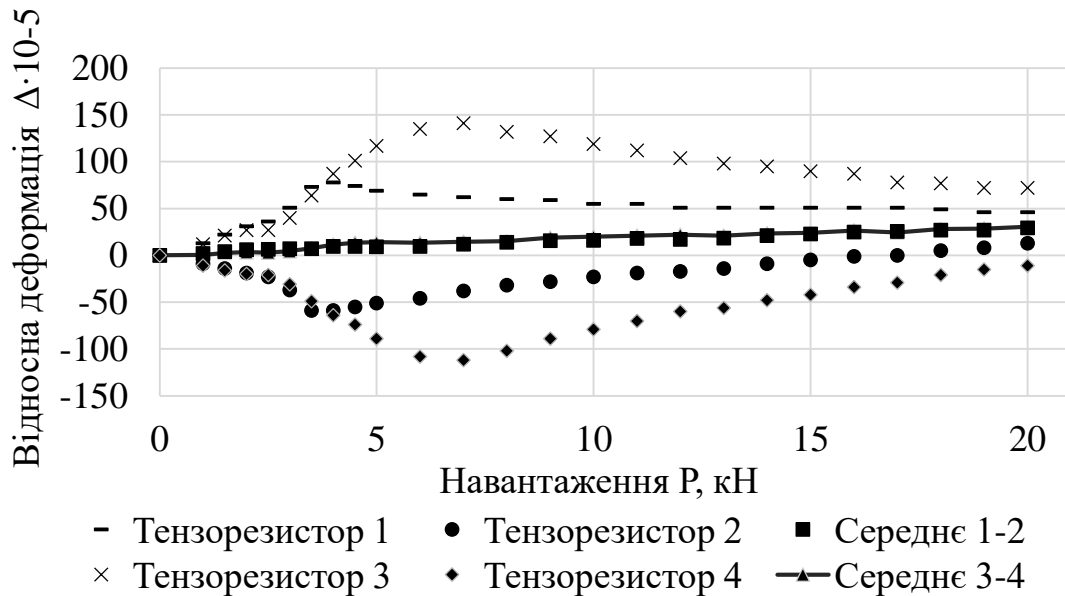


Рис. 4.9. Графік залежності деформації зразка від навантаження

Після руйнування з'єднання на металі спостерігалися зони стоншення металу в місцях згину фальця та тріщини від руйнування згинів (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Зразок після руйнування

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

Результати досліджень були порівнянні з аналітичними розрахунками, отриманими при проектуванні конструкції силосу, із 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 стержневих елементах купольного каркасу покриття, була змодельована розрахункова комп'ютерна модель каркасу силосу. Перевірні статичні розрахунки сталевих конструкцій силосу виконані в програмному комплексі ЛПРА-САПР із перевіркою несучої здатності пластин стінки та стержневих елементів каркасу силосу на можливі при експлуатації розрахункові комбінації навантажень та розрахункові сполучення. Перевірка силосної конструкції проводилась для заповненого силосу, а також для незаповненого сипучим матеріалом силосу при дії вітрового навантаження. Результати розрахунків показали, що у пустій ємності, при дії вітрового навантаження, виникають не тільки меридіональні напруження стиску, а й розтягу. Напруження розтягу в стінці силосу досягало значення $\sigma_y = 0,4 \text{кН} / \text{см}^2$. Експериментальні дослідження фальцевого замка показали, що при пружній роботі фальцевого з'єднання, напруження в стінці відповідало значенням $\sigma_y = 0 - 2,5 \text{кН} / \text{см}^2$. 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.

4.2. Експериментальне дослідження на згин міжфальцевої зони оболонки спірально-фальцевого силосу

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. 4.11, 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 м³. Кількість зразків – 10 шт.

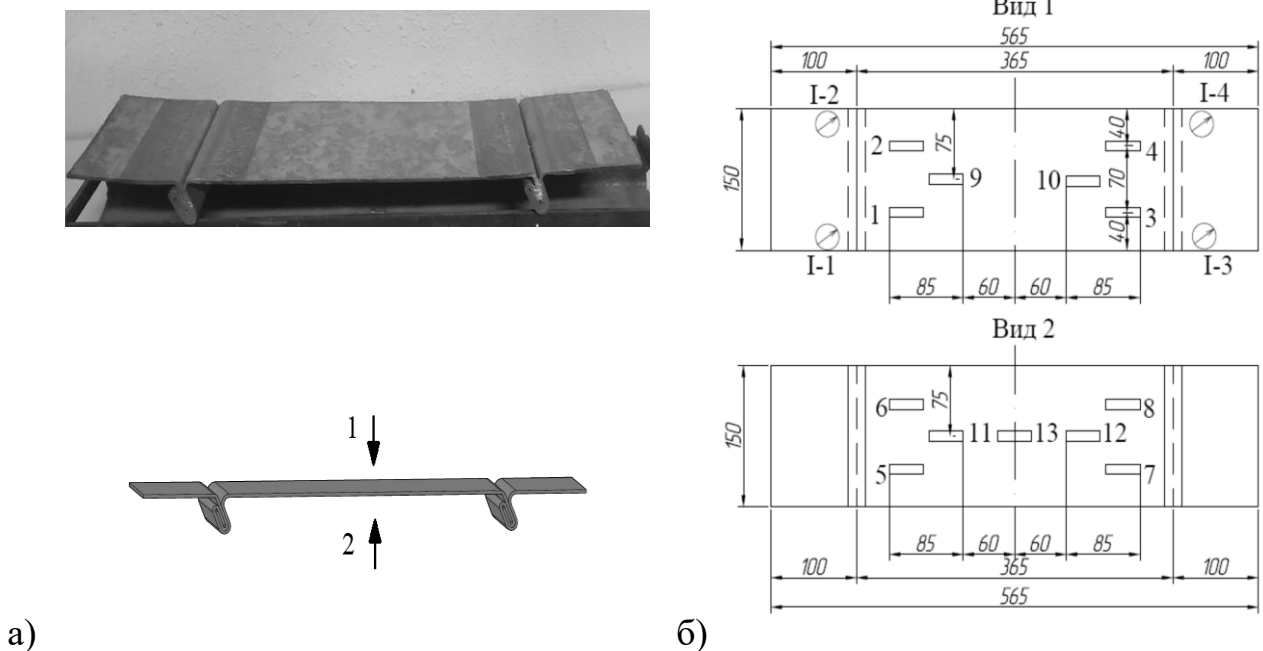


Рис. 4.11. Експериментальний зразок: а) загальний вигляд;
 б) розташування та нумерація тензодатчиків та індикаторів на зразках;
 1 – 13 – тензорезистори; I-1 – I-4 – індикатори годинникового типу.

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 $A = 16\%$ [105]. 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 фальцевого замка від згину. Зразок був нерухомо закріплений на металевій траверсі, для відповідності роботи експериментального зразка, до роботи елемента стінки 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 із базою 20 мм. Схема наклеювання тензорезисторів наведена на рис. 4.11, б. Показання з тензорезисторів знімалися за допомогою автоматичного вимірювача деформацій АВД-4. Для вимірів прогину зразка на кожному ступені навантаження застосовувався прогиномір із ціною ділення 0,01 мм.

Загальний вигляд експериментального зразка у випробувальній машині зображено на рис. 4.12. Етапи експерименту: закріплення зразка у випробувальній машині, 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 у статичному режимі в межах від 0 кН до 5,5 кН. Для вимірювання залишкових деформацій, після кожного етапу навантаження конструкція розвантажувалась.

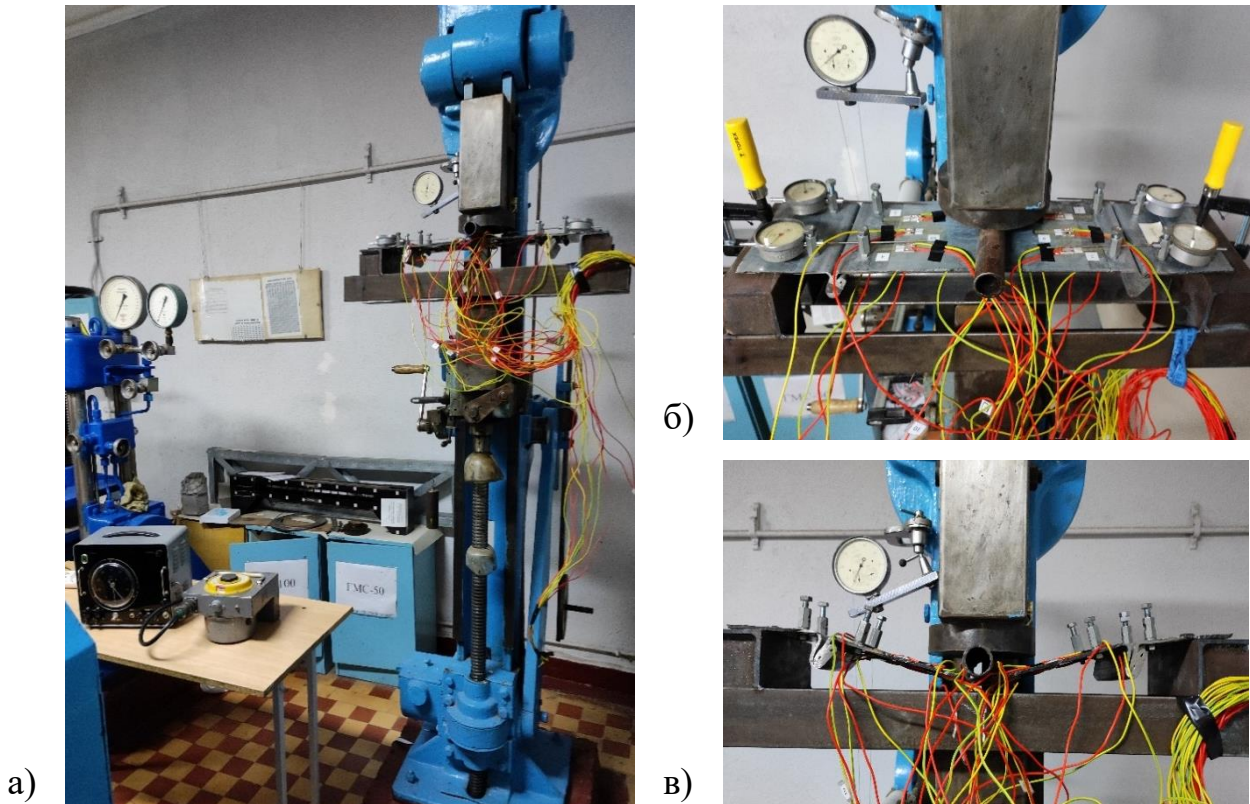


Рис. 4.12. Експериментальний зразок у випробувальній машині:
 а) загальний вигляд; б) вигляд до навантаження; в) вигляд після навантаження.

Для загального розуміння діапазону експериментально прикладеного навантаження відмітимо, що експериментальне навантаження $P=1\text{ кН}$ відповідає рівномірно розподіленому навантаженню $q=5,4\text{ тс/м}^2$. Переведення зосередженого навантаження в рівномірно розподілене проводилося методом переміщень Мора [123]. 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.

Характер прогину зразка у міжфальцевій зоні показаний на графіку (рис. 4.13).

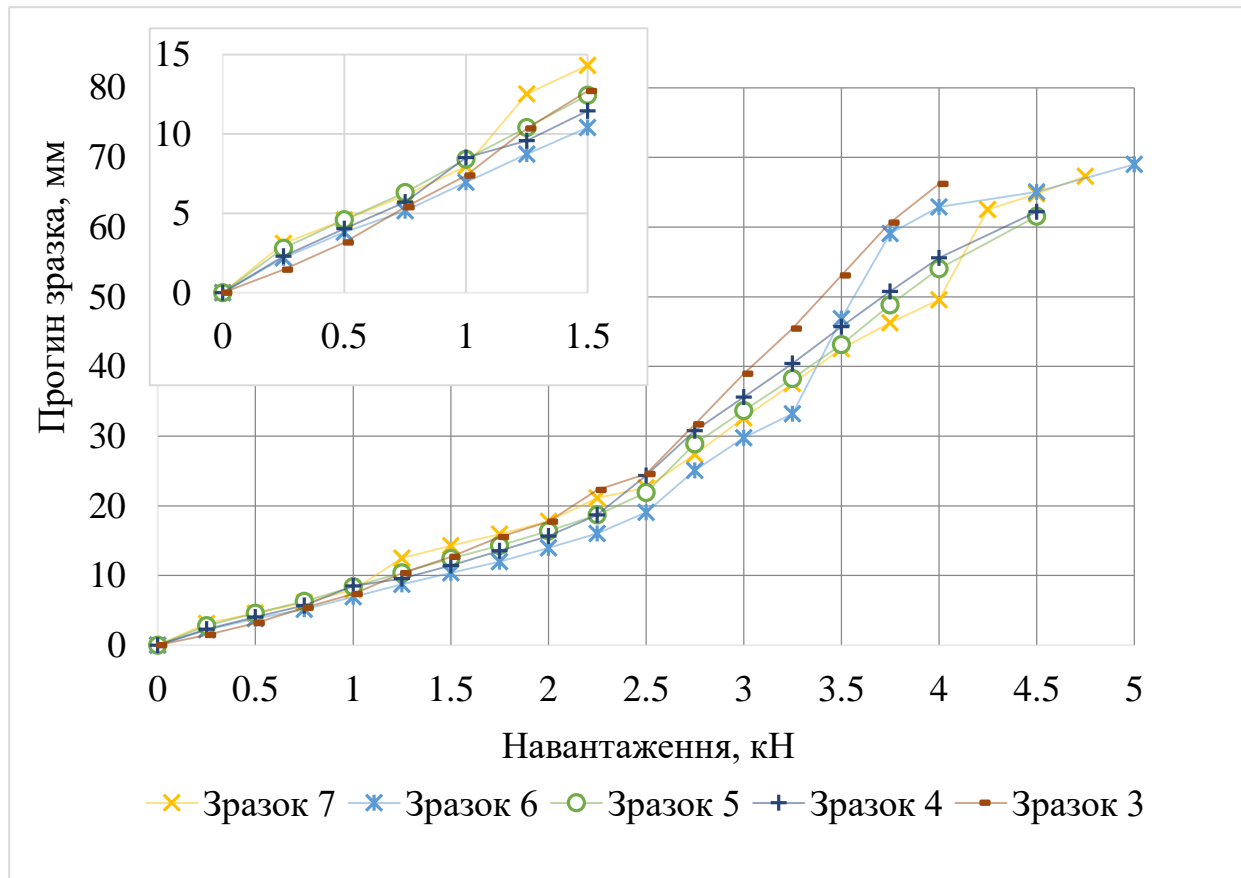


Рис. 4.13. Характер прогину зразка у міжфальцевій зоні

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що на всіх циклах навантаження міжфальцева зона працювала пружно, оскільки навіть при навантаженні до рівня $P = 4$ кН залишкові деформації не перевищували пружні.

До рівня навантаження $P = 2$ кН, вимірювальні прилади фіксували збільшення залишкових деформацій у межах 1 мм. При збільшенні навантаження залишкові деформації різко зросли, але не перевищували пружні деформації. Стрімке зростання можна пояснити тим, що при навантаженні в $P = 2$ кН, величина розкриття фальцевих ребер починає переважати за 1 мм. На рівні навантаження $P = 4$ кН величина залишкових деформації наближається до пружних, а на графіку залежності між пружними та залишковими деформаціями можна спостерігати спад (рис. 4.14).

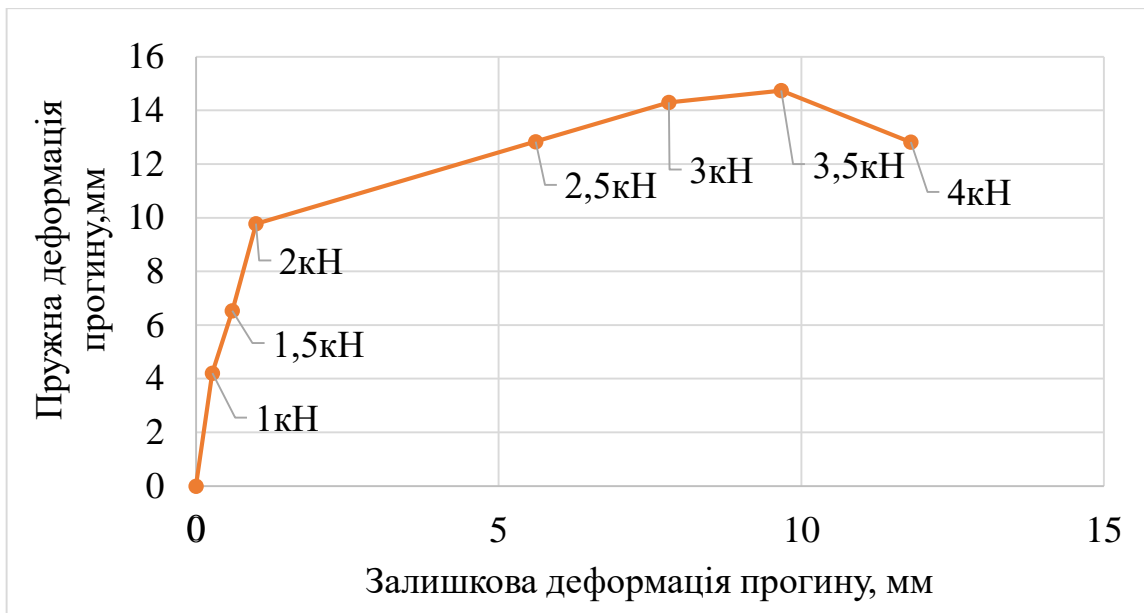


Рис. 4.14. Графік залежності між пружними та залишковими деформаціями прогину міжфальцевої зони

На графіку залежності прогину міжфальцевої зони зразка від циклічного навантаження (рис. 4.15) можна простежити весь процес прогину зразка на всіх етапах експерименту. Графік підтверджує пружну роботу зразка, адже видно, що при циклі завантаження до $P = 2$ кН пружні деформації переважають залишкові. Після навантаження в $P = 2,5$ кН з'являються значні залишкові прогини.

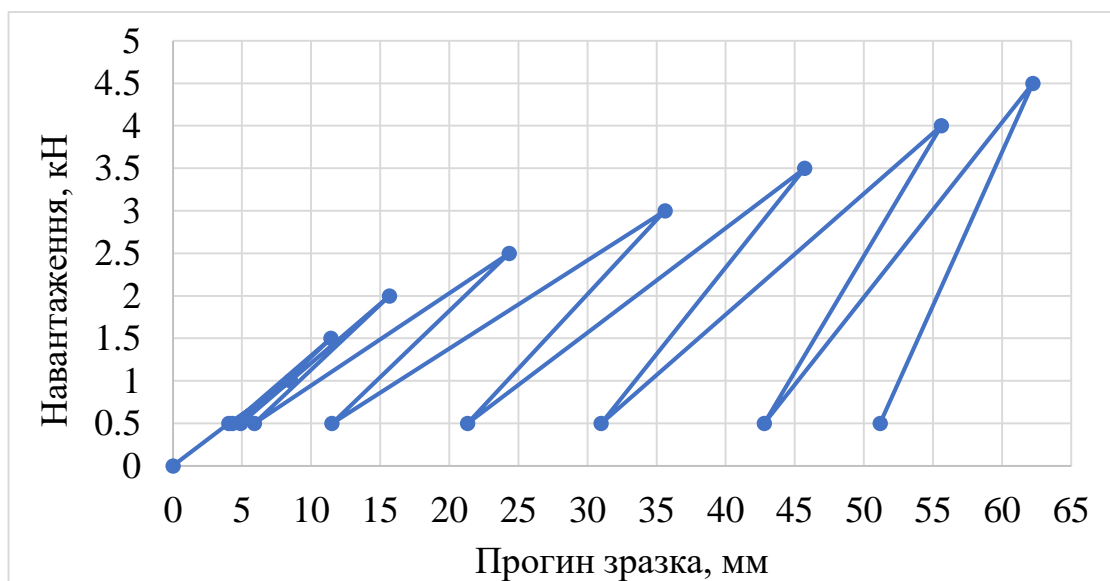


Рис. 4.15. Графік залежності прогину міжфальцевої зони від циклічного навантаження

Прогин міжфальцевої зони сприяє розкриттю фальцевого замка. Характер розкриття фальцевого замка показаний на графіку (рис. 4.16).

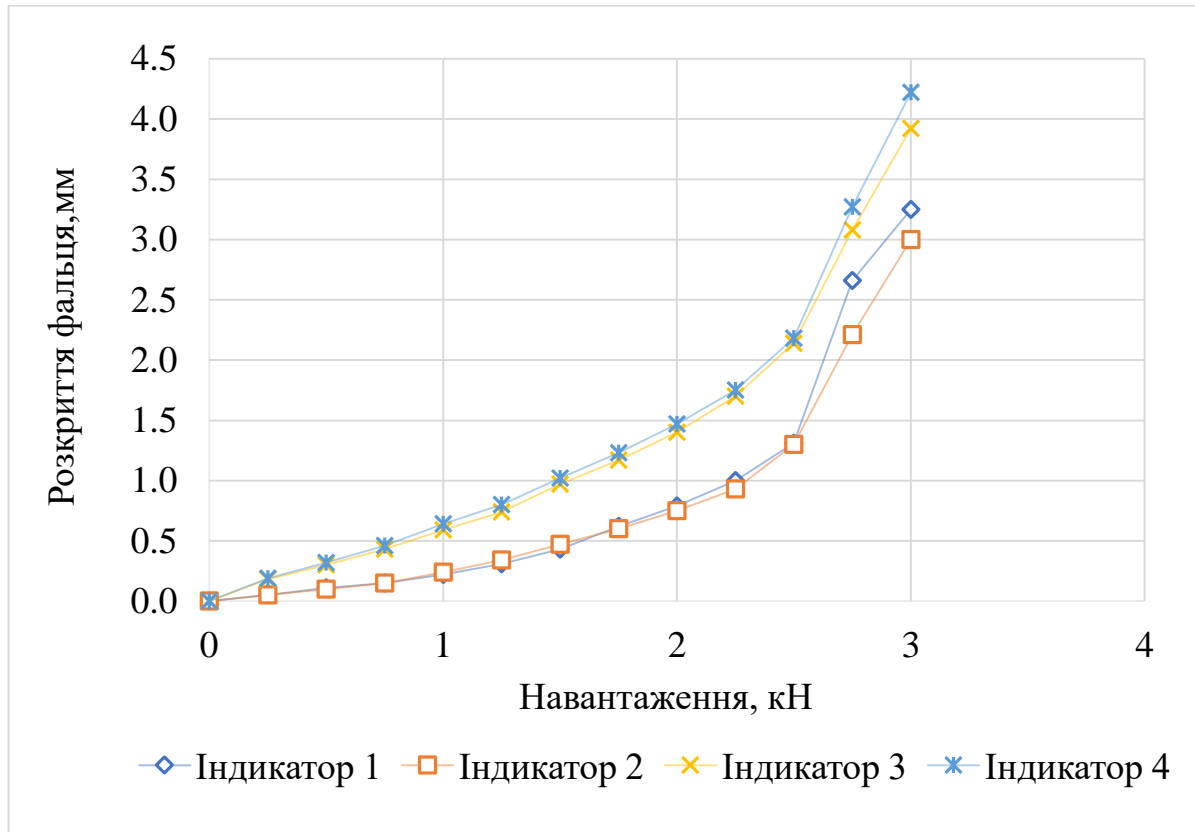


Рис. 4.16. Характер розкриття фальцевого замка

Випробування виявили, що оскільки фальцеві ребра не є симетричними відносно точки прикладання навантаження, на графіку можна відмітити, що розкриття фальцевого замка, розміщеного над міжфальцевою зоною, більше, ніж фальцевого замка, розміщеного нижче цієї зони.

Також було досліджено пружну роботу фальцевих замків при згині міжфальцевої зони стінки силоса. На рисунку 4.17 зображений графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замка за цикл. На етапах експерименту можливість виміряти пружну роботу фальцевих замків була в межах навантаження $P = 0 - 3$ кН, оскільки після цієї границі з'являлися значні прогини міжфальцевої зони, що у свою чергу унеможливило зняття показів з індикаторів годинникового типу.

На рисунку 4.17 чітко видно зростаючий характер графіків, що вказує на те, що фальцеві ребра працюють пружно, навіть після того, як в міжфальцевій зоні з'являються значні залишкові деформації. Також важливо відмітити, що при навантаженні $P = 2,5$ кН залишкові деформації розкриття починають різко зростати, на цьому етапі з'являються значні прогини міжфальцевої зони.

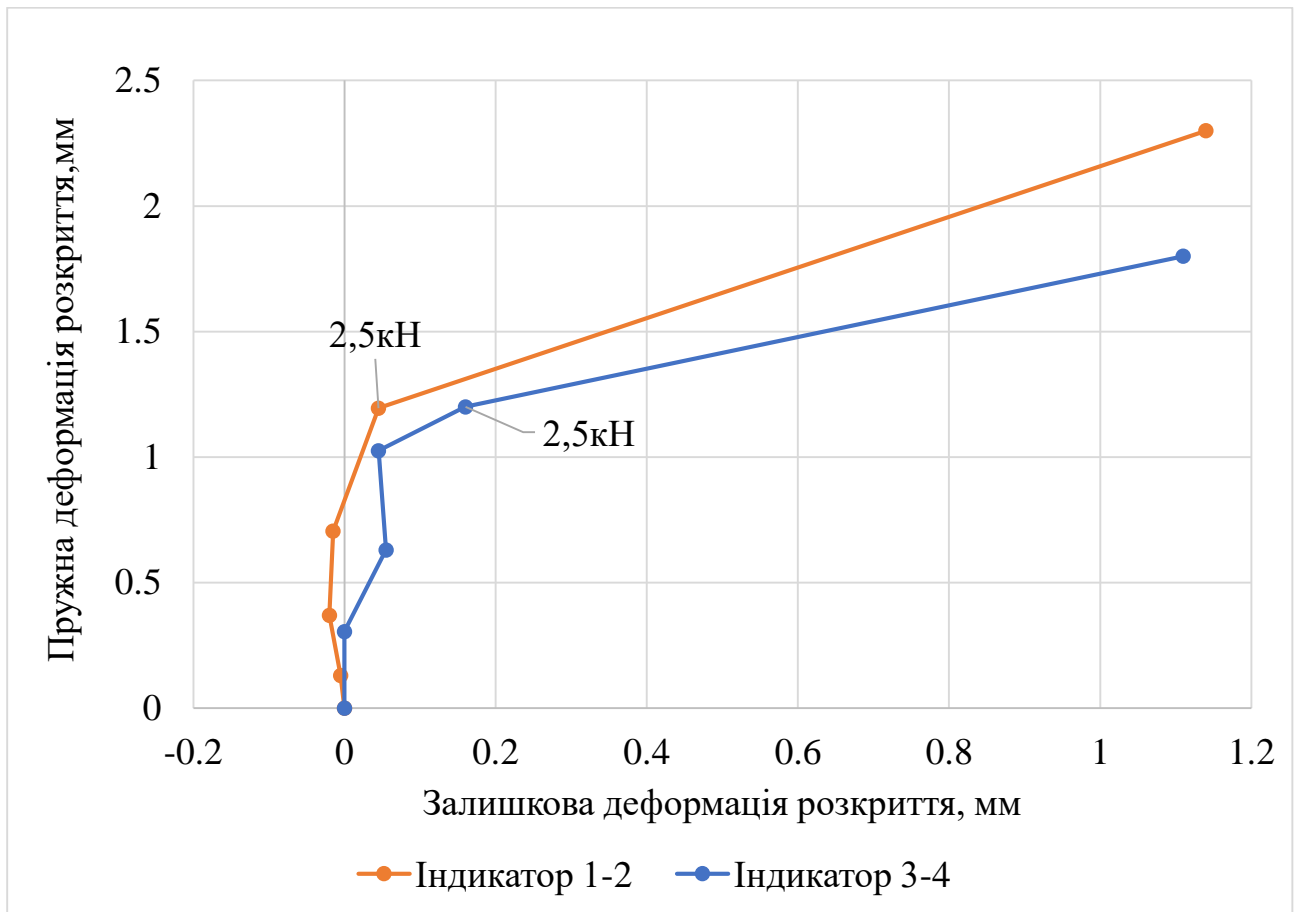


Рис. 4.17. Графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замка за цикл

Також важливо відмітити, що на початкових етапах фальцеве з'єднання при розвантаженні зразка не тільки поверталось у початкове положення, а навіть закривалося більше, ніж до початку експерименту. Це можна простежити за від'ємними значеннями залишкових деформацій вказаних на графіку.

Аналіз відносних деформацій, які були виміряні за допомогою АВД – 4, показав, що зразок працює в складному напруженому стані. Покази із дзеркальних тензорезисторів мали протилежні знаки. Покази тензорезисторів 1,2

та 3,4 до навантаження $P = 1,75$ кН збігаються, у той же час, як покази тензорезисторів 5,6 та 7,8 співпадають до $P = 2$ кН. Різниця в показах між датчиками 9,10 та 11,12 пояснюється різними величинами розкриття фальцевих замків відносно точки прикладання навантаження (рис. 4.18). Це у свою чергу вказує на те, що напруження стінки силоса в міжфальцевій зоні залежить від величини та характеру розкриття фальцевого ребра.

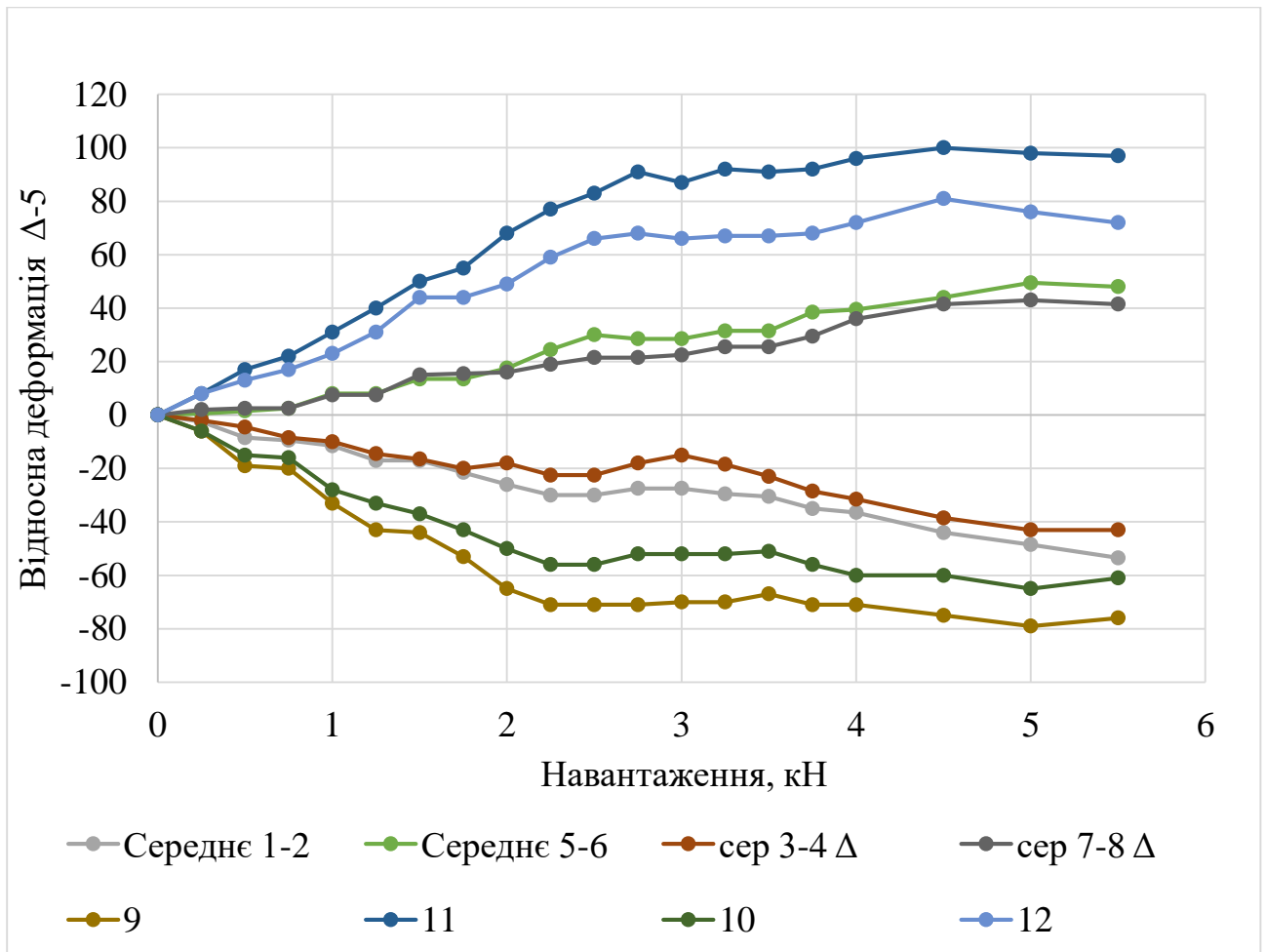
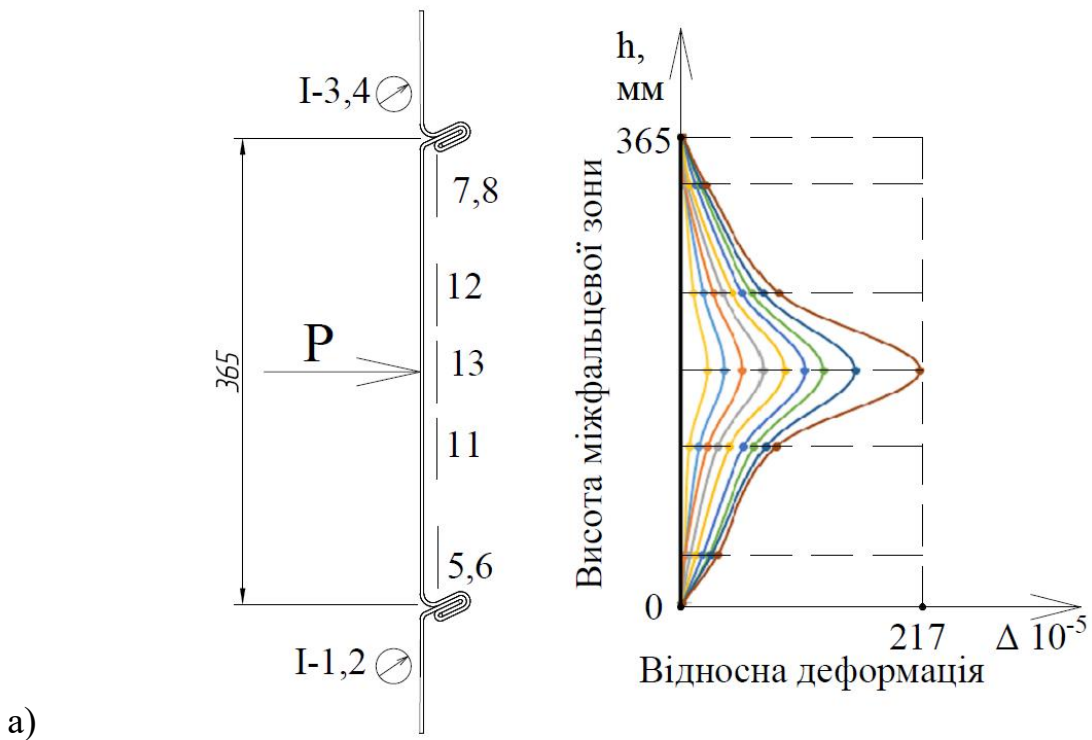
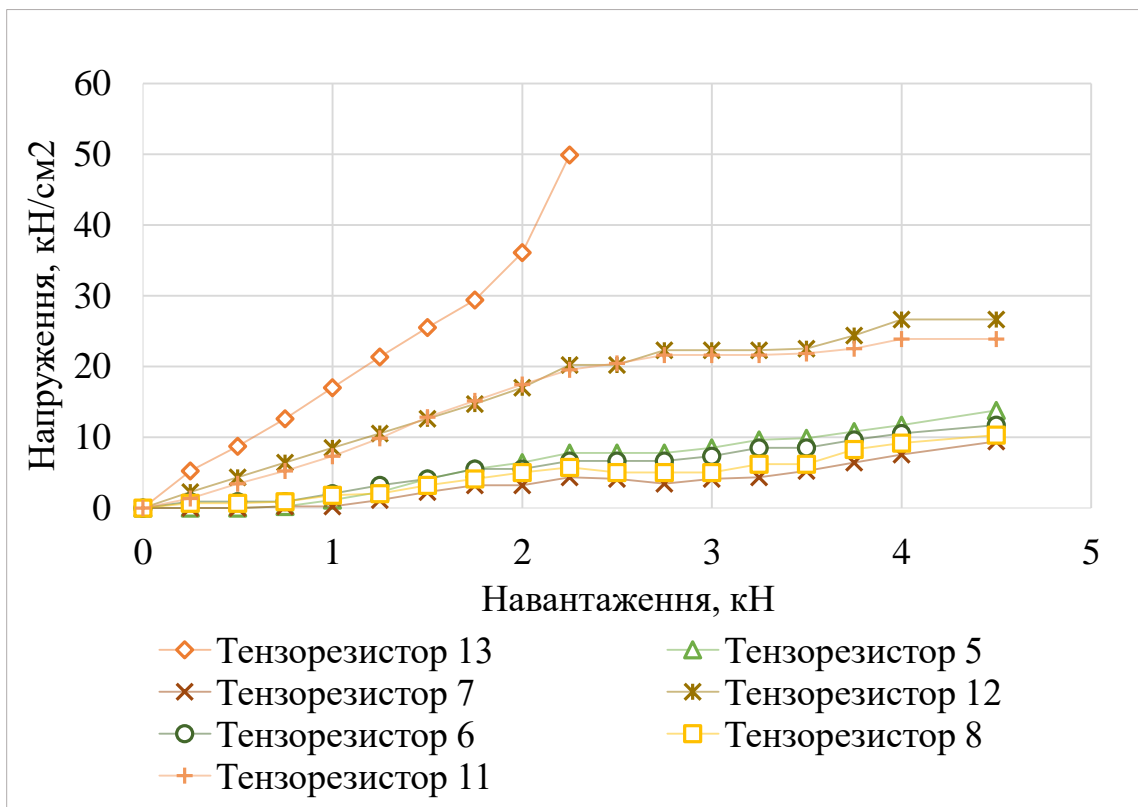


Рис. 4.18. Графік залежності деформації зразка від навантаження

На рисунку 4.19, б показаний графік залежностей напружень від навантаження, дані зібрані з тензорезисторів (рис. 4.19, 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.



a)



b)

Рис. 4.19. Напружено-деформований стан елемента стінки:
а) еюра деформацій; б) графік напружень.

4.3. Порівняння результатів експериментального дослідження на згин міжфальцевої зони оболонки спірально-фальцевого силосу з розрахунком методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР

Отримані результати було порівняно з розрахунком методом скінченних елементів, які проводились у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Для розрахунку були задані параметри експериментального зразка. Стінка силосу та фальцеве ребро змодельовано плоскими оболонковими елементами СЕ типу 44 «чотирикутний елемент оболонки». Розміри скінченних елементів 9 мм x 10 мм (рис. 4.20). Для відповідності розрахункової моделі до експерименту, її кінці було защемлено.

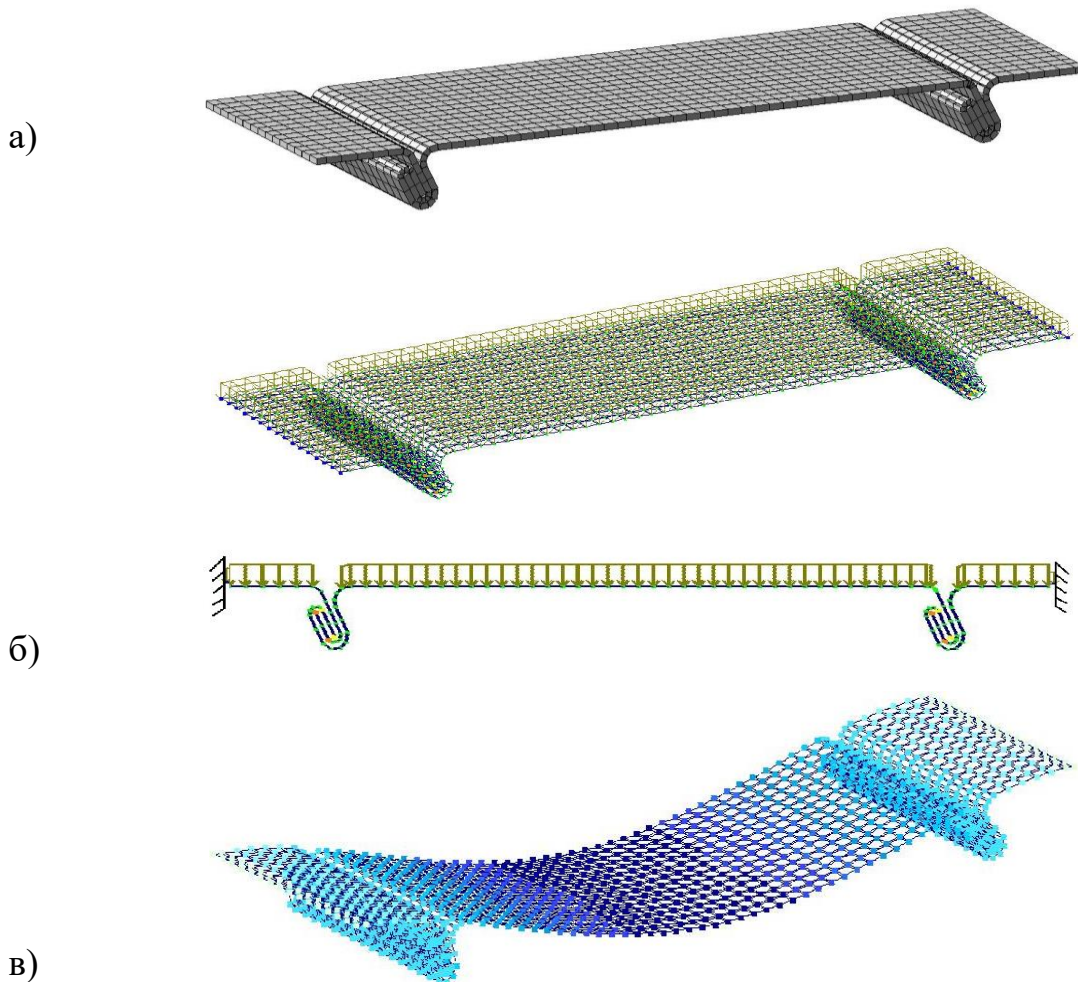


Рис. 4.20. Моделювання експериментального зразка в ЛІРА-САПР:

а) 3d – модель; б) навантаження моделі; в) мозаїка переміщень.

При завантаженні змодельованого зразка (рис. 4.20, а) рівномірно розподіленим навантаженням, яке відповідає експериментальному, було отримано наступні дані, які наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Порівняння результатів експерименту із розрахунками методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР

| Експеримент (середнє значення 5-х зразків) | | ЛІРА-САПР | | Різниця, % |
|--|-----------------|----------------------------------|-----------------|------------|
| Навантаження, кН | Переміщення, мм | Навантаження, кг/см ² | Переміщення, мм | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 0,25 | 2,378 | 0,1637 | 2,31 | 3,3 |
| 0,5 | 4,038 | 0,2779 | 3,91 | 3,2 |
| 0,75 | 5,738 | 0,395 | 5,45 | 5,0 |
| 1 | 7,842 | 0,5398 | 7,54 | 3,9 |
| 1,25 | 10,306 | 0,7094 | 9,91 | 3,8 |
| 1,5 | 12,256 | 0,8436 | 11,7 | 4,5 |
| 1,75 | 14,26 | 0,9816 | 13,7 | 3,9 |
| 2 | 16,32 | 1,1234 | 15,6 | 4,4 |
| 2,25 | 19,374 | 1,3336 | 18,6 | 4,0 |
| 2,5 | 22,506 | 1,5492 | 21,6 | 4,0 |
| 2,75 | 28,78 | 1,981 | 27,6 | 4,1 |
| 3 | 34,132 | 2,3494 | 32,8 | 3,9 |
| 3,25 | 38,984 | 2,6834 | 37,4 | 4,1 |
| 3,5 | 46,274 | 3,1852 | 44,5 | 3,8 |
| 3,75 | 53,132 | 3,6573 | 51,1 | 3,8 |
| 4 | 57,666 | 3,9694 | 55,4 | 3,9 |
| 4,25 | 63,41 | 4,3647 | 60,9 | 4,0 |

Підсумовуючи дані, наведені в таблиці, можна стверджувати, що різниця між переміщеннями міжфальцевої зони експериментального зразка та розрахунками методом скінченних елементів складає 3 – 5 %.

За даними, наведеними у табл. 4.2, було побудовано графіки залежності прогину зразка від навантаження у міжфальцевій зоні (рис. 4.21). Графік показує,

що при збільшенні навантаження до 2,5 кН і вище, експериментальні зразки мають більші величини прогинів, ніж розрахункові, це пояснюється збільшенням розкриття фальцевого замка, що не враховується у комп'ютерній розрахунковій моделі.

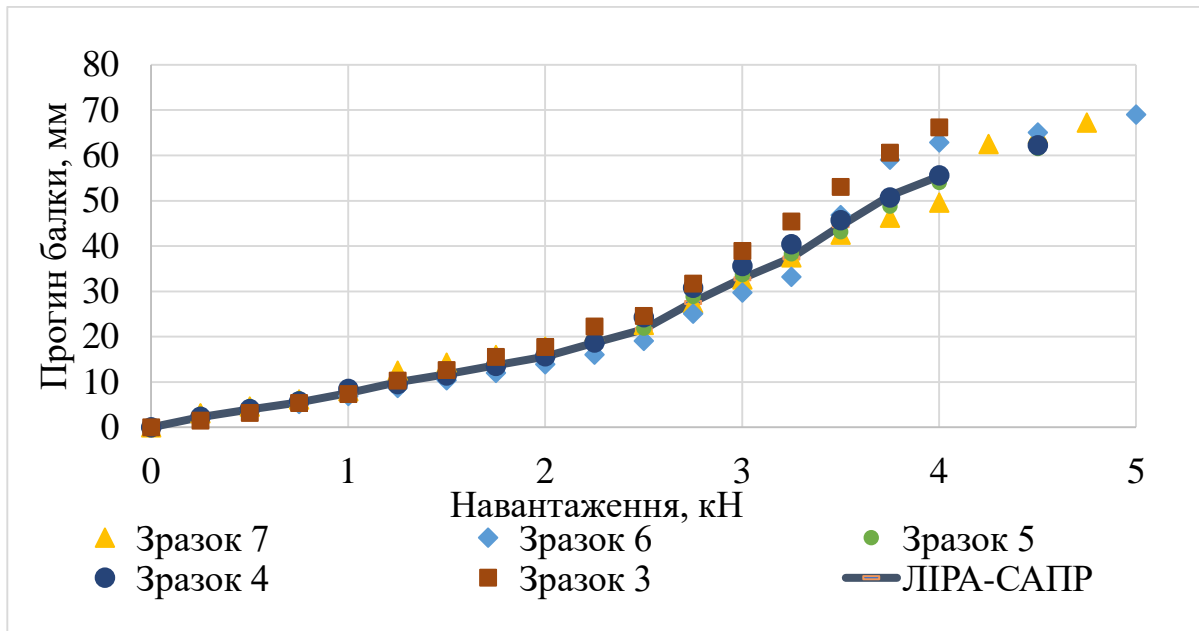


Рис. 4.21. Графік залежності прогину зразка від навантаження у міжфальцевій зоні

4.4.Висновки по розділу

У результаті експериментального дослідження фальцевого замка на розтягуючі навантаження та порівняння отриманих даних із розрахунками методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР було зроблено наступні 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. Виявлено, що експлуатаційні навантаження відповідають початковій стадії роботи фальця без його розкриття.

5. Показано, що випробувана конструкція фальця забезпечує надійну роботу оболонки на проектні навантаження.

6. Виявлений характер роботи фальця до руйнування в основному відповідає позаграничному стану оболонки спірально-фальцевого силосу і підтверджує його надійність при дії можливих підвищених аварійних навантажень.

У результаті експериментального дослідження міжфальцевої зони оболонки силосу на згин було зроблено наступні висновки:

7. Проведено експериментальну перевірку роботи міжфальцевої зони оболонки та прилеглих фальцевих замків спірально-фальцевого силосу. Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що на всіх циклах завантаження міжфальцева зона працювала пружно, до рівня навантаження $P = 2$ кН, вимірювальні прилади фіксували збільшення залишкових деформацій у межах 1 мм.

8. Виявлено характер взаємодії та деформування стінки з фальцевим з'єднанням, підтверджено, що прогин міжфальцевої зони сприяє розкриттю фальцевого замка. Оцінено ступінь розкриття фальців.

9. Одержані дані щодо характеру роботи стінки та фальцевого з'єднання в граничному та позаграничному станах.

10. Виконано порівняння експериментальних залежностей із розрахунком методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛПРА-САПР, різниця між переміщеннями міжфальцевої зони експериментального зразка та розрахунками методом скінченних елементів складає 3 – 5 %.

11. Обґрунтовано висновок про надійну роботу стінки спірально-фальцевого силосу при експлуатаційних та підвищених навантаженнях.

РОЗДІЛ 5

ДОСВІД БУДІВНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТАЛЕВИХ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Конструкції спірально-фальцевого типу є універсальними та економічними, адже можуть застосовуватись у різних галузях: силоси для різних видів сипучих матеріалів; резервуари для зберігання різних рідин, метантенки в складі біоенергетичних установок. Приклади різних сфер застосування спірально-фальцевих конструкцій детально описано в 2 розділі.

У даному розділі проведено формування даних про приклади будівництва та досвід експлуатації металевих спірально-фальцевих силосів на території України.

5.1. Досвід будівництва металевих спірально-фальцевих силосів на території України.

Завод Coca-Cola, м. Київ. У 1997 р. компанія-винахідник спірально-фальцевих конструкцій – Lipp GmbH побудувала в Україні три резервуари-відстійники для води – загальним об'ємом 4 700 м³, два резервуари-відстійники для води місткістю 1 640 м³ та 2 резервуари для води по 500 м³ кожен (рис. 5.1) [87].



Рис. 5.1. Спірально-фальцеві резервуари [<https://kyiv.comments.ua/>]

Спірально-фальцеві конструкції, як компонент біоенергетичних установок. Конструкції спірально-фальцевих силосів для зберігання тріски деревини зарекомендували себе по всьому світу. Зокрема, італійська фірма BSP ENGINEERING SRL реалізувала ряд проєктів для зберігання тріски деревини в різних країнах (рис. 5.2). Проєкти включають у себе ємності для зберігання тріски деревини об'ємом до 10 000 м³, система розвантаження, яка комплектується у залежності від технічних особливостей, гвинтовий генератор біомаси різної комплектації забезпечує безперерйне вивантаження матеріалу [62].



Рис. 5.2. Продукція компанії BSP ENGINEERING SRL: а) ТЕС, працююча на трісці деревини, Італія; б) гвинтовий генератор біомаси.

[<https://www.lippel.com.br/>]

На території України ці конструкції також починають набувати популярності.

ПАТ Славутський солодовий завод. У 2014 році у межах модернізації і збільшення продуктивності Славутського солодового заводу компанія Watzenrode реалізувала проєкт переведення котельні заводу на біомасу з метою утилізації зернових відходів виробничого процесу солодовні (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Силоси для зернових відходів [<https://watzenrode.com/>]

Вітчизняним підприємством ПП «ВКФ «КРЕАТИВ ГРУП» [47] було успішно реалізовано більше 10 спірально-фальцевих силосів для зберігання біомаси в твердому вигляді (рис. 5.4 – 5.7).

Коростенський завод МДФ. У 2016 році на території Коростенського заводу МДФ були побудовані спірально-фальцеві силоси для пелет, сухої та вологої тріски деревини (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Коростенський завод МДФ, спірально-фальцеві силоси для сухої та вологої тріски деревини

Габарити силосу для пелет: висота циліндричного корпусу – 23,6 м, діаметр силоса – 16,5 м, об'єм зберігання – 5 043 м³. Габарити силосів для тріски деревини: висота циліндричного корпусу – 17 м, діаметр силоса – 12,84 м, об'єм зберігання – 2 200 м³.

Криворізький МЕЗ. Спірально-фальцеві силоси для зберігання лушпиння соняшнику побудовані у 2019 році. Два силоси місткістю – 340 м³, та один силос місткістю 125 м³, з можливістю вивантаження на автотранспорт (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Котельня, працююча на лушпинні соняшника, м. Кривий Ріг

ТОВ "Компанія Інтер-Ліс". У 2019 році були виконані роботи з монтажу водонапірної вежі місткістю 300 м³, заввишки 20 метрів та силосу для тріски деревини місткістю 600 м³ на території компанії в м. Кременчук.

У 2021 році був побудований силос для тріски деревини в м. Полтаві (рис.5.6). Геометричні характеристики силоса: об'єм – 300 м³, діаметр – 5,6 м, висота корпусу – 16,6 м.

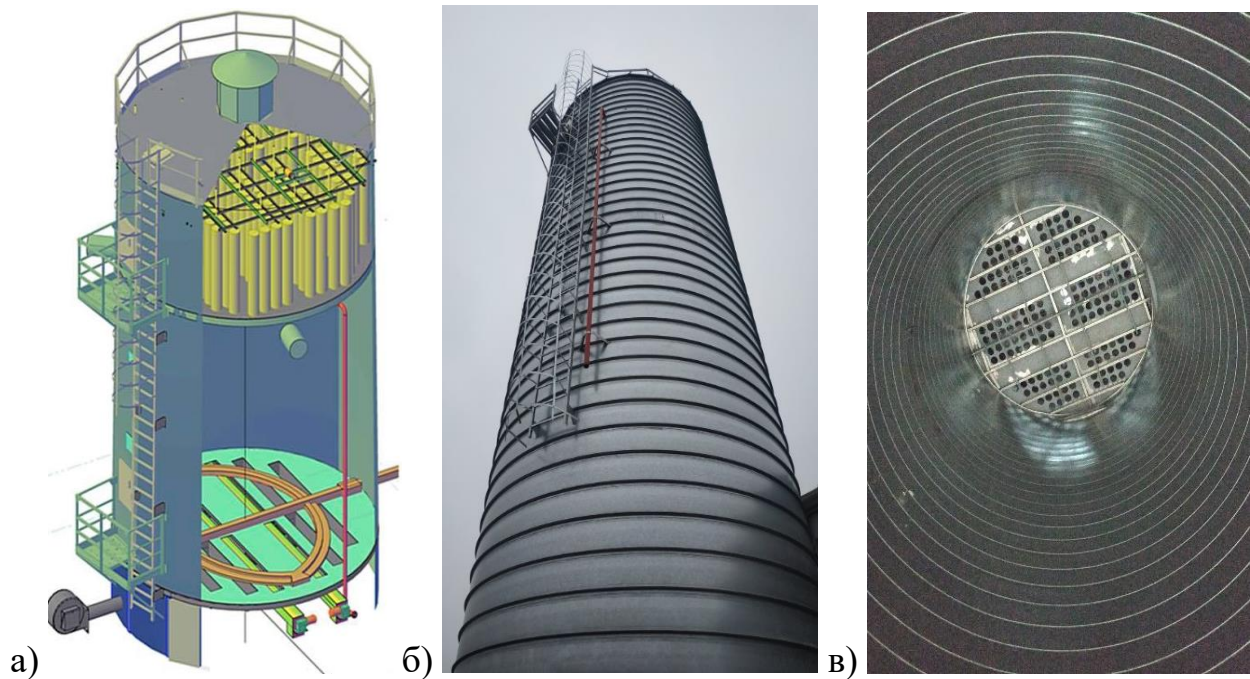


Рис. 5.6. Спірально-фальцевий силос для зберігання тріски в м. Полтава: а) 3d модель; б) загальний вигляд; в) вигляд всередині.

[<https://www.creative-silo.com/>]

Силосний склад є повністю автоматизованим, завантаження тріски відбувається за допомогою пневматичного обладнання, розвантаження – транспортерами, для попередження злежування та змерзання матеріалу всередині розміщений радіально-поворотний зачисний шнек, який забезпечує безперервне вивантаження (рис. 5.7, а). Система аспірації контролює викиди пилу під час завантаження силосу, система пожежогасіння, встановлена під покрівлею, попереджає самозаймання матеріалу (рис. 5.7, б, в).

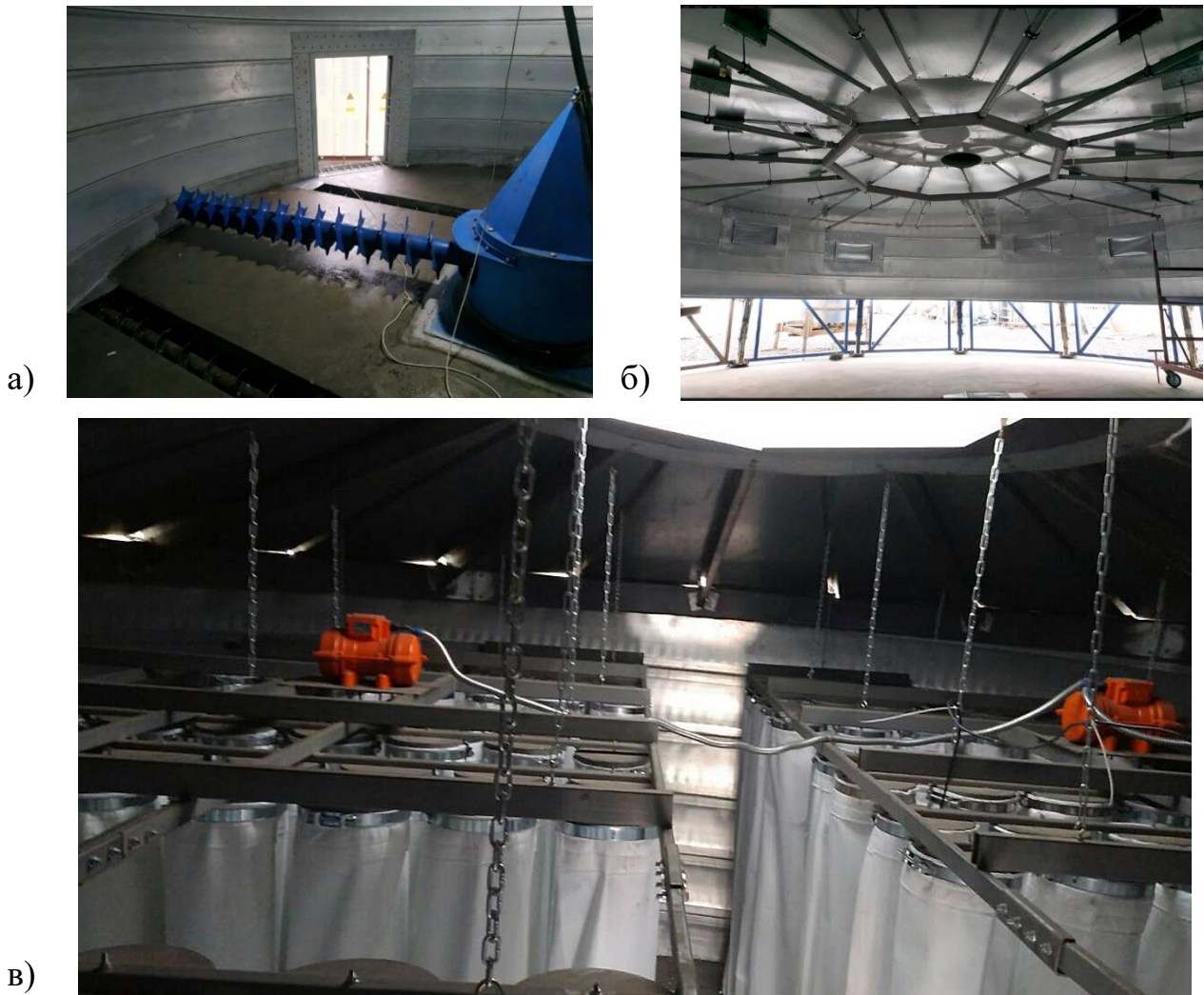


Рис. 5.7. Обладнання силосу для тріски деревини : а) радіально-поворотний зачисний шнек; б) система пожежогасіння; в) система аспірації.

[<https://www.creative-silo.com/>]

Річковий термінал, м. Кам'янське. Річковий термінал був побудований у 2019 році (рис. 5.8). На території підприємства розміщені автомобільні ваги, лабораторія відбору зразків, авторозвантаження, 6 металевих ємностей для зберігання матеріалу та естакада завантаження на корабель. Елеваторна потужність зберігання – 4 спіральньо-фальцеві силоси по 5 тис. т. кожен та 2 оперативні спіральньо-фальцеві ємності по 600 т.

Габарити спіральньо-фальцевих силосів: діаметр 20 м, висота 18 м, товщина металу стінки 2 – 4 мм. Технологічне призначення силосів – накопичення та зберігання очищеного та сухого зерна перед відвантаженням на баржу.

Оперативні ємності – це спірально-фальцеві силоси з конусним дном, в яких передбачається зберігання зерна, яке потребує очищення. Розміри оперативних ємностей: діаметр 6,4 м, висота 15 м.

Завантаження силосів відбувається через центральні отвори у покрівлі силосів.



Рис. 5.8. Річковий термінал, м. Кам'янське

5.2. Досвід експлуатації металевих спірально-фальцевих силосів на території України.

ТОВ Ємилівське ХПП. Міцність і працездатність спірально-фальцевих силосів підтверджується вітчизняним багаторічним досвідом. Найстарший елеватор в Україні зі спірально-фальцевими силосами знаходиться у селі Ємилівка, Кіровоградської області (рис. 5.9), був введений в експлуатацію у 1971 році.

На території підприємства розміщені склади ємністю 42 тис. т. та металеві елеватори: 6 спірально-фальцевих силосів по 3 тис. т. кожен та збірні болтові силоси загальною місткістю 21 тис. т. Потужність елеватора 60 тис. т. одночасного зберігання продукції.



Рис. 5.9. Спірально-фальцеві силоси, ТОВ Ємилівське ХПП

Силоси спірально-фальцевого типу були побудовані без єдиного вертикального ребра жорсткості, при діаметрі корпусу силосу 16,5 м та висоті – 18 м. Однак через більш ніж 30 річну експлуатацію без вертикальних ребер на одному із силосів почали з'являтися прогини у міжфальцевій зоні (рис. 5.10, а), що у свою чергу могло призвести до аварії всього силосу. У зв'язку з цим було прийнято рішення підсилити стінку силосу зовнішніми вертикальними ребрами (рис. 5.10, б), після чого силоси й надалі безпечно експлуатуються.

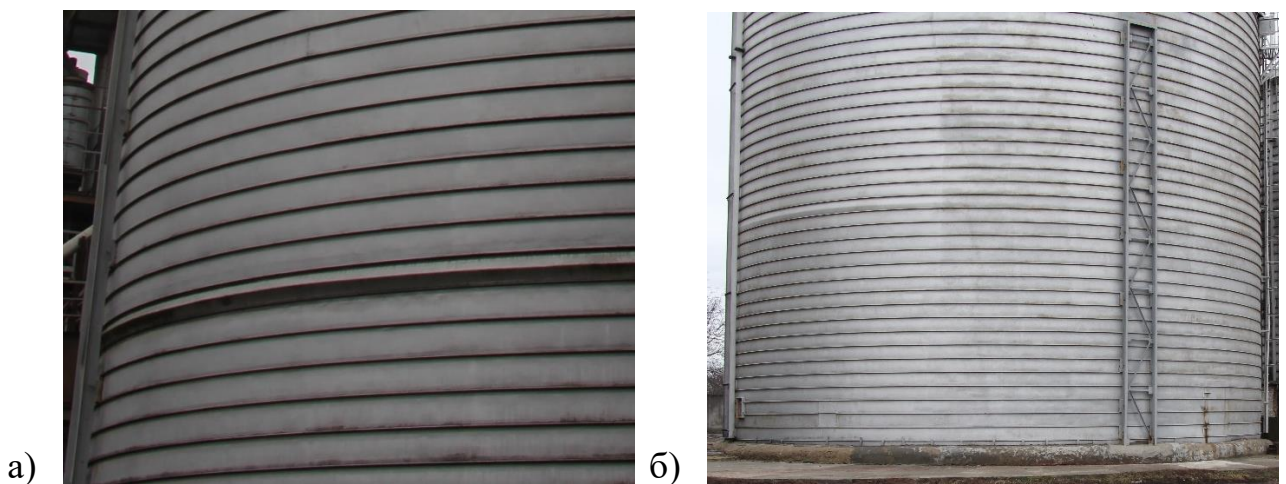


Рис. 5.10. Спірально-фальцеві силоси: а) прогин міжфальцевої зони;
б) підсилення корпусу силоса зовнішніми вертикальними ребрами

Ботієвський елеватор. Ботієвський елеватор (рис. 5.11) розміщений у с. Строганівка, Запорізької обл., був введений в експлуатацію в 1973 р. На території розміщені склади ємністю 32 тис. т. та металеві силоси спірально-фальцевого типу ємністю 24 тис. т [139]. Елеватор має лінії авторозвантаження та автозавантаження, завантаження на корабель (на час проведення обстеження не працювало), очищення та сушіння зерна.



Рис. 5.11. Ботієвський елеватор

У 1986 році, у межах модернізації, фірмою «ПОЛТАВАЕЛЕВАТОРБУД» були побудовані спірально-фальцеві силоси. Силоси проектувались та експлуатувались як оперативні ємності, тобто за рік мали декілька циклів розвантаження-завантаження, кількість циклів окремих ємностей могла дорівнювати 5-6 разів на рік. Габарити силосів – діаметр 18 м, висота 19 м, загальна ємність 3 тис. т. Товщина корпусу по всій висоті однакова – 5 мм. Усередині силосу розміщені вертикальні ребра (рис. 5.12) зі швелерів, які приварені до корпусу за допомогою пластин. Частина ребер розміщені на нижніх 4-х ярусах силосу, інші доходять до середини висоти корпусу. Ребра різної висоти чередуються.



Рис. 5.12. Ребра жорсткості всередині силосу

Покрівля силосу (рис. 5.13, 5.14) – конічна, металева, фальцева, без крокв'яної системи. Листи покрівлі приварені зверху до завантажувального кільця, знизу до корпусу силосу. Для підсилення листів та фальцевого з'єднання, усередині силосу, встановлений бандаж із труби по листах покрівлі (рис. 5.14). Покрівля працює як розпірна система, все навантаження від покрівлі несе корпус силоса.



Рис. 5.13. Фальцева покрівля силосу

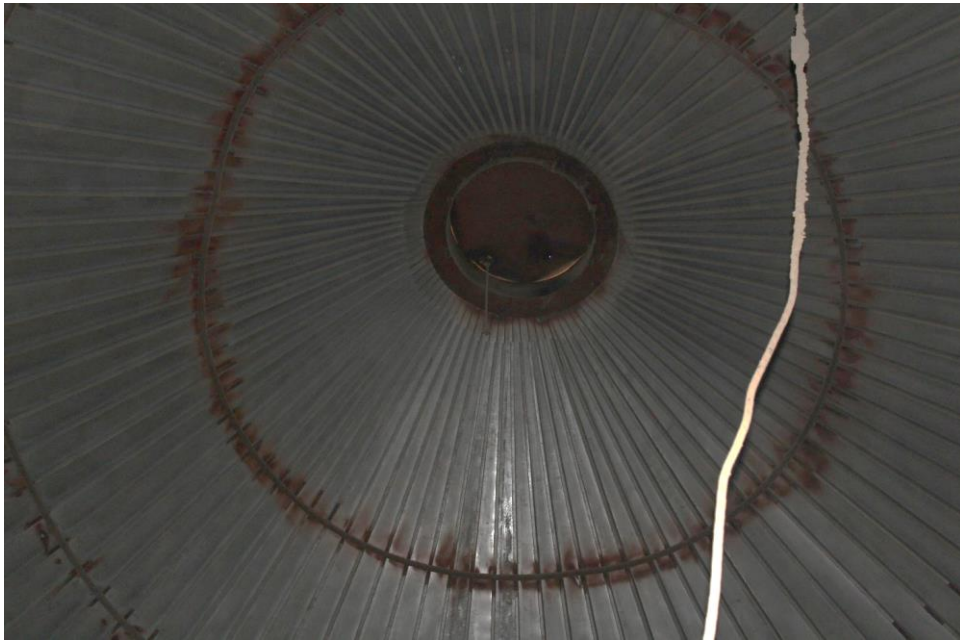


Рис. 5.14. Фальцева покрівля силосу, вигляд зсередини

Завантаження силосів відбувається через верхнє, центральне кільце. Транспортна галерея опирається на опори, що прикріплені до корпусу силосу (рис. 5.15, 5.16). По висоті корпусу силосу опори виконані з 2 швелерів, які за допомогою кутиків прикріплені до корпусу. Кутики в міжфальцевій зоні приварені до корпусу, швелери з кутиками з'єднані болтами (рис. 5.17).



Рис. 5.15. Транспортна галерея



Рис. 5.16. Кріплення транспортної галереї на силос



Рис. 5.17. Кріплення опор до корпусу

Розвантаження силосу було запроєктоване центральне, самопливне. Під силосами розміщена підземна галерея, у фундаменті ємності, по центру розміщені отвори для розвантаження (рис. 5.18).



Рис. 5.18. Канали для розвантаження силосу



Рис. 5.19. Аероканали для підключення вентиляторів для розвантаження силосу

За проєктом, розвантаження силосу повинно було відбуватись за наступною технологією: зерно самопливом повинно було витікати в підземну галерею, коли центр силоса розвантажився, вмикались вентилятори СВМ-6

(рис. 5.19), що розміщені по бокам силосу, 14 вентиляторів з кожної сторони. Потоки повітря повинні були здувати зерно з боків до центру. Технологія себе не виправдала при першому розвантаженні силосу.

У зв'язку з цим, було запроєктовано сідлоподібне дно (рис. 5.20). До корпусу силосу були приварені металеві листи з двох сторін, листи підкріплювались опорами. Таке рішення дозволяло стікатись зерну до центру, для повного розвантаження самопливом, але в той же час зменшувало об'єм зберігання.

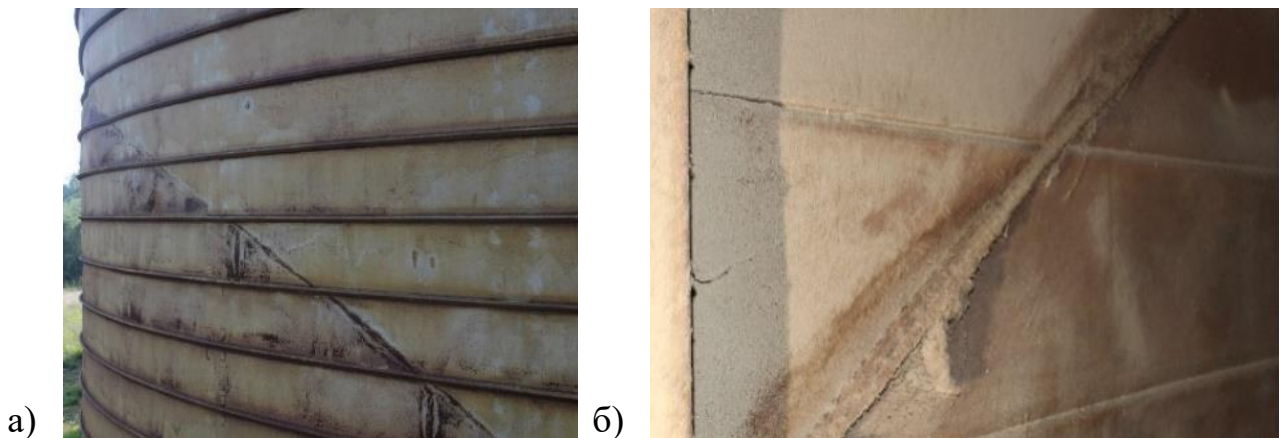


Рис. 5.20. Наслідки приварювання сідлоподібного дна до корпусу силосу:

а) вигляд ззовні; б) вигляд зсередини

При першому вивантаженні силосу, конструкція сідлоподібного дна не витримала, під натиском зерна одна половина обвалилась, що призвело до значних бічних сил на стінку силосу. Стінка ємності деформувалась у місці приварювання дна та у верхній частині під покрівлею.

Деформування стінки, спричинені аварією, були незначні, силос залишився цілим та був в експлуатації й надалі на протязі 35 років. Після обвалу конструкції дна (рис. 5.20, б), було вирішено встановити зачисний шнек для повного розвантаження силосу.

Силосний парк Ботієвського елеватора – приклад надійності і довговічності конструкцій спіральньо-фальцевих силосів. Після 35 років експлуатації та пережитої аварії, конструкції силосів залишились у задовільному технічному стані. Поважний вік конструкцій видає корозія на поверхні силосів,

зважаючи на те, що лакофарбове покриття не відновлювалось на протязі всіх років експлуатації. Ці дефекти є незначними, й ємності придатні для подальшого використання.

Завод насіння ТОВ «РОСТ-АГРО». Найбільший елеватор у Полтавській області зі спірально-фальцевими силосами знаходиться у с. Погреби, Кременчуцького р-ну. На території підприємства ТОВ «РОСТ-АГРО» розміщені напольні склади, технологічні лінії та два силосних елеватора (рис. 5.21).



Рис. 5.21. Елеватор ТОВ «РОСТ-АГРО»

Під номером 1 на рисунку 5.21 зображено силосний елеватор загальною місткістю 8 000 т., 10 спірально-фальцевих силосів, об'ємом 1020м^3 кожен, геометричні характеристики силосів – $H=22,5$ м, $d=8$ м. Фундаменти виконані з монолітного залізобетону, дно металеве сідлоподібної форми (рис. 5.22, б).

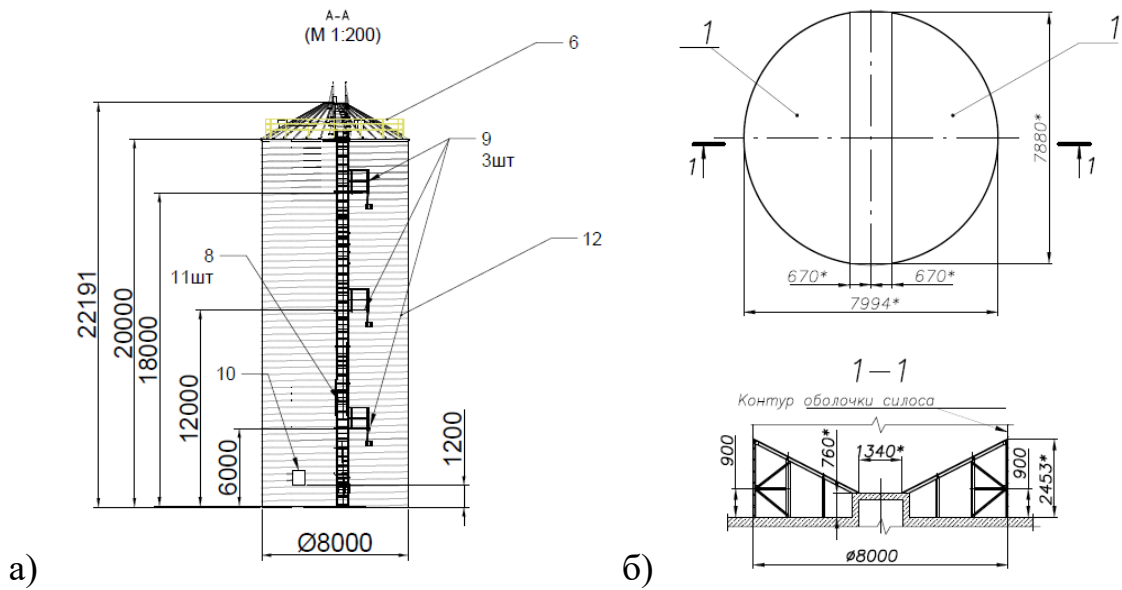


Рис. 5.22. Креслення силосу: а) геометричні характеристики; б) сідловидне дно.

Товщина стінки силосу 3 – 2 мм. Для забезпечення жорсткості силосу, всередині конструкції з інтервалом в 1,6 м встановлюються вертикальні стійки (рис. 5.23), що забезпечують стінці ємності додаткову міцність, закріплення ребер на стінці виконано за допомогою болтів.



Рис. 5.23. Вертикальні ребра корпусу спіральньо-фальцевого силосу

Конічна покрівля силосу (рис. 5.24) являє собою легкий сталевий каркас, на якому закріплені листи з профільної оцинкованої сталі. Дах має пристрій для

завантаження зерна, сходи для обслуговування, оглядовий люк і дефлектори (рис. 5.24, б).

Надсилосна естакада (рис. 5.24, а) використовується для розміщення та обслуговування верхніх транспортерів, які подають зерно в силоси для зберігання і являє собою просторову несучу металоконструкцію, що складається із окремих елементів - ферм, які спираються на ребра жорсткості.

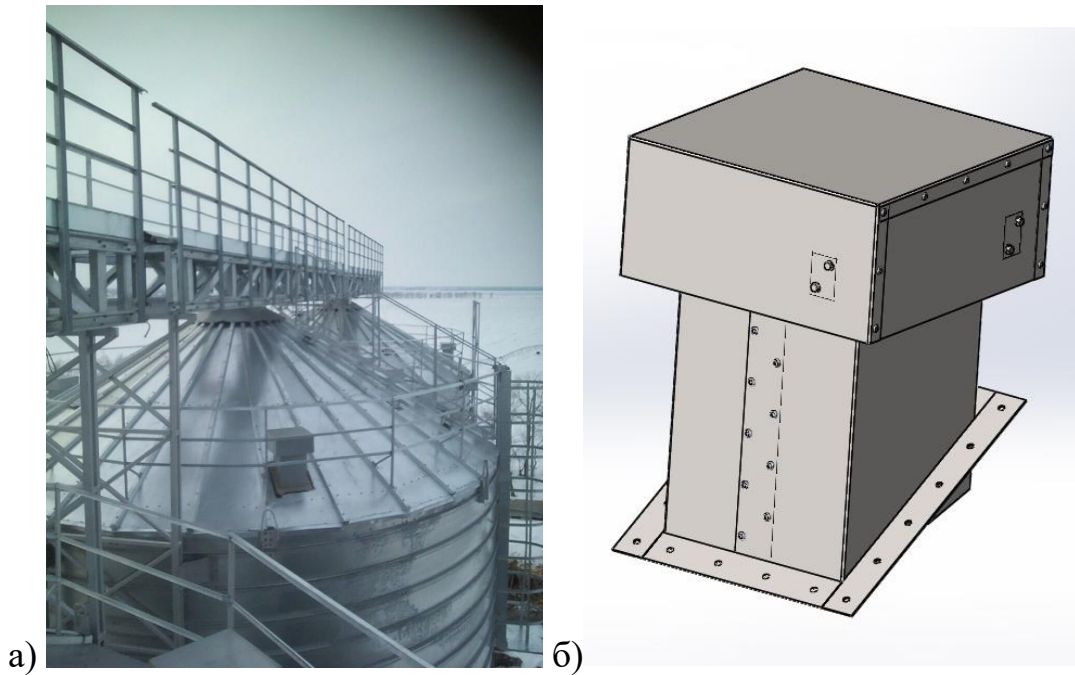


Рис. 5.24. Покрівля силосу: а) загальний вигляд; б) дефлектор.

Завантаження зерна організовано через центральний отвір, розміщений у покрівлі. Транспортування зерна від норії до силосу відбувається за допомогою системи транспортерів («джамп» система). «Джамп» система складається з ряду транспортерів, які поверхово з'єднані між собою (рис. 5.25).



Рис. 5.25. «Джамп» система транспортування зерна

Також у силосах передбачалась система безпечного завантаження зерна (рис. 5.26, а). Вона передбачала стікання зерна по спіралі при завантаженні й забезпечувала його цілісність від розбиття при падінні з висоти, що відбувається при звичайному завантаженні. При першому завантаженні система себе виправдала, й забезпечила цілісність зерна. Однак система зазнала аварії при першому вивантаженні зерна (рис. 5.26, б), оскільки воронка при витіканні зерна утворила значні розтягуючі зусилля, які вирвали кріплення системи безпечного завантаження зерна з конструкції покриття.

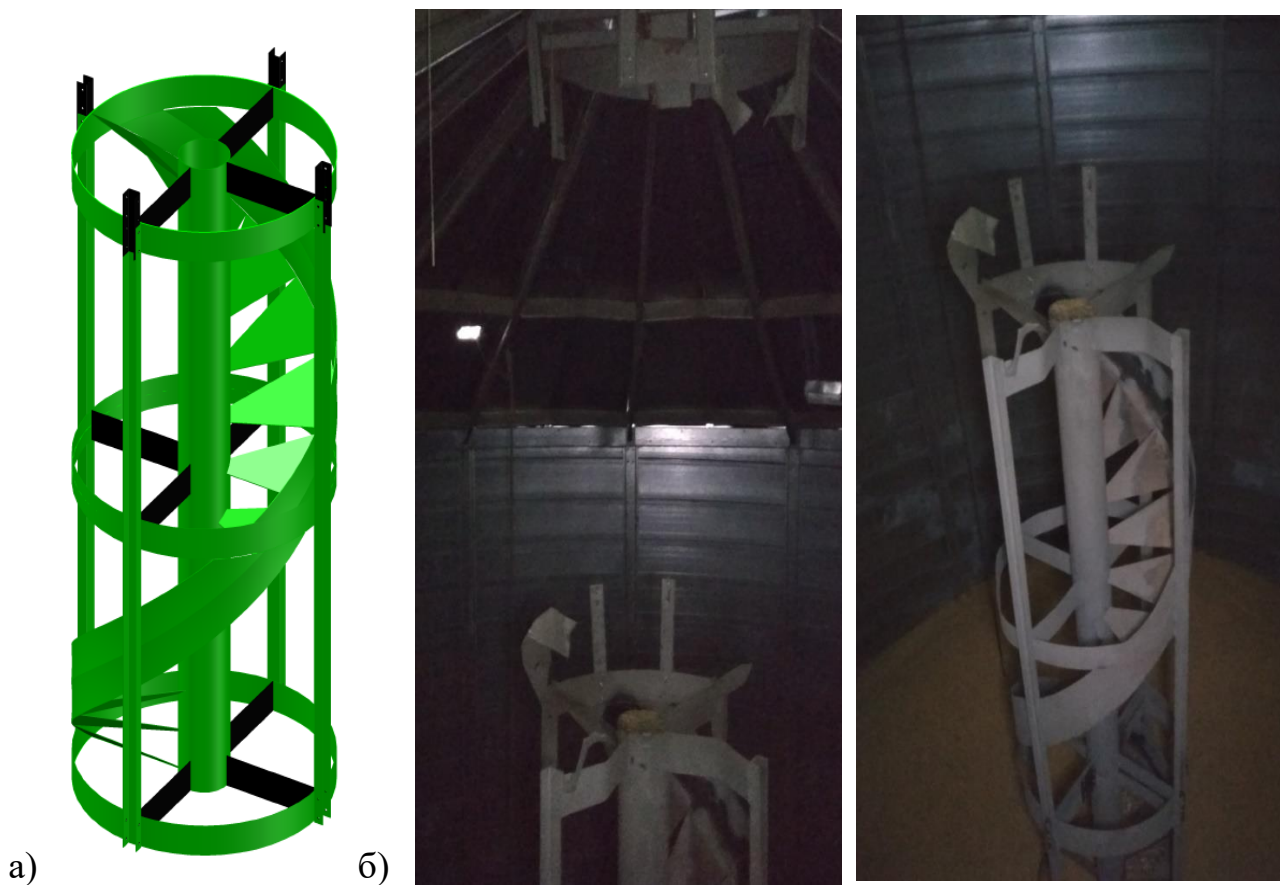


Рис. 5.26. Система безпечного завантаження зерна: а) 3D модель; б) аварія системи безпечного завантаження зерна

На етапі експлуатації, для перевантаження зерна з однієї технологічної лінії на іншу, в одному з силосів було змонтовано систему бічного завантаження зерна (рис. 5.27).



Рис. 5.27. Система бічного завантаження зерна

Під номером 2 на рисунку 5.21 зображено силосний елеватор загальною місткістю 5 520 т., 10 спірально-фальцевих силосів, геометричні характеристики: $H=17$ м, $d=7,3$ м, об'ємом 1005 м³ кожен, (рис. 5.28, а). Фундаменти виконані з монолітного залізобетону, дно конусне металеве (рис. 5.28, б).

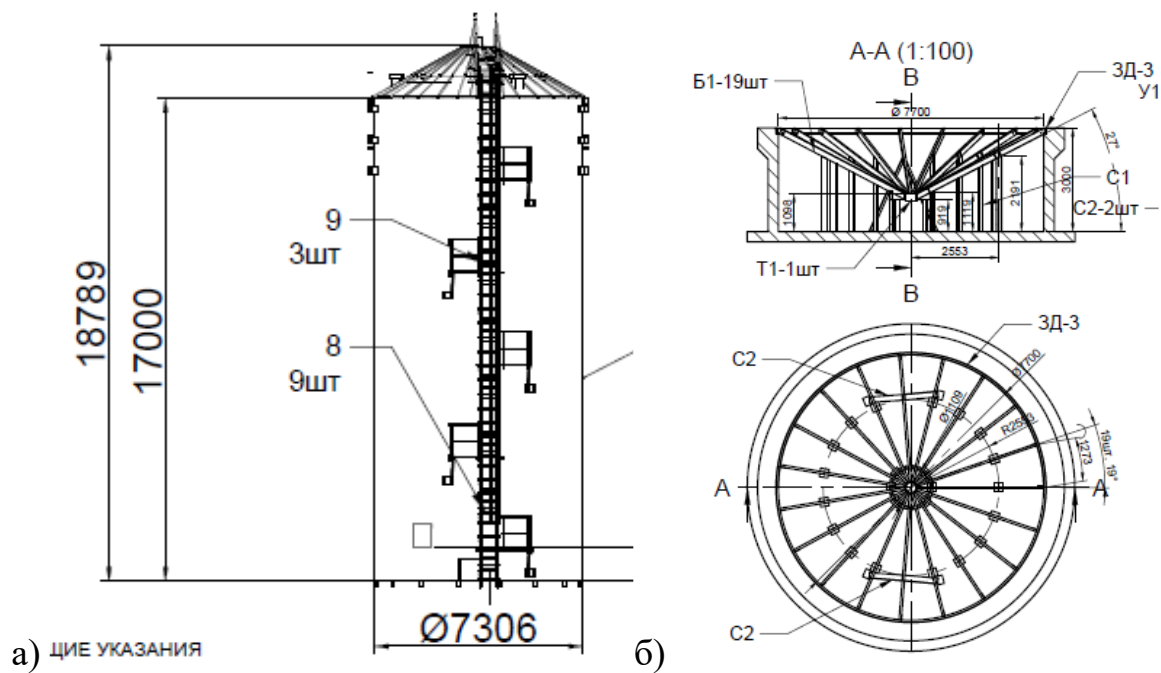


Рис. 5.28. Креслення силосу: а) геометричні характеристики; б) конусне дно.

Товщина стінки силосу 3-2 мм. Для забезпечення жорсткості силосу, всередині конструкції розміщені вертикальні ребра.

Покрівля силосу – конічна, складається із металевого каркасу та листової сталі. Вентиляційні труби з сіткою для захисту від птахів використовуються для природної вентиляції.

Силоси обладнані зовнішніми сходами, вентиляційними системами, відцентровими вентиляторами, зачистними шнеками, системою контролю температури, датчиками верхнього і нижнього рівня.

Завантаження силосів виконується через центральний отвір у даху з допомогою конвеєрів. Прийом зерна виконується з автомобільного транспорту. За сезон роботи загальна потужність переробки насіння передбачається до 6000т.

Аварії спірально-фальцевих силосів. Аварії тонкостінних ємностей не є рідким явищем [32, 69, 78, 88]. Помилки в проєктуванні та експлуатації є одними з найвірогідніших причин аварій. Вивчаючи випадки руйнування сталевих силосів, можна заключити, що більшість зруйнованих конструкцій мають проблему недостатньої проєктної міцності як фундаменту, так і самої ємності.

На рисунку 5.29, а зображено приклад аварії силосу через нерівномірне осідання фундаменту. Силос із конусним дном, було запроєктовано для зберігання цементу. При першому завантаженні, основа під фундаментом просіла, що призвело до згину стійок конусного дна та подальшого руйнування всієї конструкції.

Правильна експлуатація також відіграє важливу роль. Силос повинен підлягати тим навантаженням, на які він був розрахований. В якості прикладу, силос для зберігання тріски деревини був розрахований на пневматичне завантаження. При завантаженні, пневмотранспортер був налаштований на подачу матеріалу, при значно більшому тиску ніж вказувалось, також були закриті вентиляційні канали. У результаті виник надмірний тиск усередині конструкції, що призвело до деформації стінки силосу (рис 5.29, б). Не дивлячись

на аварійну ситуацію деформування стінки були незначні, силос залишився цілим та був придатний до експлуатації.



Рис. 5.29. Аварії силосів спіральньо-фальцевого типу:

- а) аварія, через нерівномірне осідання фундаменту ; б) деформування стінки, через неправильну експлуатацію.

Досвід експлуатації та аварій підтверджує важливість експериментальних досліджень елементів спіральньо-фальцевих конструкцій не тільки на експлуатаційні навантаження, але й позаграничні впливи.

5.3.Висновки по розділу

У даному розділі проведено формування даних прикладів будівництва металевих спіральньо-фальцевих силосів на території України. Розглянуто технічні характеристики силосів та області їх застосування.

1. Описано досвід експлуатації металевих спіральньо-фальцевих силосів на прикладі двох елеваторів. Розглянуто силосний парк підприємства ТОВ Ємилівське ХПП. Спіральньо-фальцеві силоси даного підприємства

підтверджують довговічність таких конструкцій, які знаходяться в експлуатації з 1971р.

2. Проведено огляд силосного парку Ботієвського елеватора (Запорізька обл.). На основі огляду зроблено висновок про надійність спірально-фальцевих силосів. Із досвіду експлуатації Ботієвського елеватора доведено, що системи розвантаження та завантаження силосу є важливими технологічними процесами, які впливають не тільки на продуктивність елеватора, але при неправильному проектуванні та експлуатації можуть призвести до аварій.

3. Розглянуто інші приклади аварій спірально-фальцевих силосів та проаналізовано причини, які їх спричинили.

Результати даного розділу опубліковані у роботах [59, 62, 63, 139].

РОЗДІЛ 6

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ

Одним з важливих техніко-економічних параметрів будь-яких конструкцій є їхня надійність. Треба відмітити, що на сьогодні розрахунок надійності конструкцій сталевих силосів залишається не розробленим. Це обумовлено головним чином тим, що міцнісні, геометричні та деформаційні характеристики конструкцій силосів, а також всі впливи на них є випадковими величинами або випадковими процесами.

6.1. Імовірнісна природа тиску сипучого матеріалу

Статистичні характеристики сипучих матеріалів. Основні навантаження на силосну ємність – це випадковий тиск сипучого матеріалу. Імовірнісна природа тиску обумовлена статистичним розкидом характеристик сипучого матеріалу, що виявляється лабораторними випробуваннями. До числа таких характеристик відносять: питому вагу $\tilde{\gamma}$, кут внутрішнього тертя $\tilde{\lambda}$, коефіцієнт бокового тиску $\tilde{\varphi}$ і коефіцієнт тертя об стіну $\tilde{\mu}$. Процедура кількісної оцінки статистичних характеристик сипучого матеріалу наведена в ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [106].

Відповідно до ДСТУ-Н Б EN1991-4:2012 значення характеристик добре відомих матеріалів повинні прийматися згідно таблиці Е.1. Вказані там значення відповідають верхньому характеристичному значенню питомої ваги γ і середнім значенням для μ_m , $K_m(\lambda)$ і ϕ_{im} . Для визначення характеристичних значень μ , $K(\lambda)$ і ϕ_i табличні значення μ_m , $K_m(\lambda)$ і ϕ_{im} слід помножити або розділити на поправочні коефіцієнти a з таблиці Е.1.

У табл. 6.1 наведені статистичні характеристики деяких сільськогосподарських культур та сипучих матеріалів. Верхня та нижня межа,

математичне очікування та коефіцієнт варіації розраховувались відповідно до [106]. Значення коефіцієнта тертя об стінки μ , розраховані в таблиці для поверхні D2.

Таблиця 6.1

Статистичні характеристики сипучих матеріалів

| Сипучий матеріал | Питома вага, кН/м ³ | | | | Кут внутрішнього тертя, град. | | | |
|----------------------|--------------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------------------------|-----------------|-------------|-------------|
| | $\gamma_{g,b}$ | $\gamma_{g,t}$ | m_g | V_g | $\varphi_{g,b}$ | $\varphi_{g,t}$ | m_φ | V_φ |
| Кукурудза | 7 | 8 | 7,50 | 0,052 | 27,2 | 35,3 | 31 | 0,1 |
| Соя | 7 | 8 | 7,50 | 0,052 | 21,6 | 29,0 | 25 | 0,12 |
| Пшениця | 7,5 | 9 | 8,25 | 0,071 | 26,8 | 33,6 | 30 | 0,09 |
| Борошно | 6,5 | 7 | 6,75 | 0,029 | 39,6 | 44,5 | 42 | 0,05 |
| Цемент | 13 | 16 | 14,50 | 0,081 | 24,6 | 36,6 | 30 | 0,16 |
| Цементний клинкер | 15 | 18 | 16,50 | 0,071 | 33,3 | 48,0 | 41 | 0,14 |
| Кокс | 6,5 | 8 | 7,25 | 0,081 | 26,7 | 36,0 | 32 | 0,11 |
| Дрібна зола | 8 | 15 | 11,50 | 0,238 | 30,2 | 40,6 | 35 | 0,12 |
| | Коефіцієнт бічного тиску | | | | Коефіцієнт тертя об стінки | | | |
| | $\lambda_{g,b}$ | $\lambda_{g,t}$ | m_λ | V_λ | $\mu_{g,b}$ | $\mu_{g,t}$ | m_μ | V_μ |
| Кукурудза | 0,46 | 0,60 | 0,54 | 0,1 | 0,29 | 0,45 | 0,37 | 0,17 |
| Соя | 0,57 | 0,70 | 0,63 | 0,08 | 0,33 | 0,44 | 0,39 | 0,11 |
| Пшениця | 0,49 | 0,60 | 0,54 | 0,08 | 0,33 | 0,44 | 0,39 | 0,11 |
| Борошно | 0,32 | 0,40 | 0,36 | 0,08 | 0,28 | 0,38 | 0,34 | 0,11 |
| Цемент | 0,45 | 0,65 | 0,55 | 0,14 | 0,43 | 0,49 | 0,46 | 0,05 |
| Цементний клинкер | 0,29 | 0,50 | 0,39 | 0,21 | 0,52 | 0,60 | 0,56 | 0,05 |
| Кокс | 0,45 | 0,60 | 0,52 | 0,11 | 0,48 | 0,60 | 0,54 | 0,09 |
| Дрібна зола | 0,38 | 0,55 | 0,47 | 0,14 | 0,58 | 0,66 | 0,62 | 0,05 |

Тріска деревини як сипучий матеріал. У таблиці Е.1 [106] наведені статистичні характеристики найпоширеніших сипучих матеріалів, які можуть зберігатися у силосних ємностях. Варто відмітити, що з розвитком біоенергетики силосні конструкції почали застосовуватися також як склади біомаси.

Найрозповсюдженішим видом біомаси є тріска деревини. У ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 немає інформації щодо статистичних характеристик тріски деревини, тому в даній роботі був проведений аналіз даних, зібраних із різних джерел інформації щодо характеристик цього матеріалу.

Силоси вважались раніше непридатними для зберігання сипучих матеріалів, схильних до злежування та змерзання, таких як тріска, через неможливість контролювання процесів всередині ємності та важкість передбачення поведінки матеріалу та його дію на конструкцію. Тріска, яка злежалась та змерзлась, здатна утворювати моноліт, як правило, у випускній воронці або в місці примикання воронки до верхньої частини силосу, закупорюючи отвори, тим самим перешкоджаючи гравітаційному розвантаженню тріски, і, як наслідок, безперервній подачі тріски в виробництво.

За геометричною формою деревних частинок, їх розмірами і складом тріска характеризується як однорідний сипучий матеріал. Однак треба розуміти, якими саме властивостями сипучий матеріал відрізняється від твердих тіл: рухливістю часток; здатністю приймати форму ємності, в якій він перебуває; властивістю тиснути на огорожуючу поверхню; незначною здатністю чинити опір зсувним зусиллям від діючих стискаючих сил.

Структура тріски, як сипучого тіла, є найважливішим фактором, що визначає її механічні властивості. Ряд робіт присвячено дослідженню цього питання [28, 30, 34, 46, 50, 53, 55, 77]. Для тріски характерні зв'язність частинок, їх рухливість, здатність змерзатись та злежуватись, ущільнюватись при статичних і динамічних впливах, утворювати склепіння при витіканні з бункерів і силосів. При вільному відсіпанні частинки тріски утворюють конусну купу з певним кутом до основи. Як матеріал органічного походження, тріска

гігроскопічна, схильна до ураження мікроорганізмами. Подібно іншим рослинним матеріалам, велика маса тріски володіє здатністю самозігріватися і при певних умовах самозайматися. Основними параметрами, що характеризують властивості тріски, є об'ємна маса, вологість, коефіцієнт повнодеревності, коефіцієнт ущільнення, кут природного ухилу, коефіцієнт внутрішнього тертя, початковий опір зрушенню, коефіцієнт тертя-ковзання по різній поверхні.

Об'ємна маса тріски характеризує щільність її укладання і визначається вмістом маси вологої деревини у виміряному обсязі тріски. Об'ємна маса залежить від щільності подрібнюваної деревини, вологості сировини, коефіцієнта повнодеревності тріски, а також ступеня її ущільнення і фракційного складу. У табл. 6.2 приведена об'ємна маса тріски різного ступеня ущільнення та вологості.

Таблиця 6.2

Об'ємна маса тріски деревини

| Джерело | Порода деревини | Об'ємна маса, кг/м ³ |
|--|-----------------|---------------------------------|
| [131] | сосна | 320 – 400* |
| | ялина | 245 – 360* |
| | береза | 340 – 420* |
| | тополя | 286 – 356* |
| [62] | усі породи | 280 – 350* |
| [104] | усі породи | 240 – 400* |
| [19] | сосна | 187 – 335** |
| | ялина | 162 – 295** |
| | модрина | 239 – 436** |
| | береза | 234 – 414** |
| Примітки: * нижнє значення – для вільно-насіпного стану, верхнє – для ущільненого стану; ** питома вага вільно-насіпної тріски в залежності від її вологості, нижнє значення при вологості 12%, верхнє – 120% | | |

Переведення обсягу тріски в щільну деревну масу визначається коефіцієнтом повнодеревності – найважливішою характеристикою в системі обліку вироблюваної тріски. Коефіцієнт залежить від гідротермічного стану

тріски, умов її завантаження та дальності транспортування. Значення коефіцієнта повнодеревності: для вільно насипаної тріски – $k = 0,36$; транспортування до 50 км – $k = 0,4$; перевезення понад 50 км – $k = 0,42$; у кінці транспортування на відстань від 500 км – $k = 0,43$. Тріску у вільно насипаному стані можна вважати лише в момент відсипання. Через нетривалий час під дією статичних навантажень від власної ваги тріска поступово самоущільнюється, змінюється її коефіцієнт повнодеревності. Значне ущільнення тріски спостерігається під впливом динамічних навантажень, що виникають, наприклад, при пневмозавантаженні або транспортуванні.

У залежності від фракційного складу, форми часток, ступеню наповненості пор вологою, ущільнення значення насипної маси одного й того ж матеріалу може відхилитися на 200 – 250 %.

Вологість деревної сировини, що подрібнюється у тріску в лісозаготівельних виробництвах, зазвичай становить 70 – 90%. Як видно з табл. 6.2, вологість тріски значним чином впливає на її об'ємну масу. Збільшення вологості, як правило, погіршує характеристику витікання матеріалу. У трісці зі збільшенням вологи збільшуються сили зчеплення часток, що сприяє утворенню грудок і статичних склепінь над отвором воронки силосу. Витікання такого матеріалу із отвору ємності значно ускладнюється.

Сипучість матеріалу – один з основних факторів, що впливають на можливість зберігання матеріалу в бункерах та силосах. Сипучістю називають такий стан матеріалу, при якому між його частинками відсутній суцільний матеріальний зв'язок. Оцінюванню сипучості матеріалу присвячено ряд робіт [50, 122].

Рухливість тріски характеризується кутом природного укосу, коефіцієнтом внутрішнього тертя, початковим опором зрушенню, коефіцієнтом тертя по поверхні.

Величина кута природного укосу змінюється для тріски в межах 30 – 40° і залежить від рухливості частинок. Чим більшою рухливістю вони володіють,

тим менше кут природного укосу. Хоча експериментальні дослідження доводять, що кут природного ухилу може приймати значно більші значення: для тріски сосни фракції 20 мм в межах $39 - 49^\circ$, 10 мм – $36 - 46^\circ$, 5мм – $32 - 58^\circ$.

Рухливість частинок, які злежалися при тривалому зберіганні тріски, значно менше, ніж частинок вільно відсипаної тріски. Вологість тріски також виявляє помітний вплив на її рухливість. Краща сипучість спостерігається у тріски зі зменшенням її вологості.

Іншою важливою характеристикою тріски як сипучого тіла є коефіцієнт внутрішнього тертя. Виникнення внутрішнього тертя в трісці пояснюється тим, що одні частинки входять у поглиблення між іншими частинками і затискаються ними. У [131] наведені кути внутрішнього тертя тріски, у залежності від породи деревини.

При вивантаженні тріски з силосу чи бункеру важливим показником є коефіцієнт тертя об стіни. Коефіцієнт тертя залежить від вмісту вологи в деревині і шорсткості поверхні. Ці показники практично не залежать від породи деревини. Коефіцієнти тертя по більшості матеріалів постійно зростають зі збільшенням вологості деревини від абсолютно сухої до вологої, а потім стають практично постійними з появою вільної вологи. Також відповідно до досліджень коефіцієнти тертя сухої деревини по жорстким, гладким поверхням знаходяться у діапазоні від 0,3 до 0,5; при середній вологості – від 0,5 до 0,7; і при вологій деревині – від 0,7 до 0,9.

На рухливість тріски впливає здатність її частинок змерзатись та налипати на різні поверхні. Змерзання тріски можливе тільки під дією ущільнюючого навантаження при вологості більше 80% і температурі не вище -5°C . Дослідження показали, що ущільнена тріска вологістю 70 – 75% не змерзається при температурі повітря до -30°C . Слабке змерзання тріски спостерігається при її вологості 80 – 90%. При вологості більше 90% виявлено значне змерзання тріски при низьких температурах, яке знижується при підвищенні температури і стає слабким при -10°C .

Ступінь змерзання залежить від змісту дрібної фракції в трісці. При значних кількостях дрібної фракції вологістю більш ніж 90% змерзання тріски спостерігається і при більш високих температурах (-5, -10 ° С). При змерзанні тріски механічна міцність сипучого тіла значно зростає. Тріска деревини, яка змерзлась, здатна утворювати моноліт, що призводить до зависання матеріалу та утворення склепінь.

Вологість тріски також вносить вирішальний вплив на її здатність примерзати до поверхонь. Тріска при вологості 80% не примерзає до дерев'яних, металевих і бетонних поверхонь, при вологості 95 – 110% спостерігається незначне примерзання, при вологості 110 – 130% відзначається виразне примерзання тріски до поверхонь.

У табл. 6.3 наведені статистичні характеристики питомої ваги тріски деревини. Верхня γ_t та нижня γ_b межа питомої ваги взяті з різних джерел, математичне очікування $\bar{\gamma}$ та коефіцієнт варіації V_γ розраховувались відповідно до [19].

Таблиця 6.3

Статистичні характеристика питомої ваги тріски деревини

| Джерело | Порода деревини | Питома вага, кН/м ³ | | | |
|---------|-----------------|--------------------------------|------------|----------------|------------|
| | | γ_b | γ_t | $\bar{\gamma}$ | V_γ |
| [62] | усі породи | 2,8 | 3,5 | 3,15 | 0,087 |
| [104] | | 2,4 | 4 | 3,20 | 0,195 |
| [131] | сосна | 3,2 | 4 | 3,60 | 0,087 |
| | ялина | 2,4 | 3,6 | 3,00 | 0,156 |
| | береза | 3,4 | 4,2 | 3,80 | 0,082 |
| | тополя | 2,86 | 3,56 | 3,21 | 0,085 |

У табл. 6.4 вказані інші статистичні характеристики тріски деревини. Як видно, коефіцієнт тертя об стіну $\tilde{\mu}$ суттєво змінюється у залежності від вологості тріски.

Таблиця 6.4

Статистичні характеристики кута внутрішнього тертя $\tilde{\lambda}$, коефіцієнта бокового тиску $\tilde{\varphi}$ і коефіцієнта тертя об стіну $\tilde{\mu}$ тріски деревини

| Найменування | Кут внутрішнього тертя, град. | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-------------|-----------------|---------------|
| | φ_b | φ_t | $\bar{\varphi}$ | V_{φ} |
| Тріска деревини | 28 | 35 | 31,50 | 0,087 |
| | Коефіцієнт бічного тиску | | | |
| | λ_b | λ_t | $\bar{\lambda}$ | V_{λ} |
| | 0,14 | 0,22 | 0,18 | 0,174 |
| Стан тріски деревини | Коефіцієнт тертя об стіну | | | |
| | μ_b | μ_t | $\bar{\mu}$ | V_{μ} |
| суха | 0,3 | 0,5 | 0,40 | 0,195 |
| середньої вологості | 0,5 | 0,7 | 0,60 | 0,130 |
| волога | 0,7 | 0,9 | 0,80 | 0,098 |

Одержані статистичні характеристики відкривають можливість для одержання оцінки надійності конструкції сталевих силосів для тріски деревини [62].

6.2. Оцінювання надійності силосу на основі аналізу резерву міцності з урахуванням кільцевих напружень

Оцінювання надійності металевого силосу будемо проводити на основі аналізу резерву міцності, який будемо визначати в просторі напружень наступним чином:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_2 \geq 0. \quad (6.1)$$

Випадковими величинами у поставленій задачі оцінювання надійності є:

$\tilde{\sigma}_y$ – випадкова величина межі текучості сталі.

$\tilde{\sigma}_2$ – випадкова величина кільцевих напружень.

Випадковий характер кільцевих напружень є наслідком імовірнісної природи тиску, обумовленої статистичним розкидом характеристик сипучого матеріалу. Ці напруження є функцією випадкових аргументів, таких як $\tilde{\gamma}$ – питома вага сипучих матеріалів; $\tilde{\lambda}$ – коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу; $\tilde{\varphi}$ – кут внутрішнього тертя, град; $\tilde{\mu}$ – коефіцієнт тертя сипучих матеріалів об стіни силосу.

Випадкова величина кільцевих напружень визначається за формулою (3.7):

$$\tilde{\sigma}_2 = \frac{\tilde{N}_2 \cdot r}{t}, \text{ де } \tilde{N}_2 = \sum \tilde{P}_h^n + \tilde{P}_{ht}^n.$$

$\sum P_h^n = P_h^n + P_{h1}^n$ – сума значень рівномірно розподілених горизонтальних тисків.

$$P_h^n = \frac{\gamma \rho}{\mu} (1 - e^{-\lambda \mu z / \rho}) - \text{рівномірно розподілений по периметру}$$

горизонтальний тиск сипучих матеріалів на стіни силосів на глибині Z (м) від верху засипу.

$P_{h1}^n = a_1 P_h^n$ – значення кільцевого горизонтального тиску, де a_1 – коефіцієнт місцевого підвищення тиску, що приймається згідно з вимогами 4.11. [101] в залежності від відношення h/d .

$P_{ht}^n = K_{t1} P_h^n$ – тиск від добової зміни температури зовнішнього повітря та перепаду температури за товщиною, який допускається замінювати додатковим горизонтальним тиском сипучого матеріалу на стіни силосу. З метою полегшення розрахунків тиск прийнятий рівномірно розподіленим по периметру і висоті. $K_{t1} = 0,4$ – для сталевих стін силосів.

Після перетворень отримуємо рівняння кільцевого тиску та кільцевого напруження:

$$\begin{aligned} \tilde{N}_2 &= \sum \tilde{P}_h^n + \tilde{P}_{ht} = \tilde{P}_h^n + a_1 \tilde{P}_h^n + K_{t1} \cdot \tilde{P}_h^n = \tilde{P}_h^n (1 + a_1 + K_{t1}) = \\ &= \frac{\tilde{\gamma} \rho}{\tilde{\mu}} \left(1 - e^{\left(\frac{-\tilde{\lambda} \cdot \tilde{\mu} \cdot z}{\rho} \right)} \right) \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\tilde{\sigma}_2 = \frac{\frac{\tilde{\gamma} \rho}{\tilde{\mu}} \left(1 - e^{\left(\frac{-\tilde{\lambda} \cdot \tilde{\mu} \cdot z}{\rho} \right)} \right) \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) \cdot r}{t} \quad (6.3)$$

Функція резерву міцності за формулою (1.8) для сталевого силосу за кільцевими напруженнями має вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(\tilde{\sigma}_y, \tilde{\gamma}, \tilde{\mu}, \tilde{\lambda}) &= \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \frac{\frac{\tilde{\gamma} \rho}{\tilde{\mu}} \left(1 - e^{\left(\frac{-\tilde{\lambda} \cdot \tilde{\mu} \cdot z}{\rho} \right)} \right) \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) \cdot r}{t} \geq 0 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Математичне очікування дорівнює за формулою (1.9):

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \bar{R} - \bar{S} = \bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_y - \frac{\bar{N}_2 \cdot r}{t} = \\ &= \bar{\sigma}_y - \frac{\frac{\bar{\gamma} \rho}{\bar{\mu}} \left(1 - e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)} \right) \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) \cdot r}{t} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Стандарт резерву міцності визначається відповідно до (1.10):

$$\hat{Y} = \sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}, \quad (6.6)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{dY}{d\sigma_y} \Big|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y}, \quad A_2 = \frac{dY}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}}, \quad A_3 = \frac{dY}{d\mu} \Big|_{\mu = \bar{\mu}}, \quad A_4 = \frac{dY}{d\lambda} \Big|_{\lambda = \bar{\lambda}} \quad (6.7)$$

$$A_1 = \frac{dY}{d\sigma_y} \Big|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y} = 1, \quad (6.8)$$

$$A_2 = \frac{dY}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}} = \frac{(1 + a_1 + K_{11}) \cdot r \cdot \left(\frac{\rho}{\bar{\mu}} - \frac{\rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}} \right)}{t}, \quad (6.9)$$

$$A_3 = \frac{dY}{d\mu} \Big|_{\mu = \bar{\mu}} = \frac{(1 + a_1 + K_{11}) \cdot r \cdot \left(-\frac{\bar{\gamma}\rho}{\bar{\mu}^2} + \frac{\gamma \cdot \rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}^2} + \frac{\bar{\gamma} \cdot \bar{\lambda} \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}} \right)}{t}, \quad (6.10)$$

$$A_4 = \frac{dY}{d\lambda} \Big|_{\lambda = \bar{\lambda}} = \frac{(1 + a_1 + K_{11}) \cdot r \cdot z \cdot \bar{\gamma} \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{t}. \quad (6.11)$$

Характеристика безпеки силосу дорівнює:

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}}. \quad (6.12)$$

За характеристикою безпеки через функцію Лапласа визначається імовірність відмови силосу за формулою (1.12).

6.3. Оцінювання надійності металевого силосу з урахуванням складного напруженого стану

Оцінювання надійності металевого силосу будемо проводити на основі аналізу резерву міцності, який будемо визначати в просторі напружень наступним чином:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i \geq 0. \quad (6.13)$$

Випадковими величинами у поставленій задачі оцінювання надійності є:

$\tilde{\sigma}_y$ – випадкова величина межі текучості сталі;

$\tilde{\sigma}_i$ – випадкова величина приведених напружень.

Розглянемо безмоментний напружено-деформований стан силосу:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\tilde{\sigma}_x^2 - \tilde{\sigma}_x \tilde{\sigma}_z + \tilde{\sigma}_z^2 + 3\tilde{\tau}_{xz}^2},$$

де $\tilde{\sigma}_x$ – випадкова величина кільцевих напружень;

$\tilde{\sigma}_z$ – випадкова величина поздовжніх напружень;

$\tilde{\tau}_{xz}$ – випадкова величина дотичних напружень.

У роботі розглядається осесиметрична задача, тому дотичні напруження не враховуються, тоді функція має вигляд:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\tilde{\sigma}_x^2 - \tilde{\sigma}_x \tilde{\sigma}_z + \tilde{\sigma}_z^2}.$$

Випадкова величина кільцевих напружень $\tilde{\sigma}_x$ визначається за формулою (6.3). Випадкова величина поздовжніх напружень визначається за формулою

$\tilde{\sigma}_z = -\frac{\tilde{N}_z}{t}$, де $\tilde{N}_z = \rho \left(\tilde{\gamma} \cdot z - \tilde{P}_v \right) + N_G$, де \tilde{N}_z – випадкова величина поздовжньої

сили від вертикального тиску сипучого матеріалу на днище силосу $\tilde{P}_v = \frac{a_4}{\tilde{\lambda}} \tilde{P}_h$ та

N_G – поздовжні зусилля в стінці від ваги конструкцій силосу. Після перетворень

отримуємо :

$$\begin{aligned} \tilde{N}_z &= \rho \left(\tilde{\gamma} \cdot z - \frac{a_4}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h \right) + N_G = \rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G = \\ &= \rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\tilde{\gamma} \rho^2}{\tilde{\lambda} \cdot \tilde{\mu}} (1 - e^{(-\tilde{\lambda} \cdot \tilde{\mu} \cdot z / \rho)}) + N_G \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_z &= -\frac{\tilde{N}_z}{t} = -\frac{\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G}{t} = \\ &= -\frac{\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\tilde{\gamma} \rho^2}{\tilde{\lambda} \cdot \tilde{\mu}} (1 - e^{(-\tilde{\lambda} \cdot \tilde{\mu} \cdot z / \rho)}) + N_G}{t} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Використовуючи розроблену загальну процедуру [151], опишемо випадкові аргументи у вигляді нормальних випадкових величин. Функція резерву міцності для сталевого силосу має вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(\tilde{\sigma}_y, \tilde{\gamma}, \tilde{\mu}, \tilde{\lambda}) &= \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i = \tilde{\sigma}_y - \sqrt{\left[\left(\left[\tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{r1}) \right] \cdot r \right) / t \right]^2 +} \\ &+ \left[\left[\left[\tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{r1}) \right] \cdot r \right) / t \right] \cdot \left[\left(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G \right) / t \right] + \\ &+ \left[\left(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G \right) / t \right]^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (6.16)$$

Вважаючи функцію резерву міцності лінійною, одержуємо вираз для її математичного очікування:

$$\begin{aligned} \bar{Y} = \bar{R} - \bar{S} = \bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_y - \sqrt{\bar{\sigma}_x^2 - \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_z + \bar{\sigma}_z^2} = \bar{\sigma}_y - \sqrt{\left[\left(\left[\bar{P}_h (1 + a_1 + K_{t1}) \right] \cdot r \right) / t \right]^2 +} \\ + \left[\left[\bar{P}_h (1 + a_1 + K_{t1}) \right] \cdot r \right] / t \cdot \left[\left(\rho \cdot \bar{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\lambda} \cdot \bar{P}_h + N_G \right) / t \right] + \left[\left(\rho \cdot \bar{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\lambda} \cdot \bar{P}_h + N_G \right) / t \right]^2} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Стандарт резерву міцності визначається відповідно до формул (6.6 та 6.7) як: $\hat{Y} = \sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}$,

$$\text{де } A_1 = \left. \frac{dY}{d\sigma_y} \right|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y}, \quad A_2 = \left. \frac{dY}{d\gamma} \right|_{\gamma = \bar{\gamma}}, \quad A_3 = \left. \frac{dY}{d\mu} \right|_{\mu = \bar{\mu}}, \quad A_4 = \left. \frac{dY}{d\lambda} \right|_{\lambda = \bar{\lambda}}.$$

Отримуємо:

$$A_1 = \left. \frac{dY}{d\sigma_y} \right|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y} = 1, \quad (6.18)$$

$$A_2 = \frac{dY}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}} = \frac{2 \cdot \bar{\sigma}_x \cdot B \cdot r \cdot (1 + a_1 + K_{tl}) - \left(\bar{\sigma}_z \cdot B \cdot r \cdot (1 + a_1 + K_{tl}) + \bar{\sigma}_x \cdot \left(\rho \cdot z - \rho \cdot B / \bar{\lambda} \right) \right) + 2 \cdot \bar{\sigma}_z \cdot \left(\rho \cdot z - \rho \cdot B / \bar{\lambda} \right)}{2 \cdot t \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_x^2 - \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_z + \bar{\sigma}_z^2}}, \quad (6.19)$$

$$A_3 = \frac{dY}{d\mu} \Big|_{\mu = \bar{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_x^2 - \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_z + \bar{\sigma}_z^2}} \cdot \left(\frac{2 \cdot \bar{\sigma}_x \cdot C \cdot r \cdot (1 + a_1 + K_{tl})}{t} - \left(\frac{\bar{\sigma}_z \cdot C \cdot r \cdot (1 + a_1 + K_{tl})}{t} + \frac{\bar{\sigma}_x \cdot \rho \cdot C}{\bar{\lambda} \cdot t} \right) + \frac{2 \cdot \bar{\sigma}_z \cdot \rho \cdot C}{\bar{\lambda} \cdot t} \right), \quad (6.20)$$

$$A_4 = \frac{dY}{d\lambda} \Big|_{\lambda = \bar{\lambda}} = \frac{2 \cdot \bar{\sigma}_x \cdot D \cdot r \cdot (1 + a_1 + K_{tl}) - \left(\bar{\sigma}_z \cdot D \cdot r \cdot (1 + a_1 + K_{tl}) + \bar{\sigma}_x \cdot E \right) + 2 \cdot \bar{\sigma}_z \cdot E}{2 \cdot t \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_x^2 - \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_z + \bar{\sigma}_z^2}}, \quad (6.21)$$

де

$$B = \frac{dP_h}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}} = \left(\frac{\rho}{\bar{\mu}} - \frac{\rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}} \right), \quad (6.22)$$

$$C = \left. \frac{dP_h}{d\mu} \right|_{\mu = \bar{\mu}} = \left(-\frac{\bar{\gamma}\rho}{\bar{\mu}^2} + \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}}{\bar{\mu}^2} + \frac{\bar{\gamma} \cdot \bar{\lambda} \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}}{\bar{\mu}} \right), \quad (6.23)$$

$$D = \left. \frac{dP_h}{d\lambda} \right|_{\lambda = \bar{\lambda}} = \bar{\gamma} \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}, \quad (6.24)$$

$$E = \left. \frac{dN_z}{d\lambda} \right|_{\lambda = \bar{\lambda}} = -\frac{\rho \left(\frac{\bar{\gamma}\rho}{\bar{\mu}} - \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot e^{\left(-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z / \rho\right)}}{\bar{\mu}} \right)}{\bar{\lambda}^2} - \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot z \cdot e^{\left(-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z / \rho\right)}}{\bar{\lambda}}. \quad (6.25)$$

Характеристика безпеки силосу визначається за формулою (6.12) та дорівнює:

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}}.$$

На основі наведених вище двох підходів були проведені порівняльні розрахунки надійності реального силосу, розрахованого за діючими нормами. Для розрахунків були прийняті наступні вихідні дані силосної конструкції: $h=20\text{м}$, $d=8\text{м}$, $t=0,003\text{м}$ сталь марки Ст3 – математичне очікування межі текучості $\bar{R} = 288\text{МПа}$, коефіцієнт варіації $V=0,083$. Силосна конструкція завантажувалась різними сипучими матеріалами, характеристики матеріалів взяті з табл. 6.1.

У таблиці 6.5 наведені результати розрахунків оцінювання надійності силосу на основі двох методів: на основі аналізу резерву міцності з урахуванням кільцевих напружень та аналізу резерву міцності з урахуванням складного напруженого стану.

Таблиця 6.5

Порівняння методів розрахунку надійності

| Параметри розрахунку надійності | Кукурудза | | | Соя | | |
|--------------------------------------|---|---|---------------|--|---|---------------|
| | Кільцеві напруження | Складний напружений стан | Різниця, % | Кільцеві напруження | Складний напружений стан | Різниця, % |
| $\bar{\sigma}_y$, МПа | 288 | 288 | 0 | 288,0 | 288,0 | 0 |
| $\bar{\sigma}_x$, МПа | 121,5 | 121,5 | 0 | 121,9 | 121,9 | 0 |
| $\bar{\sigma}_z$, МПа | 0 | -60,1 | 100 | 0,0 | -66,1 | 100 |
| $\bar{\sigma}_i$, МПа | 121,5 | 160,22 | 24,18 | 121,9 | 165,2 | 26,22 |
| \bar{Y} , МПа | 166,5 | 127,78 | -30,32 | 166,1 | 122,8 | -35,29 |
| A1, МПа | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| A2, м | 16197,65 | 9613,88 | -68,48 | 16 254,37 | 8 806,51 | -84,57 |
| A3, МПа | -225,4 | -152,6 | -47,67 | -240,6 | -169,2 | -42,21 |
| A4, МПа | 70,5 | 146,1 | 51,72 | 44,6 | 97,7 | 54,39 |
| $A_1^2 \cdot \hat{\sigma}_y^2$, МПа | 571 401,2 | 571 401,2 | 0 | 571 401,2 | 571 401,2 | 0 |
| $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$, МПа | 39 905,5 | 14 058,1 | -183,86 | 40 185,5 | 11 796,0 | -240,67 |
| $A_3^2 \cdot \hat{\mu}^2$, МПа | 201 035,6 | 92 191,1 | -118,06 | 106 541,0 | 52 679,2 | -102,24 |
| $A_4^2 \cdot \hat{\lambda}^2$, МПа | 14 499,5 | 62 203,8 | 76,7 | 5 043,6 | 24 244,3 | 79,20 |
| \hat{Y} , МПа | 28,8 | 27,2 | -5,72 | 26,9 | 25,7 | -4,67 |
| β | 5,79 | 4,69 | -23,45 | 6,17 | 4,78 | -29,08 |
| $Q(\beta)$ | $3,59 \times 10^{-9}$ | $1,32 \times 10^{-6}$ | | $3,67 \times 10^{-10}$ | $9,05 \times 10^{-7}$ | |

Продовження табл.6.5

| Параметри розрахунку надійності | Пшениця | | | Ячмінь | | |
|---------------------------------------|---|--|---------------|---|---|---------------|
| | Кільцеві напруження | Складний напружений стан | Різниця, % | Кільцеві напруження | Складний напружений стан | Різниця, % |
| $\bar{\sigma}_y$, МПа | 288,0 | 288,0 | 0 | 288,0 | 288,0 | 0 |
| $\bar{\sigma}_x$, МПа | 128,8 | 128,8 | 0 | 135,1 | 135,1 | 0 |
| $\bar{\sigma}_z$, МПа | 0,0 | -67,5 | 100 | 0,0 | -59,3 | 100 |
| $\bar{\sigma}_i$, МПа | 128,8 | 172,7 | 25,43 | 135,1 | 172,6 | 21,72 |
| \bar{Y} , МПа | 159,2 | 115,3 | -38,11 | 152,9 | 115,4 | -32,48 |
| A_1 , МПа | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| A_2 , м | 15 613,80 | 8 758,42 | -78,27 | 18 011,93 | 11 709,24 | -53,83 |
| A_3 , МПа | -233,9 | -156,5 | -49,45 | -276,7 | -197,8 | -39,85 |
| A_4 , МПа | 69,6 | 149,3 | 53,37 | 74,2 | 143,5 | 48,28 |
| $A_1^2 \cdot \hat{\sigma}_y^2$, МПа | 571 401,2 | 571 401,2 | 0 | 571 401,2 | 571 401,2 | 0 |
| $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$, МПа | 83 645,3 | 26 319,4 | -217,81 | 49 345,7 | 20 853,9 | -136,63 |
| $A_3^2 \cdot \hat{\mu}^2$, МПа | 100 675,8 | 45 075,6 | -123,35 | 100 880,9 | 51 578,6 | -95,59 |
| $A_4^2 \cdot \hat{\lambda}^2$, МПа | 9 047,1 | 41 606,8 | 78,26 | 12 267,3 | 45 866,8 | 73,25 |
| \hat{Y} , МПа | 27,7 | 26,2 | -5,71 | 27,1 | 26,3 | -3,15 |
| β | 5,76 | 4,41 | -30,65 | 5,64 | 4,40 | -28,43 |
| $Q(\beta)$ | $4,33 \times 10^{-9}$ | $5,3 \times 10^{-6}$ | | $8,82 \times 10^{-9}$ | $5,57 \times 10^{-6}$ | |

За результатами, наведеними в таблиці 6.5, видно, що найбільший процент розбіжності за двома методами має коефіцієнт A_2 від 54% до 85% та відповідно добуток $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$ – від 137% до 240 %. Тобто при врахуванні поздовжніх напружень, саме питома вага сипучого матеріалу відіграє значну роль у величині характеристики безпеки. Величина характеристики безпеки при розрахунку за двома методами має розбіжність 24 – 31%. На основі проведених розрахунків надійності силосів були побудовані порівняльні графіки (рис. 6.1).

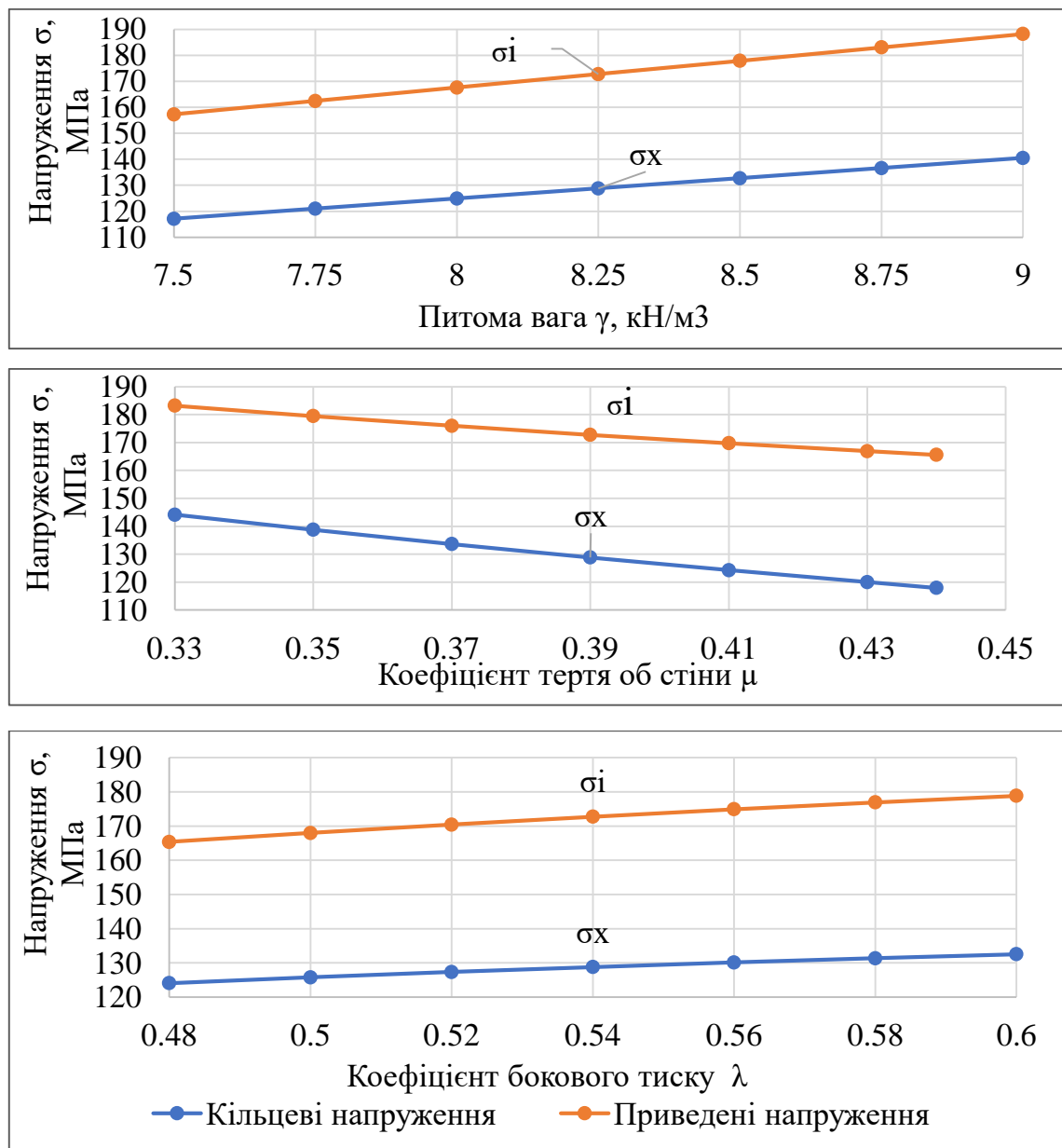


Рис. 6.1. Графіки кільцевих та приведених напружень у залежності від розкиду характеристик пшениці

На рисунку 6.1 наведені графіки кільцевих та приведених напружень у залежності від розкиду характеристик пшениці. Графіки показують, що при збільшенні питомої ваги та коефіцієнту бокового тиску напруження зростають, а при збільшенні коефіцієнта тертя об стінки навпаки зменшуються.

На рисунку 6.2 можна спостерігати графіки залежностей напружень та характеристик безпеки в залежності від розкиду характеристик пшениці. Графіки показують лінійну тенденцію зменшення характеристики безпеки при збільшенні напружень у стінці силосу.

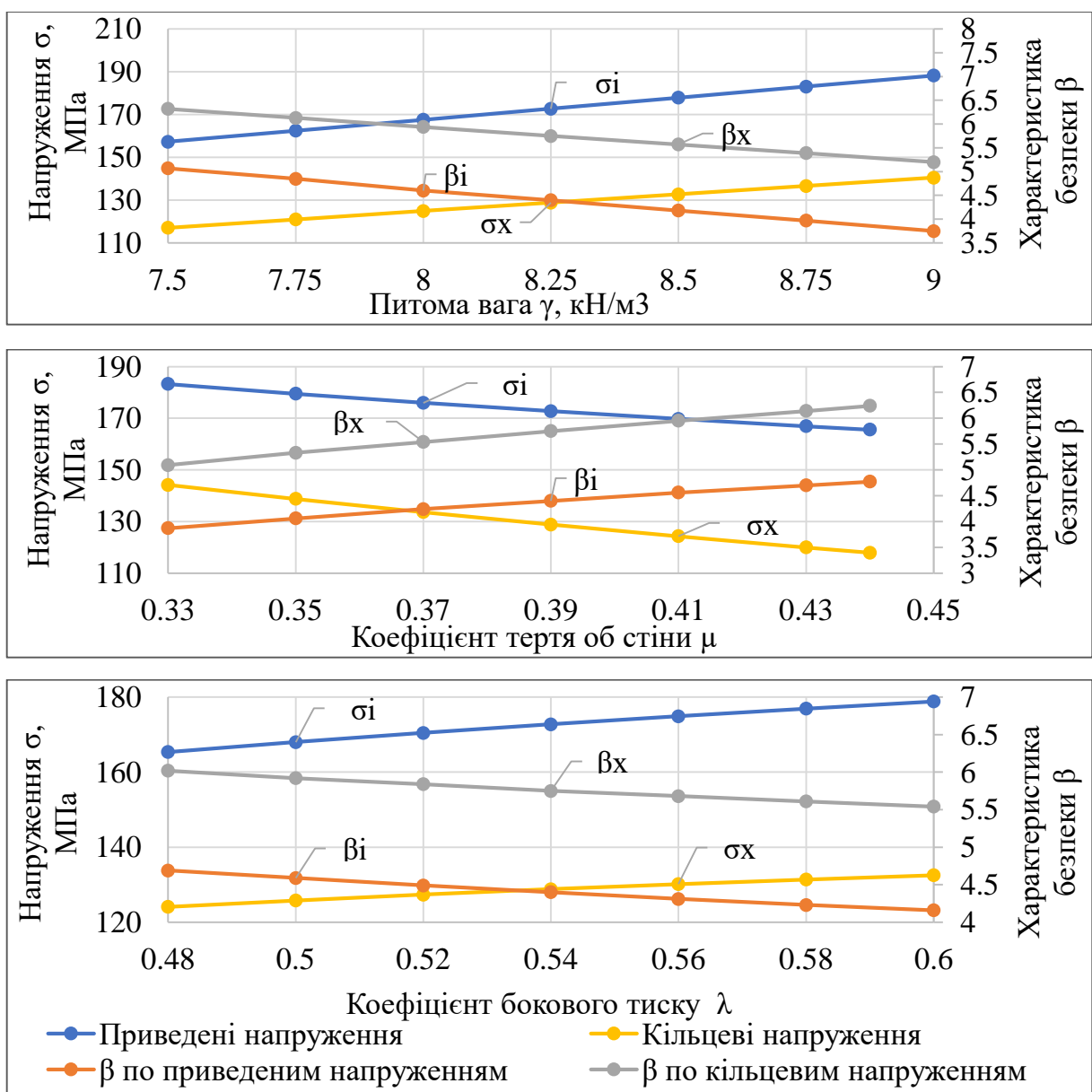


Рис. 6.2. Графіки напружень та характеристик безпеки в залежності від розкиду характеристик пшениці

6.4. Оцінювання надійності металевого спірально-фальцевого силосу з урахуванням напружено-деформованого стану.

Оцінювання надійності металевого спірально-фальцевого силосу будемо проводити на основі аналізу резерву міцності з урахуванням напружено-деформованого стану наступним чином:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i \geq 0 \quad (6.26)$$

Випадковими величинами у поставленій задачі оцінювання надійності є:

$\tilde{\sigma}_y$ – випадкова величина межі текучості сталі.

$\tilde{\sigma}_i$ – випадкова величина фібрових напружень.

Випадковий характер фібрових напружень є наслідком імовірнісної природи тиску, обумовленої статистичним розкидом характеристик сипучого матеріалу, таких як: $\tilde{\gamma}$ – питома вага сипучих матеріалів; $\tilde{\lambda}$ – коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу; $\tilde{\varphi}$ – кут внутрішнього тертя, град; $\tilde{\mu}$ – коефіцієнт тертя сипучих матеріалів об стіни силосу.

Фіброві напруження відповідно до 3 розділу визначаються за формулою:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\tilde{\sigma}_u^2(\xi) - \tilde{\sigma}_u(\xi)\tilde{\sigma}_k(\xi) + \tilde{\sigma}_k^2(\xi)}. \quad (6.27)$$

Відповідно до формул (3.57 – 3.60), описаних у третьому розділі, фіброві поздовжні та кільцеві напруження в середині обичайки мають вигляд:

$$\tilde{\sigma}_u(\xi) = \frac{\tilde{N}_1}{t} \pm \frac{\tilde{M}(\xi)}{W}, \quad \tilde{\sigma}_k(\xi) = \frac{\tilde{N}_s(\xi)}{t}, \quad \text{де } W = \frac{t^2}{6}, \quad \tilde{N}_s(\xi) = \frac{Et}{r} \tilde{\omega}(\xi) - \nu \tilde{N}_1. \quad (6.28)$$

Підставивши вирази та враховуючи, що \tilde{N}_1 має від'ємне значення, маємо:

$$\tilde{\sigma}_u(\xi) = \pm \frac{6\tilde{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\tilde{N}_1}{t}, \quad \tilde{\sigma}_k(\xi) = \tilde{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\tilde{N}_1}{t}. \quad (6.29)$$

Прогин та поздовжній згинаючий момент у середині обичайки:

$$\tilde{\omega}(\xi) = \frac{(\tilde{P} + \nu\tilde{N}_1/r - e_p\tilde{P}_1)r^2}{Et} \cdot \left[1 + \frac{2\beta n_5(\xi)}{\frac{t}{A}n_2(\xi) + \frac{\beta}{2}n_3(\xi)} \right], \quad (6.30)$$

$$\tilde{M}(\xi) = -\frac{(\tilde{P} + \nu\tilde{N}_1/r - e_p\tilde{P}_1)}{2\beta} \cdot \frac{n_4(\xi)}{\frac{t}{A}n_2(\xi) + \frac{\beta}{2}n_3(\xi)}, \quad (6.31)$$

де A – площа поперечного перерізу шпангоута (фальцевого ребра),

e_p – відстань від лінії прикладання дотичних зусиль до середньої поверхні оболонки,

E – модуль пружності матеріалу оболонки,

ν – коефіцієнт Пуассона,

t – товщина стінки,

r – радіус силосу.

Невідомі $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, \beta$ визначаються за формулами:

$$n_1(\xi) = V_2(\xi) \cdot V_3(\xi) - V_1(\xi) \cdot V_4(\xi),$$

$$n_2(\xi) = V_2^2(\xi) + 4V_4^2(\xi),$$

$$n_3(\xi) = V_1(\xi) \cdot V_2(\xi) + 4V_3(\xi) \cdot V_4(\xi),$$

$$n_4(\xi) = V_2(\xi)n_2(\xi) - V_1(\xi)n_1(\xi) - V_3(\xi)n_3(\xi),$$

$$n_5(\xi) = n_1(\xi)V_3(\xi) - n_2(\xi)V_4(\xi) - \frac{1}{4}n_3(\xi)V_1(\xi),$$

$$\beta = 4\sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2t^2}},$$

де $V_1(\xi_i), V_2(\xi_i), V_3(\xi_i), V_4(\xi_i)$ – фундаментальні функції Кривола О.М.,

Відповідно горизонтальний та вертикальний тиск зерна визначаються виразами:

$$\tilde{P} = \sum \tilde{P}_h = \tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{11}),$$

де $\tilde{P}_h = \frac{\tilde{\gamma}\rho}{\tilde{\mu}} (1 - e^{-\tilde{\lambda}\tilde{\mu}z/\rho})$ – рівномірно розподілений по периметру випадковий горизонтальний тиск сипучих матеріалів на стіні силосів на глибині Z (м) від верху засипу,

a_1 – коефіцієнт місцевого підвищення тиску, що приймається згідно з вимогами 4.11. в залежності від відношення h/d ,

K_{11} – коефіцієнт, що приймається згідно з 4.18. [101]

$$\tilde{P}_1 = \tilde{P}_f = \tilde{\mu}\tilde{P}_h.$$

Відповідно до ДБН В2.2-8-98 [101] поздовжні зусилля \tilde{N}_1 від вертикального тиску сипучого матеріалу на днище силосу $\tilde{P}_v = \frac{a_4}{\tilde{\lambda}} \tilde{P}_h$ та N_G поздовжні зусилля у стінці від ваги конструкцій силосу та снігу:

$$\tilde{N}_1 = \rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G.$$

Оскільки вираз $e_p \tilde{P}$ враховує початкові нерівності оболонки, вважаємо його незначним та не враховуємо в розрахунках.

Фіброві поздовжні та кільцеві напруження в середині обичайки мають вигляд:

$$\tilde{\sigma}_u(\xi) = \pm \frac{6\tilde{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\tilde{N}_1}{t} = \pm \frac{-6 \left[\frac{\left(\tilde{P}_h (1+a_1+K_{r1}) - \nu(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G) / r \right) \cdot n_4(\xi)}{2\beta} \cdot \frac{t}{A n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)} \right]}{t^2} - \frac{\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G}{t}, \quad (6.32)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_k(\xi) &= \frac{\tilde{N}_s(\xi)}{t} = \tilde{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\tilde{N}_1}{t} = \\ &= \left[\frac{\left(\tilde{P}_h (1+a_1+K_{r1}) - \nu(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G) / r \right) r^2}{Et} \cdot \left[1 + \frac{2\beta n_5(\xi)}{t A n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)} \right] \right] \cdot \frac{E}{r} - \nu \frac{(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G)}{t} \end{aligned} \quad (6.33)$$

Функція резерву міцності для сталевого силосу має вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(\tilde{\sigma}_y, \tilde{\gamma}, \tilde{\mu}, \tilde{\lambda}) &= \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i = \\ &= \tilde{\sigma}_y - \sqrt{\left[\pm \frac{6\tilde{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\tilde{N}_1}{t} \right]^2 - \left[\pm \frac{6\tilde{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\tilde{N}_1}{t} \right] \cdot \left[\tilde{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\tilde{N}_1}{t} \right] + \left[\tilde{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\tilde{N}_1}{t} \right]^2} \geq 0 \end{aligned} \quad (6.34)$$

$$\begin{aligned}
\tilde{Y}(\tilde{\sigma}_y, \tilde{\gamma}, \tilde{\mu}, \tilde{\lambda}) &= \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i = \\
&= \tilde{\sigma}_y - \sqrt{\left[\pm \frac{-6 \left[\frac{\left(\tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{t1}) - v(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G) / r \right)}{2\beta} \cdot F_2 \right]}{t^2} - \frac{\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G}{t} \right]^2 +} \\
&+ \left[\pm \frac{-6 \left[\frac{\left(\tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{t1}) - v(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G) / r \right)}{2\beta} \cdot F_2 \right]}{t^2} - \frac{\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G}{t} \right] \cdot} \\
&\cdot \left[\frac{\left(\tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{t1}) - v(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G) / r \right) r^2}{Et} \cdot F_1 \right] \cdot \frac{E}{r} - v \frac{(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G)}{t} \right]^2 \\
&+ \left[\frac{\left(\tilde{P}_h (1 + a_1 + K_{t1}) - v(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G) / r \right) r^2}{Et} \cdot F_1 \right] \cdot \frac{E}{r} - v \frac{(\rho \cdot \tilde{\gamma} \cdot z - \frac{\rho}{\tilde{\lambda}} \cdot \tilde{P}_h + N_G)}{t} \right]^2 \geq 0
\end{aligned} \tag{6.35}$$

де

$$F_1 = 1 + \frac{2\beta n_5(\xi)}{\frac{t}{A} n_2(\xi) + \frac{\beta}{2} n_3(\xi)}; F_2 = \frac{n_4(\bar{\xi})}{\frac{t}{A} n_2(\bar{\xi}) + \frac{\beta}{2} n_3(\bar{\xi})}. \quad (6.36)$$

Вважаючи функцію резерву міцності лінійною, одержуємо вираз для її математичного очікування:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \bar{R} - \bar{S} = \bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_y - \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2} = \\ &= \bar{\sigma}_y - \sqrt{\left[\pm \frac{6\bar{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\bar{N}_1}{t} \right]^2 - \left[\pm \frac{6\bar{M}(\xi)}{t^2} - \frac{\bar{N}_1}{t} \right] \cdot \left[\bar{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\bar{N}_1}{t} \right] +} \\ &\quad \sqrt{+ \left[\bar{\omega}(\xi) \frac{E}{r} - \nu \frac{\bar{N}_1}{t} \right]^2} \geq 0 \end{aligned} \quad (6.37)$$

Стандарт резерву міцності визначається відповідно як:

$$\hat{Y} = \sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}, \text{ де } A_1 = \left. \frac{dY}{d\sigma_y} \right|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y}, \quad A_2 = \left. \frac{dY}{d\gamma} \right|_{\gamma = \bar{\gamma}}, \quad A_3 = \left. \frac{dY}{d\mu} \right|_{\mu = \bar{\mu}}, \quad A_4 = \left. \frac{dY}{d\lambda} \right|_{\lambda = \bar{\lambda}}.$$

$$A_1 = \left. \frac{dY}{d\sigma_y} \right|_{\sigma_y = \bar{\sigma}_y} = 1,$$

Отримуємо:

(6.38)

$$\begin{aligned}
A_2 &= \frac{dY}{d\gamma} \Big|_{\gamma = \bar{\gamma}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2}} \cdot \\
&\cdot 2 \cdot \bar{\sigma}_u \cdot \left[-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{v \left(\rho z - \rho B / \lambda \right)}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho z - \frac{\rho B}{\lambda}}{t} \right] - \\
&- \left[\bar{\sigma}_u \cdot \left(-\frac{v \left(\rho z - \rho B / \lambda \right)}{t} + \frac{1}{t} \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{v \left(\rho z - \rho B / \lambda \right)}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right) \right] \\
&+ \left[\bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{v \left(\rho z - \rho B / \lambda \right)}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho z - \frac{\rho B}{\lambda}}{t} \right) \right] \\
&+ 2 \cdot \bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{v \left(\rho z - \rho B / \lambda \right)}{t} + \frac{1}{t} \left(B \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{v \left(\rho z - \rho B / \lambda \right)}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right)
\end{aligned} \tag{6.39}$$

$$\begin{aligned}
A_3 &= \left. \frac{dY}{d\mu} \right|_{\mu = \bar{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2}} \cdot \\
&\cdot 2 \cdot \bar{\sigma}_u \cdot \left[-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot F_2 \right] + \frac{\rho C}{\lambda t} \right] - \\
&\left. \left[\bar{\sigma}_u \cdot \left(\frac{\nu \rho C}{\lambda t} + \frac{1}{t} \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right) \right] \right\} + \\
&\left. \left[\bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot F_2 \right] + \frac{\rho C}{\lambda t} \right) \right] \right\} + \\
&+ 2 \cdot \bar{\sigma}_k \cdot \left(\frac{\nu \rho C}{\lambda t} + \frac{1}{t} \left(C \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) - \frac{\nu \rho C}{\lambda r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right)
\end{aligned} \tag{6.40}$$

$$\begin{aligned}
A_4 &= \left. \frac{dY}{d\lambda} \right|_{\lambda = \bar{\lambda}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_u^2 - \bar{\sigma}_u \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k^2}} \cdot \\
&\cdot 2 \cdot \bar{\sigma}_u \cdot \left[-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho E}{t} \right] - \\
&\left. \left[\bar{\sigma}_u \cdot \left(-\frac{\nu E}{t} + \frac{1}{t} \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right) \right] \right\} + \\
&\left. \left[\bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{1}{\beta t^2} \left[3 \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot F_2 \right] - \frac{\rho E}{t} \right) \right] \right\} + \\
&+ 2 \cdot \bar{\sigma}_k \cdot \left(-\frac{\nu E}{t} + \frac{1}{t} \left(D \cdot (1 + a_1 + K_{t1}) + \frac{\nu E}{r} \right) \cdot r \cdot F_1 \right)
\end{aligned} \tag{6.41}$$

де

$$B = \left. \frac{dP_h}{d\gamma} \right|_{\gamma = \bar{\gamma}} = \left(\frac{\rho}{\bar{\mu}} - \frac{\rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho} \right)}}{\bar{\mu}} \right), \tag{6.42}$$

$$C = \left. \frac{dP_h}{d\mu} \right|_{\mu = \bar{\mu}} = \left(-\frac{\bar{\gamma}\rho}{\bar{\mu}^2} + \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}}{\bar{\mu}^2} + \frac{\bar{\gamma} \cdot \bar{\lambda} \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}}{\bar{\mu}} \right), \quad (6.43)$$

$$D = \left. \frac{dP_h}{d\lambda} \right|_{\lambda = \bar{\lambda}} = \bar{\gamma} \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}, \quad (6.44)$$

$$E = \left. \frac{dN_z}{d\lambda} \right|_{\lambda = \bar{\lambda}} = - \frac{\rho \left(\frac{\bar{\gamma}\rho}{\bar{\mu}} - \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}}{\bar{\mu}} \right)}{\lambda^2} - \frac{\bar{\gamma} \cdot \rho \cdot z \cdot e^{\left(\frac{-\bar{\lambda} \cdot \bar{\mu} \cdot z}{\rho}\right)}}{\lambda}. \quad (6.45)$$

Характеристика безпеки силосу дорівнює:

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{A_1^2 \hat{\sigma}_y^2 + A_2^2 \hat{\gamma}^2 + A_3^2 \hat{\mu}^2 + A_4^2 \hat{\lambda}^2}}$$

На основі двох методів були проведені розрахунки та порівняльний аналіз параметрів розрахунку надійності. Для розрахунків була прийнята аналогічна силосна конструкція з наступними вихідними даними: $h=20\text{м}$, $d=8\text{м}$, $t=0,003\text{м}$, сталь марки Ст3 – математичне очікування межі текучості $\bar{R} = 288\text{МПа}$, коефіцієнт варіації $V=0,083$. Силосна конструкція завантажувалась різними сипучими матеріалами, характеристики матеріалів взяті з табл. 6.1.

У таблиці 6.6 наведені результати розрахунків оцінювання надійності силосу на основі двох методів: на основі аналізу резерву міцності з урахуванням складного напруженого стану та аналізу резерву міцності з урахуванням складного напружено-деформованого стану.

Таблиця 6.6

Порівняння методів розрахунку надійності

| Параметри розрахунку надійності | Кукурудза | | | Соя | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|
| | Складний напружений стан | Складний напружено-деформований стан | Різниця, % | Складний напружений стан | Складний напружено-деформований стан | Різниця, % |
| $\bar{\sigma}_y$, МПа | 288,0 | 288,0 | 0,00 | 288,0 | 288,0 | 0,00 |
| $\bar{\sigma}_x$, МПа | 121,5 | 110,8 | 8,78 | 121,9 | 111,1 | 8,89 |
| $\bar{\sigma}_z$, МПа | -60,1 | -143,8 | -139,37 | -66,1 | -151,2 | -128,65 |
| $\bar{\sigma}_i$, МПа | 160,2 | 221,2 | -38,04 | 165,2 | 228,1 | -38,03 |
| \bar{Y} , МПа | 127,8 | 66,8 | 47,69 | 122,8 | 59,9 | 51,18 |
| A_1 , МПа | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| A_2 , м | 9613,88 | 24 250,15 | -152,24 | 8 806,51 | 24 623,69 | -179,61 |
| A_3 , МПа | -152,6 | -210,1 | -37,64 | -169,2 | -235,7 | -39,29 |
| A_4 , МПа | 146,1 | -112,7 | 177,19 | 97,7 | -84,3 | 186,33 |
| $A_1^2 \cdot \hat{\sigma}_y^2$, МПа | 571 401,2 | 571 401,2 | 0,00 | 571 401,2 | 571 401,2 | 0,00 |
| $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$, МПа | 14 058,1 | 89 445,4 | -536,26 | 11 796,0 | 92 222,2 | -681,81 |
| $A_3^2 \cdot \hat{\mu}^2$, МПа | 92 191,1 | 174 658,4 | -89,45 | 52 679,2 | 10 221,4 | 80,60 |
| $A_4^2 \cdot \hat{\lambda}^2$, МПа | 62 203,8 | 37 063,5 | 40,42 | 24 244,3 | 18 067,0 | 25,48 |
| \hat{Y} , МПа | 27,2 | 29,5 | -8,60 | 25,7 | 28,0 | -8,98 |
| β | 4,69 | 2,26 | 51,81 | 4,78 | 2,14 | 55,23 |
| $P(\beta)$ | 1,32x10⁻⁶ | 0,9881 | - | 9,05x10⁻⁷ | 0,9838 | - |

Продовження табл. 6.6

| Параметри розрахунку надійності | Пшениця | | | Ячмінь | | |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--------------|---|--------------------------------------|--------------|
| | Складний напружений стан | Складний напружено-деформований стан | Різниця, % | Складний напружений стан | Складний напружено-деформований стан | Різниця, % |
| $\bar{\sigma}_y$, МПа | 288,0 | 288,0 | 0,00 | 288,0 | 288,0 | 0,00 |
| $\bar{\sigma}_x$, МПа | 128,8 | 117,4 | 8,85 | 135,1 | 120,9 | 10,53 |
| $\bar{\sigma}_z$, МПа | -67,5 | -157,0 | -132,60 | -59,3 | -150,5 | -153,72 |
| $\bar{\sigma}_i$, МПа | 172,7 | 238,4 | -38,04 | 172,6 | 235,5 | -36,46 |
| \bar{Y} , МПа | 115,3 | 49,6 | 57,01 | 115,4 | 52,5 | 54,51 |
| A_1 , МПа | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| A_2 , м | 8 758,42 | 23 554,66 | -168,94 | 11 709,24 | 26 181,38 | -123,60 |
| A_3 , МПа | -156,5 | -217,1 | -38,74 | -197,8 | -259,5 | -31,17 |
| A_4 , МПа | 149,3 | -123,7 | 182,85 | 143,5 | -94,1 | 165,57 |
| $A_1^2 \cdot \hat{\sigma}_y^2$, МПа | 571 401,2 | 571 401,2 | 0,00 | 571 401,2 | 571 401,2 | 0,00 |
| $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$, МПа | 26 319,4 | 190 361,1 | -623,27 | 20 853,9 | 104 259,2 | -399,95 |
| $A_3^2 \cdot \hat{\mu}^2$, МПа | 45 075,6 | 86 767,4 | -92,49 | 51 578,6 | 94 200,5 | -82,63 |
| $A_4^2 \cdot \hat{\lambda}^2$, МПа | 41 606,8 | 28 559,6 | 31,36 | 45 866,8 | 19 718,4 | 57,01 |
| \hat{Y} , МПа | 26,2 | 29,6 | -13,21 | 26,3 | 28,1 | -7,00 |
| β | 4,41 | 1,67 | 62,09 | 4,40 | 1,87 | 57,50 |
| $P(\beta)$ | $5,3 \times 10^{-6}$ | 0,9525 | - | $5,57 \times 10^{-6}$ | 0,9693 | - |

Примітки: силос, характеристики якого були взяті для розрахунку, побудований зі сталі DX51D+Z140, також силос підкріплено вертикальними ребрами на всю висоту оболонки.

За результатами, наведеними в таблиці 6.6, видно, що врахування прогину міжфальцевої зони спіральньо-фальцевої силосної конструкції впливає на значне підвищення меридіональних напружень, різниця меридіональних напружень за двома методами складає від 129% до 154%. Також найбільший процент розбіжності має коефіцієнт A_2 від 124% до 180%, A_4 від 167% до 188%. Значна різниця спостерігається у добутку $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$ – від 400% до 682%. Тобто при врахуванні прогину міжфальцевої зони спіральньо-фальцевої силосної конструкції, значну роль у величині характеристики безпеки відіграють такі статистичні характеристики сипучих матеріалів, як питома вага сипучого матеріалу та коефіцієнт бокового тиску. Враховуючи, що розбіжність між приведеними та фібровими напруженнями складає 36 – 38%, величина характеристики безпеки при розрахунку за двома методами в 2,5 раз більша і відповідає значенням від 52 до 62%.

На основі проведених розрахунків надійності силосів були побудовані порівняльні графіки. На рисунку 6.3 наведені графіки приведених та фібрових напружень у залежності від розкиду характеристик пшениці. Графіки показують, що при збільшенні питомої ваги та коефіцієнту бокового тиску напруження зростають, а при збільшенні коефіцієнта тертя об стінки навпаки зменшуються.

На рисунку 6.4 можна спостерігати графіки напружень та характеристики безпеки в залежності від розкиду характеристик пшениці. Графіки показують лінійну тенденцію зменшення характеристики безпеки при збільшенні напружень у стінці силосу. З кожним ступенем зміни характеристик γ, μ, λ пшениці різниця напружень змінюється на 27,55%, значення різниці характеристики безпеки варіюється: при зміні γ від 51% до 75%; при зміні μ від 48% до 86%; при зміні λ від 56% до 67%.

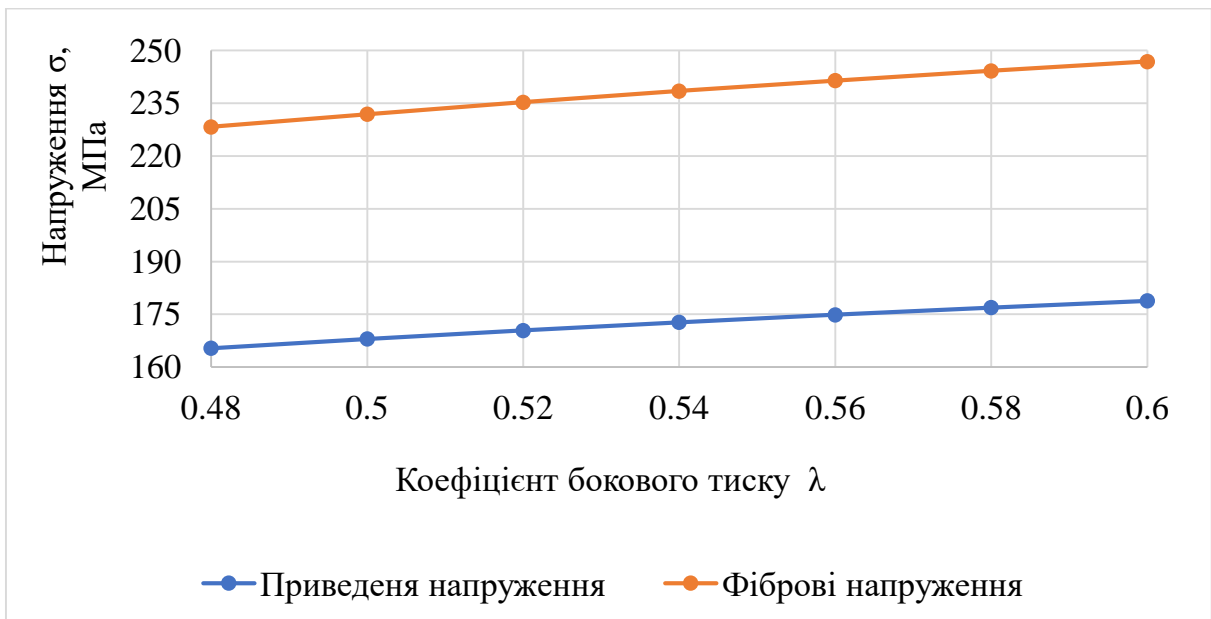
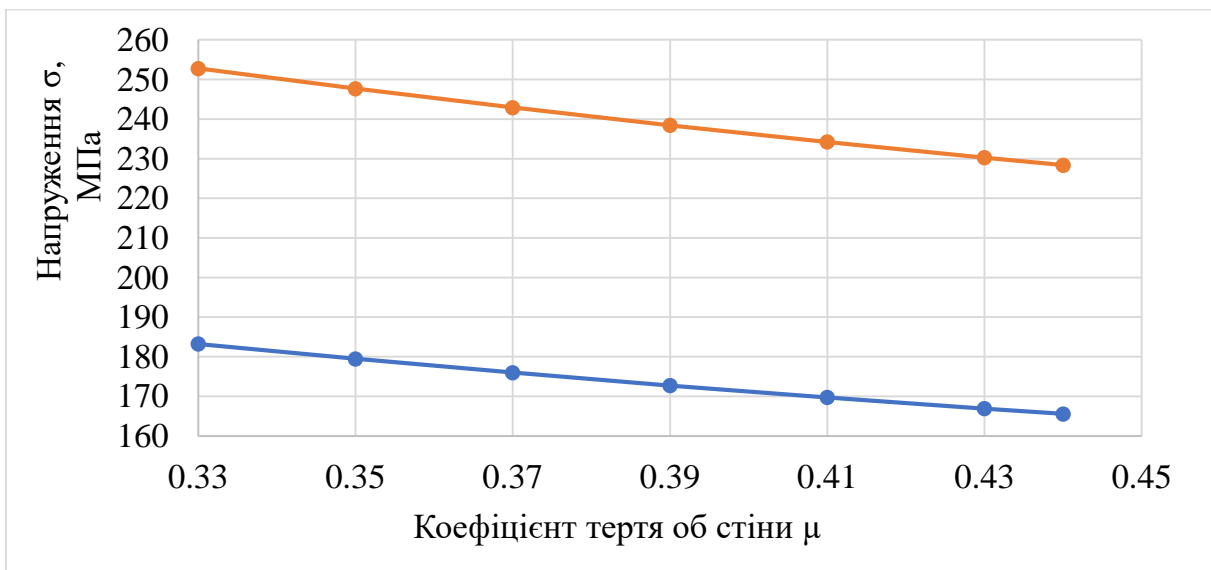
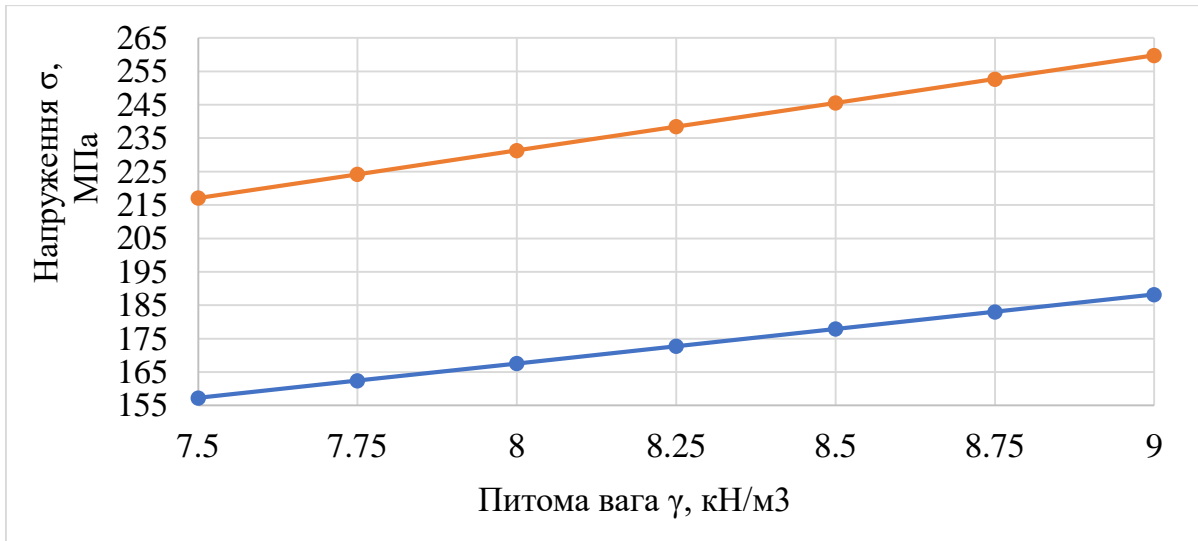


Рис. 6.3. Графіки кільцевих та приведених напружень у залежності від розкиду характеристик пшениці

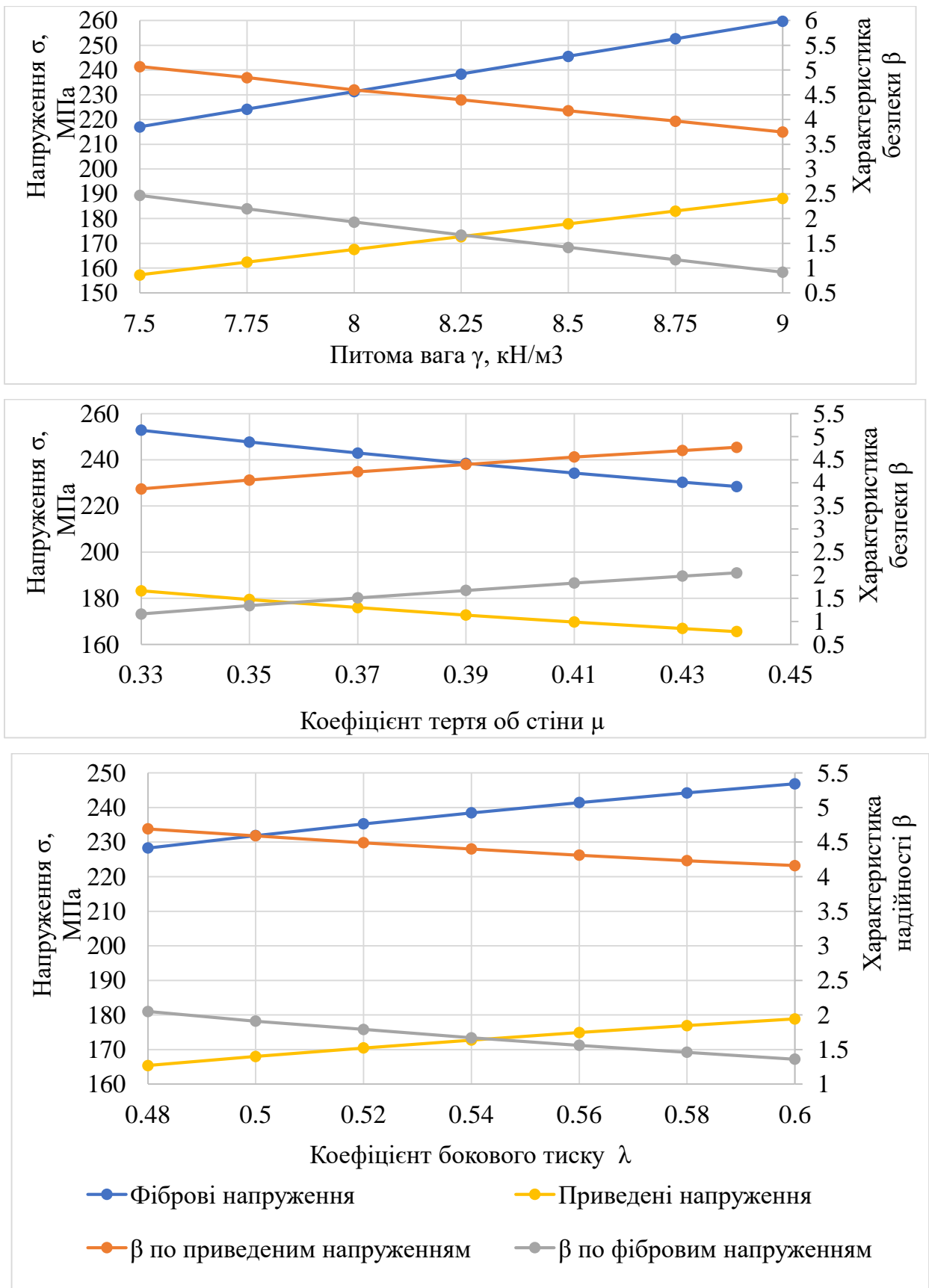


Рис. 6.4. Графіки напружень та характеристик безпеки в залежності від розкиду характеристик пшениці

Відповідно до ДБН В.1.2-14:2018, табл. Б.2 рекомендована величина дальності відмови β для розрахованого силосу (клас наслідків СС2, категорія відповідальності конструкції А, усталена розрахункова ситуація) повинна відповідати значенню $\beta=4,27$. Таким чином, за результатами проведених розрахунків можна стверджувати, що надійність силосної ємності за двома методами: оцінювання надійності на основі аналізу резерву міцності з урахуванням кільцевих напружень та аналізу резерву міцності з урахуванням складного напруженого стану, забезпечена. Однак, результати оцінювання надійності металевго спірально-фальцевого силосу з урахуванням напружено-деформованого стану показали недостатню величину характеристики безпеки β .

Підвищити надійність силосу із заданими характеристиками, при цьому не змінюючи його геометричні розміри, можливо за допомогою таких методів: застосування при будівництві міцнішої сталі, збільшення товщини стінки оболонки, підсилення стінки силосу вертикальними ребрами. Оскільки при підсиленні стінки вертикальними ребрами забезпечується відсутність згину оболонки між фальцями, оцінювання надійності силосу за третім методом не проводиться, оскільки він враховує прогин міжфальцевої зони.

Проведемо оцінювання надійності металевго спірально-фальцевого силосу з урахуванням напружено-деформованого стану, приймаючи міцнішу сталь та збільшуючи товщину стінки. Для розрахунків прийнята аналогічна силосна конструкція з наступними вихідними даними: $h=20\text{м}$, $d=8\text{м}$, $t=0,004\text{м}$, сталь марки DX51D+Z140 – математичне очікування межі текучості $\bar{R}_y = 352,5\text{МПа}$, коефіцієнт варіації $V=0,083$. Силосна конструкція завантажувалась різними сипучими матеріалами, характеристики матеріалів взяті з табл. 6.1.

У таблиці 6.7 наведені результати розрахунку оцінювання надійності силосу на основі аналізу резерву міцності з урахуванням складного напружено-деформованого стану.

Таблиця 6.7

Розрахунку надійності металевого спірально-фальцевого силосу з урахуванням напружено-деформованого стану

| Параметри розрахунку надійності | Кукурудза | Соя | Пшениця | Ячмінь |
|--------------------------------------|---|---|--|---|
| $\bar{\sigma}_y$, МПа | 352,0 | 352,0 | 352,0 | 352,0 |
| $\bar{\sigma}_k$, МПа | 67,47 | 67,41 | 71,35 | 73,78 |
| $\bar{\sigma}_u$, МПа | -121,00 | -126,76 | -131,74 | -127,03 |
| $\bar{\sigma}_i$, МПа | 165,4 | 170,75 | 178,45 | 175,94 |
| \bar{Y} , МПа | 186,6 | 181,25 | 173,54 | 176,06 |
| A_1 , МПа | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A_2 , м | 17 973,36 | 18 270,3 | 17 470,04 | 19 387,00 |
| A_3 , МПа | -150,6 | -169,88 | -155,72 | -186,4 |
| A_4 , МПа | -92,02 | -68,15 | -100,33 | -77,69 |
| $A_1^2 \cdot \hat{\sigma}_y^2$, МПа | 853 574,66 | 853 574,66 | 853 574,66 | 853 574,66 |
| $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$, МПа | 49 134,66 | 50 771,43 | 104 715,83 | 57 170,32 |
| $A_3^2 \cdot \hat{\mu}^2$, МПа | 89 728,86 | 53 111,57 | 44 629,13 | 48 601,82 |
| $A_4^2 \cdot \hat{\lambda}^2$, МПа | 24 693,54 | 11 797,84 | 18 784,29 | 13 445,70 |
| \hat{Y} , МПа | 31,9 | 31,13 | 31,96 | 31,19 |
| β | 5,85 | 5,82 | 5,43 | 5,64 |
| $Q(\beta)$ | $2,57 \times 10^{-9}$ | $3,02 \times 10^{-9}$ | $2,9 \times 10^{-8}$ | $8,82 \times 10^{-9}$ |

За результатами проведених розрахунків можна стверджувати, що надійність силосної ємності забезпечена.

Аналіз проведених розрахунків оцінювання надійності металевих спіральньо-фальцевих силосів показав високу надійність цих конструкцій.

6.5. Висновки по розділу

У даному розділі було розроблено методика оцінювання надійності металевих спіральньо-фальцевих силосів на основі аналізу резерву міцності. Оцінювання надійності силосу на основі аналізу резерву міцності було проведено за трьома станами силосної конструкції: з урахуванням кільцевих напружень, з урахуванням складного напруженого стану та складного напружено деформованого стану.

Результати показали, що найбільший процент розбіжності за двома методами: на основі аналізу резерву міцності з урахуванням кільцевих напружень та з урахуванням складного напруженого стану, має коефіцієнт A_2 у визначенні стандарту резерву міцності – від 54% до 85% та відповідно добуток $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$ – від 137% до 240 %. Тобто при врахуванні поздовжніх напружень, саме питома вага сипучого матеріалу відіграє значну роль у величині характеристики безпеки. Величина характеристики безпеки при розрахунку за двома першими методами має розбіжність 24 – 31%.

За результатами порівняння розрахунків за методом на основі аналізу резерву міцності, з урахуванням складного напруженого стану та з врахуванням складного напружено-деформованого стану, виявлено, що врахування прогину міжфальцевої зони спіральньо-фальцевої силосної конструкції впливає на значне підвищення меридіональних напружень, різниця меридіональних напружень за двома методами складає від 129% до 154%. Також найбільший процент розбіжності має коефіцієнт A_2 від 124% до 180%, A_4 від 167% до 188%. Значна різниця спостерігається у добутку $A_2^2 \cdot \hat{\gamma}^2$ – від 400% до 682 %. Тобто при врахуванні прогину міжфальцевої зони спіральньо-фальцевої силосної

конструкції, значну роль у величині характеристики безпеки відіграють такі статистичні характеристики сипучих матеріалів, як питома вага сипучого матеріалу та коефіцієнт бокового тиску. Враховуючи, що розбіжність між приведеними та фібровими напруженнями складає 36 – 38%, і відповідно зменшується характеристика безпеки від 52% до 62%.

За результатами розрахунків:

- створено таблиці порівняння параметрів розрахунку надійності;
- побудовано графіки напружень у залежності від розкиду характеристик сипучого (пшениці);
- побудовано графіки напружень та характеристик безпеки в залежності від розкиду характеристик сипучого (пшениці);
- одержано чисельні оцінки надійності спірально-фальцевого силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами.

Одержані чисельні значення підтвердили високу надійність металевих спірально-фальцевих силосів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Відповідно до поставлених завдань дослідження, зроблено наступні висновки:

1. Наведено узагальнену класифікацію металевих силосів показала велику кількість різновидів металевих силосних ємностей. Описано технологію виготовлення спірально-фальцевих силосів, розглянуто поетапний процес монтажу конструкції на будівельному майданчику. Проаналізовано переваги та недоліки спірально-фальцевих силосів.

На основі аналізу існуючих робіт, зроблено висновок, що робота фальцевих ребер при розтягуючих зусиллях та при згині міжфальцевої зони досі залишається дослідженою не в повній мірі. При великій кількості праць із методики оцінювання надійності металевих конструкцій, дослідження надійності спірально-фальцевих силосів відсутні. Це стримує більш широке впровадження цих інноваційних багатофункціональних листових конструкцій.

2. Розглянуто історії винаходу спірально-фальцевих конструкцій та проаналізовано область застосування цих конструкцій у різних галузях промисловості. За результатами проведеного дослідження створено таблицю із загальними даними щодо параметрів спірально-фальцевих силосів, застосованих у різних сферах промисловості. Узагальнення даних підтвердило широке застосування металевих спірально-фальцевих конструкцій, яке продовжує розширюватись, що доводить унікальність та перспективність даних конструкцій.

3. Одержано нові результати порівняння нормативних розрахунків визначення навантажень та впливів на конструкції силосу за ДБН В2.2-8-98 та ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Проведений аналіз виявив розходження у вказаних нормативних документах, що потрібно враховувати у проектуванні:

- значення нормативних горизонтальних тисків на стінку силосу за ДСТУ, при яких враховувався розкид сипких матеріалів, на 27–48 % більші, ніж при розрахунках за ДБН;

– значення нормативних вертикальних тисків від сил тертя тиски за ДСТУ більші на 1–23 %.

4. Досліджено специфіку конструкції спірально-фальцевих силосів, яка впливає на їх напружено-деформований стан. Доведено, що фальцеві ребра суттєво впливають на напружено-деформований стан силосної ємності. Поздовжні зусилля в місцях розміщення ребер передаються з ексцентриситетом, що призводить до появи згинаючого меридіонального моменту, який у свою чергу викликає згин у міжфальцевій зоні та одночасне розкриття фальцевого замка. Аналіз вище перерахованих умов роботи спірально-фальцевих силосних ємностей підтверджує важливість як дослідження фальцевого замка на розтягуючі навантаження, так і дослідження міжфальцевої зони оболонки силосу на згин.

5. Проаналізовано особливості розрахункової схеми спірально-фальцевих силосів. Проведено моделювання спірально-фальцевого силосу за допомогою програмного комплексу ЛПРА-САПР.

6. Розглянуто напружено-деформований стан міжфальцевої зони оболонки з постійною товщиною стінки. Проаналізовано алгоритм розрахунку прогину та згинаючого моменту в характерних перерізах обичайки, враховуючи специфіку конструкції спірально-фальцевих силосів. Проведено порівняння теоретичних розрахунків із результатами розрахунку силосу методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛПРА-САПР. У результаті порівнянь отримано, що різниця значень переміщень, визначених за допомогою формул (3.39), (3.41) та в програмному комплексі ЛПРА-САПР складає: на контурі обичайки – 4,8%; у середині обичайки – 3,8%.

7. Проведено експериментальне дослідження елементів конструкції спірально-фальцевих силосів. Вивчено реальну роботу фальцевого з'єднання штрипса при дії розтягуючих навантажень та роботу оболонки в міжфальцевій зоні при згину. Виявлено, що експлуатаційні навантаження відповідають початковій стадії роботи фальця без його розкриття. Доведено, що випробувана

конструкція фальця забезпечує надійну роботу оболонки на проєктні навантаження. Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що на всіх циклах завантаження міжфальцева зона працювала пружно.

8. Зроблено огляд прикладів будівництва та досвіду експлуатації металевих спіральньо-фальцевих силосів на території України. На основі обстеження Ботієвського елеватора, зроблено висновок про надійність спіральньо-фальцевих силосів, що знаходилися у багаторічній експлуатації.

9. Розроблено методику оцінювання надійності конструкцій металевих спіральньо-фальцевих силосів. Оцінювання надійності силосу було проведено за трьома станами силосної конструкції: з урахуванням кільцевих напружень, з урахуванням складного напруженого стану та складного напружено-деформованого стану.

10. Одержано чисельні оцінки надійності спіральньо-фальцевого силосу при завантаженні різними сипучими матеріалами. Отримані чисельні значення підтвердили високу надійність металевих спіральньо-фальцевих силосів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aldosary M., Wang J., Li, C. Structural reliability and stochastic finite element methods: State-of-the-art review and evidence-based comparison. *Engineering Computations*. 2018. Vol. 35, No 6. P. 2165 – 2214.
2. Ang A.H-S., Ma H-P. On the Reliability of Structural Systems. *Proceedings of JCOSSAR: 3-rd International Conference on Structural Safety and Reliability*. 1981. P. 245 – 314.
3. Baballëku M., Isufi B. Evaluation of structural reliability using simulation methods. *Građevinski materijali i konstrukcije*. 2015. Vol. 58, No 1. P. 17 – 23.
4. Babout L., Grudzień K., Waktola S., Miśkiewicz K., Adrien J., Maire E. Quantitative analysis of flow dynamics of organic granular materials inside a versatile silo model during time-lapse X-ray tomography experiments. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. Vol. 172. P. 105346.
5. Barman B. Structural reliability assessment with stochastic parameters. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2017. Vol. 10, No 3. P. 383 – 389.
6. Beck A. T., Da Rosa E.. Structural reliability analysis using deterministic finite element programs. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 3. P. 197 – 222.
7. Benjamin J. R., Cornell C. A. Probability, statistics, and decision for civil engineers. Courier Corporation. 2014. 704 p.
8. Benjamin J.R., Cornell C.A. Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. New York: McGraw-Hill. 1970. 684 p.
9. Bennett H.M., Ang A.H-S. Formulations of Structural System Reliability. *Journ. of Engineering Mechanics*. 1981. Vol.112, No 11. P. 1135 –1151.
10. Bolotin V.V. Statistical methods in structural mechanics. Holden-Day, 1969. 240 p.

11. Broggi M., Calvi A., Schueller G. I. Reliability assessment of axially compressed composite cylindrical shells with random imperfections. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2011. Vol. 11, No. 02. P. 215 – 236.
12. Buckling of thin metal shells / edited by Teng J. G., Rotter J. M. CRC Press, 2006. 520 p.
13. Casciati F., G. Sacchi. On the reliability theory of the structures. *15th Polish Solid Mechanics Conference*. Zakopane, 1973. P. 291 – 298.
14. Chung Y. C. Granular stresses in granular flows subjected to different obstacles. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 247. P.108190.
15. Cornell C.A. Bounds on the Reliability of Structural Systems. *American Society of Civil Engineers: Journal of the Structural Division*. 1967. Vol. 93. P. 171 – 200.
16. Cornell C.A. Structural Safety Specifications Based on Second Moment Reliability Analysis. *Symposium on Concept of Safety*. Zurich, 1969. P. 235 – 246.
17. De Albuquerque C. S., de Vasconcellos Real, M. Comparative study of computational methods of structural reliability assessment. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*. 2022. Vol. 9, P. 1 – 5.
18. Debnath B., Kumaran V., Rao K. K. Dense granular flow through a flat-bottomed silo: Comparison of the DEM and continuum models with experiments. *Powder Technology*. 2024. Vol. 431. P. 119036.
19. Density of wood chips: Density table of wood chips and sawdust, URL: <https://elfa93.ru/raznoe/plotnost-shhepy-drevesnoj-tablicza-plotnosti-shhepy-i-opilok.html>.
20. Dharani K., Jeyakumar D. Analysis and design of fly ash and bed ash silo for thermal power plant structures. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2017. Vol. 3. P. 374 – 380.
21. Ditlevsen O. Generalized Second Moment Reliability Index. *J. Struct. Mech.* 1979. Vol. 7, No 4, P. 435 – 451.

22. Ditlevsen O., Christensen C., & Randrup-Thomsen S. Reliability of Silo Ring Under Lognormal Stochastic Pressure Using Stochastic. *Probabilistic Structural Mechanics: Advances in Structural Reliability Methods: IUTAM Symposium*, San Antonio, Texas, June 7–10, 1993. Springer Science & Business Media. 1993. P. 134 – 162.
23. Ditlevsen O., Madsen H.O. *Structural Reliability Methods*. Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark. 2007. 351 p.
24. Ditlevsen, O., Christensen, C., & Randrup-Thomsen, S. Empirical stochastic silo load model. III: Reliability applications. *Journal of engineering mechanics*. 1995. Vol. 121, No. 9. P. 987 – 993. DOI: 10.5281/zenodo.556256
25. Ellingwood B. Safety Checking Formats for Limit States Design. *Journal of the Structural Div.* 1982. Vol. 108. P. 1481 – 1493.
26. Elliott M.D., Teh, L. H., Ahmed, A. Behaviour and strength of bolted connections failing in shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 153. P. 320 – 329. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.029>
27. Gandia R. M., Gomes F. C., de Paula W. C., de Oliveira Junior E. A., Rodriguez P. J. A. Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under different conditions. *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 209. P. 180 – 199.
28. Gard Timmerfors J., Sjölund T., Jönsson L. J. New drum-chipping technology for a more uniform size distribution of wood chips. *Holzforschung*. 2020. Vol. 74, No 2. P. 116 – 122.
29. Gaspar B., Naess A., Leira B. J., Soares C. G. System reliability analysis by Monte Carlo based method and finite element structural models. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2014. Vol. 136, No 3. P. 031603 – 1 – 031603 – 9. DOI: 10.1115/1.4025871
30. Gejdoš M., Lieskovský M. Wood chip storage in small scale piles as a tool to eliminate selected risks. *Forests*. 2021. Vol. 12, No 3. P. 289.

31. Gołota M., Winkelmann K., Górski J., Mikulski T. Reliability of a silo structure with initial geometric imperfections loaded with pressure below atmospheric and wind. *Computer Methods in Mechanics*. 2011. P. 1 – 6.
32. Gutiérrez G., Colonnello C., Boltenhagen P., Darias J. R., Peralta-Fabi R., Brau F., Clément E. Silo collapse under granular discharge. *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 114, No 1. P. 018001.
33. Hasofer A.M., Lind N.C. Exact and Invariant Second-Moment Code Format. *American Society of Civil Engineers: Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1974. Vol. 100, No. EM1. P. 111 – 121.
34. Heinek S., Polanz S., Huber M. B., Hofmann A., Monthaler G., Fuchs, H. P, Giovannini A. Biomass conditioning—Degradation of biomass during the storage of woodchips. *In Proceedings of the 21st European Biomass Conference and Exhibition*. Copenhagen. Denmark. 2013. P. 3 – 7.
35. Hernández-Delfín D., Pongó T., To K., Börzsönyi T., Hidalgo R. C. Particle flow rate in silos under rotational shear. *Physical Review E*. 2020. Vol. 102, No 4. P. 042902.
36. Jäger-Cañas A, Pasternak H. Influence of closely spaced ring-stiffeners on the axial buckling behavior of cylindrical shells. *EUROSTEEL 2017*. September 13–15, Copenhagen, Denmark. 2017.
37. Jing H., Wang X., Yang J., & Chen H. Static and seismic pressure of cylindrical steel silo model with granular materials. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 198. P. 107515.
38. Khali M., Ruggieri S., Uva G. Assessment of structural behavior, vulnerability, and risk of industrial silos: State-of-the-art and recent research trends. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No 6. P. 3006.
39. Krishna R. R., Prathap H. K., Narendra B. K., Mahadevaiah T. Analysis of silo and comparing silo with different end condition. *AIP Conference Proceedings*. 2020, Vol. 2204, No. 1. P. 020006 – 1 – 020006 – 10.

40. Лапенко О., Махінько А., Махінько Н. До питання розрахунку тонкостінних конструкцій силосних споруд із високоміцних сталей. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 170. С. 85 – 92.
41. Lapenko O., Makhinko A., Makhinko N. Stochastic description of loads on the steel storage capacities. *In Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 528 – 533.
42. Lapko A. Thermal fields in grain during storage-their sources and effects on silo structure reliability. *International agrophysics*. 2005. Vol. 19, No. 2. P. 141 – 146.
43. Lemaire M. Structural reliability. John Wiley & Sons, 2013. 504 p.
44. Li Z., Pasternak H., Geißler K. Experiment-based statistical distribution of buckling loads of cylindrical shells. *ce/papers*. 2023. Vol. 6. P. 1816 – 1820.
45. Li Z., Pasternak H., Jaeger-Canas A. Buckling of ring-stiffened cylindrical shell under axial compression: Experiment and numerical simulation. *Thin-walled structures*. 2021. Vol. 164. P. 107888.
46. Lieskovský M., Gejdoš M., Messingerová V., Němec M., Danihelová Z., Moravčíková V. Biological risks from long-term storage of wood chips. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2017. Vol. 26, No 6. P. 2633 – 2641.
47. LLC «KREATIV-AGROMASH URL: <https://www.creative-silo.com/>
48. López C., Baldomir A., Hernández S. Some applications of reliability based design optimization in engineering structures. *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials*. 2014. P. 393 – 404.
49. McCalmont J. R. Silo types and construction. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture. 1939. 69 p.
50. McGlinchey D. Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation. 2008. Blackwell Publishing, Oxford. 303 p.
51. Melchers R. E., Beck A. T. Structural reliability analysis and prediction. John Wiley & Sons. 2018. 528 p.
52. Mishra A. Role of Reliability Analysis in Structural Design. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment*. 2019. Vol 24. P. 6 – 9.

53. Mudryk K., Jewiarz M., Wróbel M., Niemiec M., Dyjakon A. Evaluation of urban tree leaf biomass-potential, physico-mechanical and chemical parameters of raw material and solid biofuel. *Energies*. 2021. Vol. 14, No 4. P. 818.
54. Pasternak H., Li Z., Jäger-Cañás A. Shell buckling under compression – from the past to the future. *XXI International scientific conference on construction and architecture VSU'2021*. 2021.
55. Pedišius N., Praspaliauskas M., Pedišius J., Dzenajavičienė E. F. Analysis of wood chip characteristics for energy production in Lithuania. *Energies*. 2021. Vol. 14, No 13. P. 3931.
56. Pichugin S., Balkema A.A. Probabilistic Description of Ground Snow Loads for Ukraine. *Snow Engineering. Recent Advances and Developments*. Rotterdam. 2000. P. 251 – 256.
57. Pichugin S., Makhinko A. Reliability of Steel Lattice Towers under Stochastic Along-Wind Load. *Recent Advances in Research on Environmental Effects on Buildings and People*/ Ed. by A. Flaga and T. Lipecki. PAWE. Cracow, Poland, 2010. P. 97 – 106.
58. Pichugin S., Makhinko A., Makhinko N. Stochastic calculation of a quasi-homogeneous bolted joints of the body sheets of the steel silos. *Academic journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2019. Vol. 2, No 53. P. 48 – 53.
59. Pichugin S., Oksenenko K. Area of application and operation experience of spiral-fold silos in Ukraine. *ArCivE 2023. Xth International scientific conference on architecture and civil engineering*. Varna, 2023. Vol. 4. P. 14 – 22.
60. Pichugin S., Oksenenko K. Comparative analysis of design solutions of metal silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2019. Vol. 53, No 2. P. 54-60. doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890.
61. Pichugin S., Oksenenko K. Comparison of design methods for steel silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Vol. 2, No 59. P. 63 – 69.

62. Pichugin S., Oksenenko K. Spiral-fold Silo is Innovative Storage for Wood Chips. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2678. P. 020013. doi.org/10.1063/5.0118821.
63. Pichugin S., Oksenenko K. Using of spiral-fold silos on the territory of Ukraine *ArCivE 2021. Xth International scientific conference on architecture and civil engineering*. Varna, 2021. Vol. 3. P. 430 – 437.
64. Pichugin S., Oksenenko K., Hajiyevev M., Sulewska M. Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos. *ICSF 2021. Second international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters. E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. P. 03006. doi.org/10.1051/e3sconf/202128003006.
65. Pichugin S.F., Kharchenko Y.A. Reliability of Steel Tubular Trusses. *Steel Structures and Bridges 2000: Proc. of 19th Czech and Slovak International Conference*. Strebse Pleso, High Tatras, Slovak Republic, 2000. P. 57 – 62.
66. Pichugin S.F., Klochko L.A. Modern problems of reliability in construction: manual for students. Poltava. NY PP. 2021. 147 p.
67. Rabinovich E., Kalman H., Peterson P. F. Granular material flow regime map for planar silos and hoppers. *Powder Technology*. 2021. Vol. 377. P. 597 – 606.
68. Raizer V.D. Reliability of Structures. Analysis and applications. New York: Backbone Publishing, 2009. 146 p.
69. Rotter J. Michael. Silos and tanks in research and practice: state of the art and current challenges. In: *Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2009. P. 65 – 76.
70. Rotter J.M. Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos. CRC Press, 2001. 256 p.
71. Schulze D. Powders and Bulk Solids. Behavior, Characterization, Storage and Flow. Springer, 2009. 526 p.

72. Sielamowicz I, Balevicius R. Experimental and computation analysis of granular material flow in model silos. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences Experimental, 2013. 318 p.
73. Silos: fundamentals of theory, behaviour and design / edited by Brown, C. J., Nielsen, J. CRC Press. 1998. 856 p.
74. Silos: Fundamentals of Theory, Behaviour and Design /1st Edition by C.J. Brown, J. Nielsen. London and New York: E & FN Spon, 2011. 856 p.
75. Simões L. M., Farkas J., Jármai K. Reliability-based optimum design of a square box column constructed from cellular plates. *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures: International Conference Proceedings 2013, Miskolc, Hungary, April 24-26, 2013*. P. 69 – 75.
76. Sokolowski D., Kaminski M. M. Some reliability issues of the corrugated i-beam girder. *Engineering transactions*. 2015. Vol. 63, No 3. P. 297 – 315.
77. Stasiak M., Molenda M., Bańda M., Horabik J., Wiącek J., Parafiniuk P., Oniszczyk T. Friction and shear properties of pine biomass and pellets. *Materials*. 2020. Vol. 13, No 16. P. 3567.
78. Sun Y. D., Wang Y. P. Collapse reasons analysis of a large steel silo. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 368. P 647 – 650.
79. Technology of pulp and paper production. Reference materials / edited by. P.S. Osipova. LTA, 2002. p. 420.
80. Thoft-Cristensen P., Baker M. J. Structural reliability theory and its applications. Springer Science & Business Media. 2012. 268 p.
81. Thomson F. M. Storage and flow of particulate solids. In: Handbook of powder science & technology. Boston, MA: Springer US, 1997. p. 389 – 486.
82. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells. McGraw-Hill, 1959. 580 p.
83. Vidal P., Guaita M., Ayuga F. Analysis of dynamic discharge pressures in cylindrical slender silos with a flat bottom or with a hopper: comparison with Eurocode 1. *Biosystems engineering*. 2005, Vol. 91, No 3. P. 335 – 348.

84. Wang P., Zhu L., Zhu X. Flow pattern and normal pressure distribution in flat bottom silo discharged using wall outlet. *Powder Technol.* 2016. Vol. 295. P. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.03.036>
85. Wang X., Shi Q., Fan W., Wang R., Wang L. Comparison of the reliability-based and safety factor methods for structural design. *Applied Mathematical Modelling.* 2019. Vol. 72. P. 68 – 84.
86. Wirth S., “Beulsicherheitsnachweise für schalenförmige Bauteile nach EN 1993-1-6: Kritische Analyse der praktischen Anwendbarkeit anhand zweier Fallstudien mit experimentellem Hintergrund“: Dissertation: University of Duisburg-Essen, Shaker Verlag. 2008.
87. Xaver Lipp URL: <https://xaver-lipp.com/>
88. Zaccari N., Cudemo M. Steel silo failure and reinforcement proposal. *Engineering failure analysis.* 2016. Vol 63. P 1 – 11.
89. Zaheer M. M., Islam N. Reliability analysis of universal joint of a compliant platform. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures.* 2010. Vol. 33, No 7. P. 408 – 419.
90. Zhang D., Dong S., Guo H., Yang X., Cui, L., Liu X. Flow behavior of granular material during funnel and mixed flow discharges: A comparative analysis. *Powder Technology.* 2022. Vol. 396. P. 127 – 138.
91. Баженов В.А., Ворона Ю.В., Перельмутер А.В. Будівельна механіка і теорія споруд. Нариси з історії. К.: Каравела. 2016. 428 с.
92. Баженов В.А., Гранат С.Я., Шишов О.В. Будівельна механіка. Комп’ютерний курс: підручник. К.: КНУБА. 1999. 584 с.
93. Банников Д.О. Теорія формоутворення вертикальних сталевих ємнісних конструкцій для сипучих матеріалів: автореф. дис. на здобуття докт. техн. наук. Макіївка, 2010. 38 с.
94. Банников Д. О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції. Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2009. 171 с.

95. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження статичної поведінки сипучого середовища в ємнісній конструкції. *Вісник ДНУЗТ*. 2009. Вип. 26. С. 103 – 111.
96. Банніков Д. О. Тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастих ємнісних конструкцій. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2008. Вип. 23. С. 143 – 149.
97. Банніков Д. О., Тютюкін О. Л. Перспективні напрями розвитку механіки сипучого середовища. *Наука та інновації*. 2020. Вип. 16. С. 45 – 54.
98. Вобліков Є.М. Технологія елеваторної промисловості. Київ:Лань. 2010. 384 с.
99. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель та споруд. К:Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018. 30 с.
100. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Видання офіційне. Київ, Мінбуд України. 2006. 75 с.
101. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна. К.: Держбуд України. 1998. 41 с.
102. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. К.: Мінрегіон України, 2014. 205 с.
103. Демідів С.В., Фісенко А.С., Мислін В.А. та ін., Архітектурне проектування промислових підприємств: Навчальний посібник для вузів. К. 1984. 392 с.
104. Довідник матеріалів TapCo Inc URL:http://tapcoinc.com/content/product_data/Tapco_Catalog_09_p88-94.pdf
105. ДСТУ ISO 6892-1:2019 (ISO 6892-1:2016, IDT) Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури

106. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 Єврокод 1: Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари. К. : Мінрегіонбуд, 2012. 180 с.
107. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-6:2011 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1 – 6. Міцність та стійкість оболонок. К. : Мінрегіонбуд, 2011. 146 с.
108. Канарчук В.Є., Полянський С.К., Дмитрієв М.М. Надійність машин: Підручник. К.: Либідь. 2003. 424 с.
109. Кінаш Р. І. Методи нормування тимчасових навантажень та оцінювання надійності будівельних конструкцій за умов неповної інформації : дис. д-ра техн. наук. Київ, 2000. 530 с.
110. Клименко Ф. Є. Металеві конструкції: підруч. для студ. буд. спец. вищ. навч. закл. 2.вид., випр. і доп. Л. : Світ, 2002. 312 с.
111. Лапенко О.І., Махінько А.В., Махінько Н.О. До питання розрахунку тонкостінних конструкцій силосних споруд із високоміцних сталей. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ. 2017. Вип.179. С. 85 – 92.
112. Махінько А. В., Махінько Н. О. Практичні підходи до розрахунку надійності багатоболтовах з'єднань листів корпусу силосних ємностей. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2020. Вип. № 24. С. 91 – 97.
113. Махінько А., Махінько Н. Сталеві ємності для зберігання зерна. Книга 1. К.: «Сталь». 2021. 356 с.
114. Махінько А., Махінько Н., Воронцов О. Надійність та безпечна експлуатація ємностей для зберігання зерна. *Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022)* : зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнар. наук.-техн. конф., м. Полтава, 20–22 черв. 2022 р. м. Полтава, 2022. С. 75–77.
115. Махінько А.В. Імовірнісний розрахунок баштових опор зв'язку Полтава: ПолтНТУ, 2012. 410 с.

116. Махінько А.В. Надійність елементів металоконструкцій під дією випадкових змінних навантажень: автореф. дис. на здобуття канд. техн. наук. ПолтНТУ. Полтава. 2006. 24 с.
117. Махінько А.В. Надійність металевих баштових опор зв'язку: автореф. дис. на здобуття докт. техн. наук. ПолтНТУ. Полтава, 2012. 40 с.
118. Махінько Н.О. Методологія розрахунку надійності сталевих ємностей для зберігання зерна: автореф. дис. на здобуття. д-ра наук: 05.23.01. Національний авіаційний університет. Київ. Одеська державна академія будівництва і архітектури, Одеса, 2019. 40 с.
119. Онищенко В.О., Винников Ю.Л., Зоценко М.Л., Харченко М.О., Ларцева І.І., Бредун В.І., Нестеренко Т.М. Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах. Полтава: ФОП Пусан А.Ф.. 2019. 233 с.
120. Пашинський, В. А., Пашинський, М. В., Шамара, В. С. Вплив розрахункових параметрів методу граничних станів на надійність сталевих кроквяних балок. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем*. Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., м. Кропивницький, 13-15 квітня 2022 р. м. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 145 – 148.
121. Перельмутер А.В., Пічугін С.Ф. Метод граничних станів. Загальні положення та застосування в нормах проектування. К.: «Софія -А». 2024. 253 с.
122. Пермяков В.О., Нілов О.О., Шимановський О.В., Белов І.Д., Лавріненко Л.І., Володимирськиц В.О. Металеві конструкції: Підручник / під загальною редакцією В.О. Пермякова та О.В. Шимановського. К.: «Сталь». 2008. 812 с.
123. Писаренко Г.С., Квітка О.Л. Уманський Е.С. Опір матеріалів К.:Вища шк. 2004. 655 с.
124. Пічугін С. Ф., Дмитренко А.О., Оксененко К. О. Робота фальцевого замка металевих спіраль-но-навивних силосів. *Сучасні будівельні конструкції з*

- металу та деревини. Тези доповідей.* м. Одеса, 9-11 червня 2022р. м. Одеса: ОДАБА. 2022. С. 35 – 37.
125. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Конструктивні рішення споруд для тимчасового зберігання зерна. *Environment recovery and reconstruction: war contex 2022.* Зб. матер. Міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 17–18 листопада 2022 року. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 85 – 86.
126. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Металеве сховище спірально-фальцевого типу. *Проблеми будівельного та транспортного комплексів.* Зб. матер. Міжнар. наук.-тех. on-line конф. м. Кропивницький, 23 – 24 травня 2023р. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 114 – 115
127. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Метантенк – металевий спірально-фальцевий резервуар – у складі біоенергетичних об’єктів. *«Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022».* Зб. матер. I Міжнар. наук.-практ. конф., Полтава – Львів. 26 – 27 травня 2022р. Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». 2022. С. 483 – 485.
128. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Модульний склад шатрового типу для тимчасового зберігання зерна. *74-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету.* Зб. матер. 74-ої наук. конф. м. Полтава, 28 квітня 2022р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 106 – 107.
129. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Перспективні рішення ферментерів у складі виробництв біоетанола. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження.* Зб. матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 1 – 2 грудня 2022 року. Полтава : НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 236 – 239.
130. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Розрахунок міцності та надійності сталевих силосів. *Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану.* Зб. наук. пр. за матер. XIV Міжнар. наук.-тех. конф. м.

- Полтава, 20 – 22 червня 2022р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 99 – 101.
131. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Тріска деревини, як паливо для біоенергетичних комплексів. *«Екологія. Довкілля. Енергозбереження»*. Матер. II міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 2 – 3 грудня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 266 – 268.
132. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О., Андрієвський Ю.В. Інноваційний тип тонкостінної просторової конструкції для сипучих матеріалів – спірально-фальцевий металевий силос. *«Тренди та тенденції розвитку будівельної галузі»*: матер. міжнар. наук.-практ. конф. Харків, 18 – 19 листопада 2020р. Харків: ХНУМГ. 2020. С. 119 – 120.
133. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О., Андрієвський Ю.В. Спірально-фальцевий силос – інноваційний склад для зберігання тріски деревини. «Інноваційні технології у будівництві цивільній інженерії та архітектурі». Матер. XIX міжнар. наук.-практ. конф. м. Чернігів, 19 – 22 вересня 2021р. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». С. 245 – 246.
134. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Дослідження роботи міжфальцевої зони стінки металевого спірально-фальцевого силосу. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Тези доповідей. м. Одеса, 8 – 10 червня 2023р. м. Одеса: ОДАБА. 2023. С. 35 – 37.
135. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Дослідження роботи на згин міжфальцевої зони стінки спіраль-фальцевого силосу. *Проблеми будівельного та транспортного комплексів*. Зб. матер. Міжнар. наук.-тех. on-line конф. м. Кропивницький, 23 – 24 травня 2023р. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 116 – 117.
136. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Експериментальне дослідження сталевого спірально-фальцевого силосу. *73-я наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та*

- студентів університету. Тези 73-ої наук. конф. м. Полтава, 21 квітня – 13 травня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 132 – 133.*
137. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Експериментальне дослідження конструкцій сталевих спіральних-фальцевих силосів. *IV Міжнародна українсько-азербайджанська конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2021»*: зб. наук. праць за матер. IV Міжнар. українсько-азербайджанська конф. Баку – Полтава, 20 травня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 156 – 158.
138. Пічугін С., Дмитренко А., Оксененко К., Експериментальне дослідження елементів конструкції металевих спіральних-фальцевих силосів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 2022. Вип. 26. С. 135 – 144. doi:10.31650/2707-3068-2022-26-135-144.*
139. Пічугін С., Оксененко К. З досвіду експлуатації економічних металевих спіральних-фальцевих силосів для сипучих матеріалів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2021. Вип. 40. С. 166 – 173.*
140. Пічугін С., Оксененко К. Конструктивні рішення сталевих силосів для сипучих матеріалів. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи*: зб. наук. праць XII Міжнар. наук.-практ. конф.. м. Полтава, 6 грудня 2019р. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка. 2019. С. 291 – 294.
141. Пічугін С., Оксененко К. Особливості конструкцій і розрахунку сталевих спіральних-фальцевих силосів. *III Міжнародна українсько-азербайджанська конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2020»*: зб. наук. праць за матер. III Міжнар. українсько-азербайджанська конф. Баку – Полтава, 1 – 2 червня 2020р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2020. С. 161 – 163.
142. Пічугін С., Оксененко К. Спіральні-фальцеві ємності – невід’ємна складова біоенергетичних комплексів. *Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України. Матер. наук.-практ. конф. м.*

- Дніпро, 13 березня 2024 р. Дніпро: Енерго-інноваційний хаб ПДАБА, 2024. С.100 – 103.
143. Пічугін С., Оксененко К. Спірально-фальцеві силоси – надійні листові конструкції універсального призначення. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи*: зб. наук. праць XVI Міжнар. наук.-практ. конф.. м. Полтава, 12 – 13 грудня 2023р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2023. С. 324 – 326.
144. Пічугін С., Оксененко К. Сталеві спірально-фальцеві конструкції у складі біоенергетичних комплексів. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022*: колективна монографія Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». Дніпро, 2022. С 470 – 484.
145. Пічугін С., Оксененко К. Сталеві спірально-фальцеві силоси: конструкція і розрахунок. *72-га наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, присвячена 90-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*. Тези 72-ої наук. конф. м. Полтава, 21 квітня – 6 травня 2020р. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2020. С. 492 – 493.
146. Пічугін С., Оксененко К., Сучасні спірально-фальцеві ферментери у складі підприємств із виробництва біоетанолу. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження. 2023*: колективна монографія / під ред. О. В. Степової. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. Полтава, 2023. С. 158 – 170.
147. Пічугін С., Шульгін В., Оксененко К. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану стінки сталевих спіральних силосів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2023. Вип. 27. С. 94 – 103. doi:10.31650/2707-3068-2023-27-94-103
148. Пічугін С.Ф. Етапи розвитку загальної методики розрахунку будівельних конструкцій. Полтава: ТОВ «АСМІ». 2024. 400 с.

149. Пічугін С.Ф. Курс лекцій із дисципліни «Металеві конструкції» для студентів, які проходять підготовку бакалаврів за спеціальності 0901 «Будівництво та цивільна інженерія». Частина 5 «Спеціальні металеві конструкції». Полтава: ПолтНТУ. 2018. 41 с.
150. Пічугін С.Ф. Наукова школа «Надійність будівельних конструкцій» – Досягнення і перспективи. *Зб. наук. праць (галуз. машинобуд., будівництво)*. Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка. 2015. Вип.1. С. 3 – 16.
151. Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій. Полтава. ТОВ «АСМІ». 2016. 520 с.
152. Пічугін С.Ф. Статистичний опис механічних характеристик сталей для будівельних конструкцій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: Зб. наук. праць*. Луцьк. Луц. НТУ. 2020. Вип. 14. С. 147 – 159.
153. Пічугін С.Ф. Статистичні характеристики міцності матеріалів будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського*. К.: Вид-во «Сталь». 2020. Вип. 25 – 26. С. 58 – 80.
154. Пічугін С.Ф. Сучасні проблеми надійності в будвництві: Навчальний посібник. Полтава. ПолтНТУ. 2019. 81 с.
155. Пічугін С.Ф. Сучасні проблеми надійності в будівництві: Навчальний посібник (теоретична частина курсу). Полтава. НУ ПП. 2023. 254 с.
156. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О., Андрієвський Ю.В. Застосування сталевих спірально-фальцевих силосів у сучасних умовах. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2023. Вип. 4. С. 25 – 31.
157. Семко О.В. Надійність сталезалізобетонних конструкцій: автореф. дис. на здобуття докт. техн. наук. ПолтНТУ. Полтава. 2006. 34 с.
158. Смірнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик. Донецьк. Східний видавничий дім. 2002. 269 с.
159. Стороженко Л.І., Махінько А.В. Сталеві циліндричні резервуари.Потава: ПолтНТУ. 2012. 213 с.

ДОДАТКИ

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ
ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

Список опублікованих наукових праць за темою дисертації

Публікації у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз.

1. Pichugin S., Oksenenko K., Hajiyevev M., Sulewska M. Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos. *ICSF 2021. Second international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters. E3S Web of Conferences.* 2021. Vol. 280. P. 03006. doi.org/10.1051/e3sconf/202128003006. (SCOPUS, закордонне видання). (Особистий внесок – описано особливості фальцевого замку, його геометрія та розташування. Зроблено аналіз особливостей конструкції спіраль-но-фальцевого силосу, які впливають на їх напружено-деформований стан)
2. Pichugin S., Oksenenko K. Spiral-fold Silo is Innovative Storage for Wood Chips. *AIP Conference Proceedings.* 2023. Vol. 2678. P. 020013. doi.org/10.1063/5.0118821. (SCOPUS, закордонне видання). (Особистий внесок – проведено розгляд особливостей тріски деревини як сипучого матеріалу. Наведено приклади використання спіраль-но-фальцевих силосів, як складу для зберігання тріски деревини, за кордоном та на території України. Описано досвід експлуатації спіраль-но-фальцевих силосів на території України).
3. Pichugin S., Oksenenko K. Using of spiral-fold silos on the territory of Ukraine *ArCivE 2021. Xth International scientific conference on architecture and civil engineering.* Varna, 2021. Vol. 3. P. 430 – 437. <https://events.vfu.bg/arcive/files/2021/Proceedings%20ArCivE%202021.pdf> (Особистий внесок – наведено розрахункову схему силосу. Проаналізовано нормативні документи, що регламентують питання проектування сталевих силосних ємностей на території України).

4. Pichugin S., Oksenenko K. Area of application and operation experience of spiral-fold silos in Ukraine. *ArCivE 2023. Xth International scientific conference on architecture and civil engineering*. Varna, 2023. Vol. 4. P. 14 – 22. <https://events.vfu.bg/arcive/files/2023/Proceedings%20ArCivE%202023.pdf>.

(Особистий внесок – проаналізовано та описано сферу застосування спіральньо-фальцевих конструкцій: силоси, для різних видів сипучих матеріалів; резервуари для зберігання різних рідин, метантенки в складі біоенергетичних установках. Розглянуто приклади багаторічного досвіду експлуатації цих конструкцій в різних галузях на території України. Наведено приклади аварій спіральньо-фальцевих силосів та причини їх виникнення).

Публікації у наукових фахових виданнях України

5. Pichugin S., Oksenenko K. Comparative analysis of design solutions of metal silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2019. Vol. 53, № 2. P. 54 – 60. doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890. (Фахове видання)

(Особистий внесок – сформовано класифікацію металевих силосів та досліджено галузь їх застосування. Описано технологія виготовлення спіральньо-фальцевих силосів, проаналізовано функції кожного механізму, які використовуються при монтажі силосу).

6. Пічугін С., Оксененко К. З досвіду експлуатації економічних металевих спіральньо-фальцевих силосів для сипучих матеріалів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2021. Вип. 40, С. 166 – 173. (Фахове видання) (Особистий внесок – проведено технічне обстеження елеватора зі спіральньо-фальцевими силосами з багаторічним досвідом експлуатації).

7. Пічугін С., Дмитренко А., Оксененко К., Експериментальне дослідження елементів конструкції металевих спіральньо-фальцевих силосів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2022. Вип. 26. С. 135 – 144. [doi:10.31650/2707-3068-2022-26-135-144](https://doi.org/10.31650/2707-3068-2022-26-135-144). (Фахове видання) (Особистий внесок – проведено експериментальне дослідження, проаналізовано результати експерименту).

8. Pichugin S., Oksenenko K. Comparison of design methods for steel silos. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2022, Vol. 2, №59. P. 63 – 69. (Фахове видання) (Особистий внесок – проведено огляд нормативних документів, які діють на території України, що регламентують питання визначення навантажень та зусиль в силосних ємностях. Проаналізовано відмінності між розрахунками горизонтальних та вертикальних тисків на стіни силосів за ДБН В2.2-8-98 Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна та ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Ч. 4. Бункери і резервуари.).

9. Пічугін С., Шульгін В., Оксененко К. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану стінки сталевго спіральнo-фальцевого силосу. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2023. Вип. 27. С. 94 – 103. doi:10.31650/2707-3068-2023-27-94-103. (Фахове видання) (Особистий внесок – проведено експериментальне дослідження, проаналізовано результати експерименту).

Публікації в інших виданнях

10. Пічугін С., Оксененко К. Сталеві спіральнo-фальцеві конструкції у складі біоенергетичних комплексів. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022*: колективна монографія Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». Дніпро, 2022. С 470 – 484. (Особистий внесок – Проаналізовано характеристики тріски деревини, як сипучого матеріалу. Розглянуто приклади використання спіральнo-фальцевих конструкцій, як складу для зберігання біомаси в твердому вигляді, за кордоном та на території України. Описано перший спіральнo-фальцевий метантенк з горизонтальним процесом ферментації. Розглянуто види спіральнo-фальцевих метантенків, їх технічні характеристики та особливості.

11. Пічугін С., Оксененко К., Сучасні спіральнo-фальцеві ферментери у складі підприємств із виробництва біоетанолу. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження*. 2023: колективна монографія / під ред. О. В. Степової.

Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. Полтава, 2023. С. 158 – 170. *(Особистий внесок –Надано класифікацію ферментерів, в залежності від способу ферментації субстрату, виділені переваги твердофазного бродіння. Описано типи ферментерів, їх переваги, недоліки та сфери застосування, в залежності від внутрішнього оснащення. Проаналізовано переваги та недоліки металевих та залізобетонних резервуарів, застосованих в якості конструкцій ферментерів. Описаний перший горизонтальний ферментер спіральньо-фальцевого типу. Наведено конструкцію та характеристики сучасного спіральньо-фальцевого ферментера – важливої складової біоетанольних комплексів.)*

12. Пічугін С.Ф., Оксененко К.О., Андрієвський Ю.В. Застосування сталевих спіральньо-фальцевих силосів у сучасних умовах. *Промислове будівництво та інженерні споруди. 2023. Вип. 4. С. 25 – 31. (Особистий внесок – Проаналізовано та описано сферу застосування спіральньо-фальцевих конструкцій. Розглянуто приклади багаторічного досвіду експлуатації цих конструкцій в різних галузях на території України. Наведено приклади аварій спіральньо-фальцевих силосів та причини їх виникнення. Проаналізовано експериментальні дослідження спіральньо-фальцевих силосів, які підтвердили високу надійність і економічність цих конструкцій. Показано, що спіральньо-фальцеві конструкції виявилися перспективними для влаштування мобільних модульних складів шатрового типу для тимчасового зберігання зернових культур.)*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

13. Пічугін С., Оксененко К. Конструктивні рішення сталевих силосів для сипучих матеріалів. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи: зб. наук. праць XII Міжнар. наук.-практ. конф.. м. Полтава, 6 грудня 2019р. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2019. С. 291 – 294.*

14. Пічугін С., Оксененко К. Сталеві спіральньо-фальцеві силоси: конструкція і розрахунок. *72-га наукова конференція професорів, викладачів, наукових*

працівників, аспірантів та студентів університету, присвячена 90-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Тези 72-ої наук. конф. м. Полтава, 21 квітня – 6 травня 2020р. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2020. С. 492 – 493.

15. Пічугін С., Оксененко К. Особливості конструкцій і розрахунку сталевих спірально-фальцевих силосів. *III Міжнародна українсько-азербайджанська конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2020»*: зб. наук. праць за матер. III Міжнар. українсько-азербайджанська конф. Баку – Полтава, 1 – 2 червня 2020р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2020. С. 161 – 163.

16. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О., Андрієвський Ю.В. Інноваційний тип тонкостінної просторової конструкції для сипучих матеріалів – спірально-фальцевий металевий силос. *«Тренди та тенденції розвитку будівельної галузі»*: матер. міжнар. наук.-прак. конф. Харків, 18-19 листопада 2020р. Харків: ХНУМГ. 2020. С. 119 – 120. https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/2020_11_compressed.pdf.

17. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Експериментальне дослідження сталевих спірально-фальцевого силосу. *73-я наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету*. Тези 73-ої наук. конф. м. Полтава, 21 квітня – 13 травня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 132 – 133.

18. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Експериментальне дослідження конструкцій сталевих спірально-фальцевого силосу. *IV Міжнародна українсько-азербайджанська конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2021»*: зб. наук. праць за матер. IV Міжнар. українсько-азербайджанська конф. Баку – Полтава, 20 – 21 травня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 15 – 158.

19. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О., Андрієвський Ю.В. Спірально-фальцевий силос – інноваційний склад для зберігання тріски деревини. *«Інноваційні технології у будівництві цивільній інженерії та архітектурі»*. Матер. XIX міжнар.

наук.-прак. конф. м. Чернігів, 19 – 22 вересня 2021р. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». С. 245 – 246.

20. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Тріска деревини, як паливо для біоенергетичних комплексів. *«Екологія. Довкілля. Енергозбереження»*. Матер. II міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 2 – 3 грудня 2021р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2021. С. 266 – 268.

21. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Модульний склад шатрового типу для тимчасового зберігання зерна. *74-та наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету*. Зб. матер. 74-ої наук. конф. м. Полтава, 28 квітня 2022р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 106 – 107.

22. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Метантенк – металевий спірально-фальцевий резервуар – у складі біоенергетичних об'єктів. *«Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022»*. Зб. матер. I Міжнар. наук.-практ. конф., Полтава – Львів. 26 – 27 травня 2022р. Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». 2022. С. 483 – 485.

23. Пічугін С. Ф., Дмитренко А.О., Оксененко К. О. Робота фальцевого замка металевих спірально-навивних силосів. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Тези доповідей. м. Одеса, 9 – 11 червня 2022р. м. Одеса: ОДАБА. 2022. С. 35 – 37.

24. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Розрахунок міцності та надійності сталевих силосів. *Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану*. Зб. наук. пр. за матер. XIV Міжнар. наук.-тех. конф. м. Полтава, 20 – 22 червня 2022р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 99 – 101.

25. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Конструктивні рішення споруд для тимчасового зберігання зерна. *Environment recovery and reconstruction: war contex 2022*. Зб. матер. Міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 17–18 листопада 2022 року. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 85 – 86.

26. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Перспективні рішення ферментерів у складі виробництв біоетанола. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження*. Зб. матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. м. Полтава, 1 – 2 грудня 2022 року. Полтава : НУПП імені Юрія Кондратюка. 2022. С. 236 – 239.

27. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Дослідження роботи міжфальцевої зони стінки металевого спіраль-фальцевого силосу . *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. Тези доповідей. м. Одеса, 8 – 10 червня 20223р. м. Одеса: ОДАБА. 2023. С. 35 – 37.

28. Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Металева сховище спіраль-фальцевого типу. *Проблеми будівельного та транспортного комплексів*. Зб. матер. Міжнар. наук.-тех. on-line конф. м. Кропивницький, 23 – 24 травня 2023р. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 114 – 115

29. Пічугін С. Ф., Шульгін В.В., Оксененко К. О. Дослідження роботи на згин міжфальцевої зони стінки спіраль-фальцевого силосу. *Проблеми будівельного та транспортного комплексів*. Зб. матер. Міжнар. наук.-тех. on-line конф. м. Кропивницький, 23 – 24 травня 2023р. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 116 – 117.

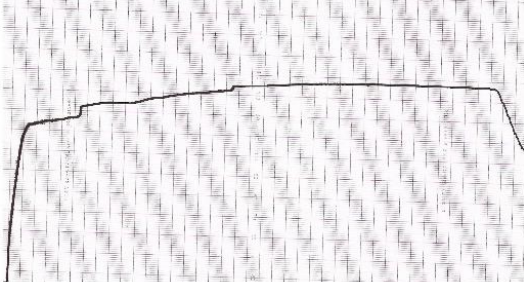
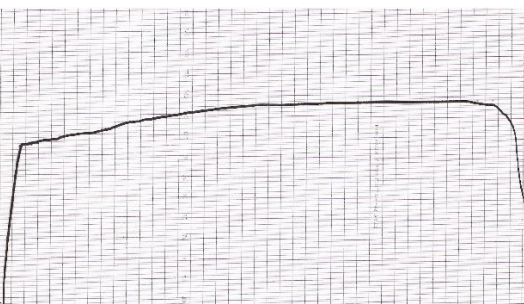
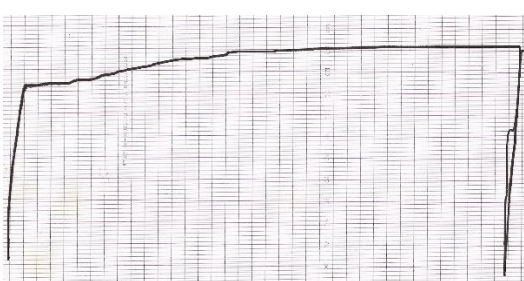
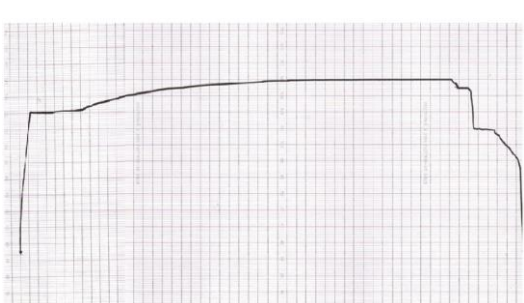
30. Пічугін С., Оксененко К. Спіраль-фальцеві силоси – надійні листові конструкції універсального призначення. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи*: зб. наук. праць XVI Міжнар. наук.-практ. конф.. м. Полтава, 12 – 13 грудня 2023р. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2023. С. 324 – 326.

31. Пічугін С., Оксененко К. Спіраль-фальцеві ємності – невід’ємна складова біоенергетичних комплексів. *Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України*. Матер. наук.-практ. конф. м. Дніпро, 13 березня 2024 р. Дніпро: Енерго-інноваційний хаб ПДАБА, 2024. С.100 – 103.

ДОДАТОК Б
МЕХАНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗРАЗКІВ МАРКИ СТАЛІ DX51D

Таблиця Б1

Протокол контролю механічних випробувань на розтяг зразків сталі марка DX51D

| № зразка | Діаграма розтягу | Границя плинності сталі $\sigma_T, МПа$ | Межа міцності на розтяг $R_m, МПа$ | Залишкове відносне видовження після розриву $A, \%$ |
|----------|---|---|------------------------------------|---|
| 1 |  | 243,75 | 312,50 | 12,73 |
| 2 |  | 243,75 | 321,20 | 14,35 |
| 3 |  | 250,00 | 316,20 | 18,10 |
| 4 |  | 268,70 | 331,20 | 19,40 |

ДОДАТОК В
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЛЬЦЕВОГО ЗАМКУ НА
РОЗТЯГУЮЧІ НАВАНТАЖЕННЯ



НАЦІОНАЛЬНЕ АГЕНТСТВО З АКРЕДИТАЦІЇ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН УКРАЇНИ З АКРЕДИТАЦІЇ

АТЕСТАТ ПРО АКРЕДИТАЦІЮ



Зареєстрований у Реєстрі

19 липня 2022 року*

за № 20174

дійсний до 18 листопада 2023 року

Дата первинної акредитації: 19 листопада 2018 року

НАЦІОНАЛЬНЕ АГЕНТСТВО З АКРЕДИТАЦІЇ УКРАЇНИ ЦИМ ЗАСВІДЧУЄ
КОМПЕТЕНТНІСТЬ

**Випробувального центру Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»**

36011, м. Полтава, проспект Першотравневий, 24

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2 | 0 | 7 | 1 | 1 | 0 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

(Код ЄДРПОУ)

ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT;
ISO/IEC 17025:2017, IDT) У СФЕРІ:

**випробування будівельних матеріалів, виробів та конструкцій
за показниками зовнішнього вигляду, геометричних розмірів,
фізико-технічних характеристик, експлуатаційних властивостей, якості
виготовлення, міцності, зносостійкості, морозостійкості, теплопровідності,
звукоізоляції, повітропроникності, водонепроникності.**

Сфера акредитації визначена додатком до цього атестата від 11 червня 2020 року.
Додаток є невід'ємною частиною цього атестата і складається з 27 аркушів.

* На заміну виданого від 11 червня 2020 року у зв'язку з внесенням змін.
Рішення щодо внесення змін, які стосуються наданої акредитації ООВ від 19 липня 2022 року.

В.о. директора



Сергій ПОПИК

м. Київ, 01133, вул. Генерала Алмазова, 18/7

Зареєстровано у журналі обліку за № 938 А

НААУ є підписантом: 1) Угоди EA MLA у сферах «Випробування», «Калібрування», «Сертифікація продукції», «Сертифікація персоналу», «Сертифікація систем менеджменту», «Інспектування» та «Медичні лабораторії»; 2) Угоди ILAC-MRA у сферах «Випробування», «Калібрування», «Інспектування» та «Медичні лабораторії»; 3) Угоди IAF MLA у сферах «Сертифікація продукції», «Сертифікація персоналу», «Сертифікація систем менеджменту».

Таблиця В1

Вихідні дані показів АД-4 експериментальних зразків

| Зразок 6 | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|--------|------------------|---|--|------------------|---|------------------|---|--|
| Навантаження, кН | Покази АД-4 | | | | | | | | | |
| | Тензорезистор Т1 | Т 1 | Тензорезистор Т2 | Т2 Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ | Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ середнє Т1-Т2 | Тензорезистор Т3 | Т3 Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ | Тензорезистор Т4 | Т4 Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ | Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ середнє Т3-Т4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 0 | 572 | 0 | 555 | 0 | 0 | 554 | 0 | 583 | 0 | 0 |
| 0,4 | 558 | 0 | 554 | -1 | -0,5 | 565 | 11 | 583 | 0 | 5,5 |
| 0,8 | 575 | 17 | 553 | -2 | 7,5 | 568 | 14 | 581 | -2 | 6 |
| 1 | 577 | 19 | 550 | -5 | 7 | 569 | 15 | 579 | -4 | 5,5 |
| 1,2 | 581 | 23 | 550 | -5 | 9 | 574 | 20 | 570 | -13 | 3,5 |
| 1,5 | 596 | 38 | 535 | -20 | 9 | 590 | 36 | 568 | -15 | 10,5 |
| 2 | 619 | 61 | 518 | -37 | 12 | 610 | 56 | 554 | -29 | 13,5 |
| 2,5 | 639 | 81 | 507 | -48 | 16,5 | 628 | 74 | 539 | -44 | 15 |
| 3 | 637 | 79 | 518 | -37 | 21 | 655 | 101 | 522 | -61 | 20 |
| 3,5 | 631 | 73 | 521 | -34 | 19,5 | 671 | 117 | 509 | -74 | 21,5 |
| 4 | 627 | 69 | 530 | -25 | 22 | 693 | 139 | 495 | -88 | 25,5 |
| 4,5 | 623 | 65 | 536 | -19 | 23 | 693 | 139 | 499 | -84 | 27,5 |
| 5 | 622 | 64 | 545 | -10 | 27 | 688 | 134 | 508 | -75 | 29,5 |
| 5,5 | 618 | 60 | 550 | -5 | 27,5 | 679 | 125 | 520 | -63 | 31 |
| 6 | 617 | 59 | 559 | 4 | 31,5 | 670 | 116 | 530 | -53 | 31,5 |
| 6,5 | 613 | 55 | 564 | 9 | 32 | 661 | 107 | 536 | -47 | 30 |
| 7 | 613 | 55 | 568 | 13 | 34 | 656 | 102 | 550 | -33 | 34,5 |
| 8 | 613 | 55 | 571 | 16 | 35,5 | 651 | 97 | 555 | -28 | 34,5 |
| 9 | 610 | 52 | 577 | 22 | 37 | 642 | 88 | 568 | -15 | 36,5 |
| 10 | 610 | 52 | 581 | 26 | 39 | 641 | 87 | 573 | -10 | 38,5 |
| 20 | 610 | 52 | 582 | 27 | 39,5 | 637 | 83 | 579 | -4 | 39,5 |

Продовження таблиці В1

| Зразок 7 | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|--------|------------------|--|---|------------------|--|------------------|--|---|
| Навантаження, кН | Покази АД-4 | | | | | | | | | |
| | Тензорезистор Т1 | Т 1 | Тензорезистор Т2 | Т2 Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ | Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ середнє Т1-Т2 | Тензорезистор Т3 | Т3 Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ | Тензорезистор Т4 | Т4 Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ | Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ середнє Т3-Т4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 0 | 572 | 0 | 555 | 0 | 0 | 554 | 0 | 583 | 0 | 0 |
| 1 | 558 | 0 | 554 | -1 | -0,5 | 565 | 11 | 583 | 0 | 5,5 |
| 1,5 | 575 | 17 | 553 | -2 | 7,5 | 568 | 14 | 581 | -2 | 6 |
| 2,0 | 577 | 19 | 550 | -5 | 7 | 569 | 15 | 579 | -4 | 5,5 |
| 2,5 | 581 | 23 | 550 | -5 | 9 | 574 | 20 | 570 | -13 | 3,5 |
| 3,0 | 596 | 38 | 535 | -20 | 9 | 590 | 36 | 568 | -15 | 10,5 |
| 3,5 | 619 | 61 | 518 | -37 | 12 | 610 | 56 | 554 | -29 | 13,5 |
| 4,0 | 639 | 81 | 507 | -48 | 16,5 | 628 | 74 | 539 | -44 | 15 |
| 4,5 | 637 | 79 | 518 | -37 | 21 | 655 | 101 | 522 | -61 | 20 |
| 5,0 | 631 | 73 | 521 | -34 | 19,5 | 671 | 117 | 509 | -74 | 21,5 |
| 6,0 | 627 | 69 | 530 | -25 | 22 | 693 | 139 | 495 | -88 | 25,5 |
| 7,0 | 623 | 65 | 536 | -19 | 23 | 693 | 139 | 499 | -84 | 27,5 |
| 8,0 | 622 | 64 | 545 | -10 | 27 | 688 | 134 | 508 | -75 | 29,5 |
| 9,0 | 618 | 60 | 550 | -5 | 27,5 | 679 | 125 | 520 | -63 | 31 |
| 10,0 | 617 | 59 | 559 | 4 | 31,5 | 670 | 116 | 530 | -53 | 31,5 |
| 11,0 | 613 | 55 | 564 | 9 | 32 | 661 | 107 | 536 | -47 | 30 |
| 12,0 | 613 | 55 | 568 | 13 | 34 | 656 | 102 | 550 | -33 | 34,5 |
| 13,0 | 613 | 55 | 571 | 16 | 35,5 | 651 | 97 | 555 | -28 | 34,5 |
| 14,0 | 610 | 52 | 577 | 22 | 37 | 642 | 88 | 568 | -15 | 36,5 |
| 15,0 | 610 | 52 | 581 | 26 | 39 | 641 | 87 | 573 | -10 | 38,5 |
| 16,0 | 610 | 52 | 582 | 27 | 39,5 | 637 | 83 | 579 | -4 | 39,5 |
| 17,0 | 610 | 52 | 591 | 36 | 44 | 636 | 82 | 586 | 3 | 42,5 |
| 18,0 | 609 | 51 | 591 | 36 | 43,5 | 632 | 78 | 591 | 8 | 43 |
| 19,0 | 605 | 47 | 591 | 36 | 41,5 | 628 | 74 | 595 | 12 | 43 |
| 20,0 | 605 | 47 | 591 | 36 | 41,5 | 627 | 73 | 600 | 17 | 45 |

Продовження таблиці В1

| Зразок 8 | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|--------|------------------|--|---|------------------|--|------------------|--|---|
| Навантаження, кН | Покази АД-4 | | | | | | | | | |
| | Тензорезистор Т1 | Т 1 | Тензорезистор Т2 | Т2 Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ | Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ середнє Т1-Т2 | Тензорезистор Т3 | Т3 Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ | Тензорезистор Т4 | Т4 Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ | Δ Відносна деформація Δ·10 ⁻⁵ середнє Т3-Т4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 0 | 516 | 0 | 640 | 0 | 0 | 563 | 0 | 578 | 0 | 0 |
| 1 | 516 | 0 | 640 | 0 | 0 | 563 | 0 | 578 | 0 | 0 |
| 1,5 | 516 | 0 | 632 | -8 | -4 | 568 | 5 | 573 | -5 | 0 |
| 2,0 | 522 | 6 | 628 | -12 | -3 | 573 | 10 | 573 | -5 | 2,5 |
| 2,5 | 535 | 19 | 625 | -15 | 2 | 582 | 19 | 568 | -10 | 4,5 |
| 3,0 | 553 | 37 | 610 | -30 | 3,5 | 600 | 37 | 555 | -23 | 7 |
| 3,5 | 586 | 70 | 588 | -52 | 9 | 623 | 60 | 536 | -42 | 9 |
| 4,0 | 605 | 89 | 578 | -62 | 13,5 | 641 | 78 | 526 | -52 | 13 |
| 4,5 | 605 | 89 | 583 | -57 | 16 | 660 | 97 | 517 | -61 | 18 |
| 5,0 | 597 | 81 | 592 | -48 | 16,5 | 679 | 116 | 504 | -74 | 21 |
| 6,0 | 590 | 74 | 605 | -35 | 19,5 | 702 | 139 | 481 | -97 | 21 |
| 7,0 | 590 | 74 | 606 | -34 | 20 | 712 | 149 | 476 | -102 | 23,5 |
| 8,0 | 586 | 70 | 619 | -21 | 24,5 | 710 | 147 | 485 | -93 | 27 |
| 9,0 | 582 | 66 | 624 | -16 | 25 | 698 | 135 | 495 | -83 | 26 |
| 10,0 | 581 | 65 | 628 | -12 | 26,5 | 689 | 126 | 506 | -72 | 27 |
| 11,0 | 581 | 65 | 628 | -12 | 26,5 | 684 | 121 | 513 | -65 | 28 |
| 12,0 | 576 | 60 | 632 | -8 | 26 | 675 | 112 | 523 | -55 | 28,5 |
| 13,0 | 576 | 60 | 642 | 2 | 31 | 671 | 108 | 531 | -47 | 30,5 |
| 14,0 | 574 | 58 | 643 | 3 | 30,5 | 666 | 103 | 536 | -42 | 30,5 |
| 15,0 | 573 | 57 | 650 | 10 | 33,5 | 665 | 102 | 545 | -33 | 34,5 |
| 16,0 | 573 | 57 | 651 | 11 | 34 | 661 | 98 | 551 | -27 | 35,5 |
| 17,0 | 573 | 57 | 656 | 16 | 36,5 | 655 | 92 | 559 | -19 | 36,5 |
| 18,0 | 573 | 57 | 657 | 17 | 37 | 655 | 92 | 564 | -14 | 39 |
| 19,0 | 573 | 57 | 661 | 21 | 39 | 647 | 84 | 568 | -10 | 37 |
| 20,0 | 569 | 53 | 666 | 26 | 39,5 | 646 | 83 | 574 | -4 | 39,5 |

Продовження таблиці В1

| Зразок 9 | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|--------|------------------|---|--|------------------|---|------------------|---|--|
| Навантаження, кН | Покази АВД-4 | | | | | | | | | |
| | Тензорезистор Т1 | Т 1 | Тензорезистор Т2 | Т2 Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ | Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ середнє Т1-Т2 | Тензорезистор Т3 | Т3 Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ | Тензорезистор Т4 | Т4 Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ | Δ Відносна деформація $\Delta \cdot 10^{-5}$ середнє Т3-Т4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 0 | 516 | 0 | 640 | 0 | 0 | 563 | 0 | 578 | 0 | 0 |
| 1 | 516 | 0 | 640 | 0 | 0 | 563 | 0 | 578 | 0 | 0 |
| 1,5 | 516 | 0 | 632 | -8 | -4 | 568 | 5 | 573 | -5 | 0 |
| 2,0 | 522 | 6 | 628 | -12 | -3 | 573 | 10 | 573 | -5 | 2,5 |
| 2,5 | 535 | 19 | 625 | -15 | 2 | 582 | 19 | 568 | -10 | 4,5 |
| 3,0 | 553 | 37 | 610 | -30 | 3,5 | 600 | 37 | 555 | -23 | 7 |
| 3,5 | 586 | 70 | 588 | -52 | 9 | 623 | 60 | 536 | -42 | 9 |
| 4,0 | 605 | 89 | 578 | -62 | 13,5 | 641 | 78 | 526 | -52 | 13 |
| 4,5 | 605 | 89 | 583 | -57 | 16 | 660 | 97 | 517 | -61 | 18 |
| 5,0 | 597 | 81 | 592 | -48 | 16,5 | 679 | 116 | 504 | -74 | 21 |
| 6,0 | 590 | 74 | 605 | -35 | 19,5 | 702 | 139 | 481 | -97 | 21 |
| 7,0 | 590 | 74 | 606 | -34 | 20 | 712 | 149 | 476 | -102 | 23,5 |
| 8,0 | 586 | 70 | 619 | -21 | 24,5 | 710 | 147 | 485 | -93 | 27 |
| 9,0 | 582 | 66 | 624 | -16 | 25 | 698 | 135 | 495 | -83 | 26 |
| 10,0 | 581 | 65 | 628 | -12 | 26,5 | 689 | 126 | 506 | -72 | 27 |
| 11,0 | 581 | 65 | 628 | -12 | 26,5 | 684 | 121 | 513 | -65 | 28 |
| 12,0 | 576 | 60 | 632 | -8 | 26 | 675 | 112 | 523 | -55 | 28,5 |
| 13,0 | 576 | 60 | 642 | 2 | 31 | 671 | 108 | 531 | -47 | 30,5 |
| 14,0 | 574 | 58 | 643 | 3 | 30,5 | 666 | 103 | 536 | -42 | 30,5 |
| 15,0 | 573 | 57 | 650 | 10 | 33,5 | 665 | 102 | 545 | -33 | 34,5 |
| 16,0 | 573 | 57 | 651 | 11 | 34 | 661 | 98 | 551 | -27 | 35,5 |
| 17,0 | 573 | 57 | 656 | 16 | 36,5 | 655 | 92 | 559 | -19 | 36,5 |
| 18,0 | 573 | 57 | 657 | 17 | 37 | 655 | 92 | 564 | -14 | 39 |
| 19,0 | 573 | 57 | 661 | 21 | 39 | 647 | 84 | 568 | -10 | 37 |
| 20,0 | 569 | 53 | 666 | 26 | 39,5 | 646 | 83 | 574 | -4 | 39,5 |

Продовження додатку В

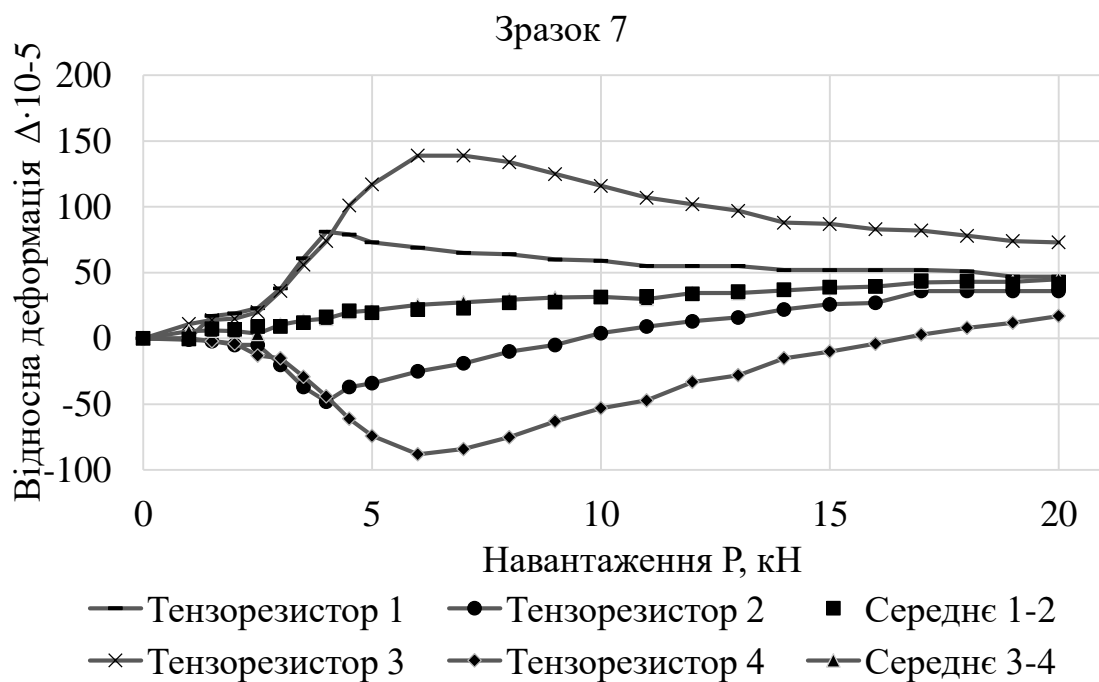
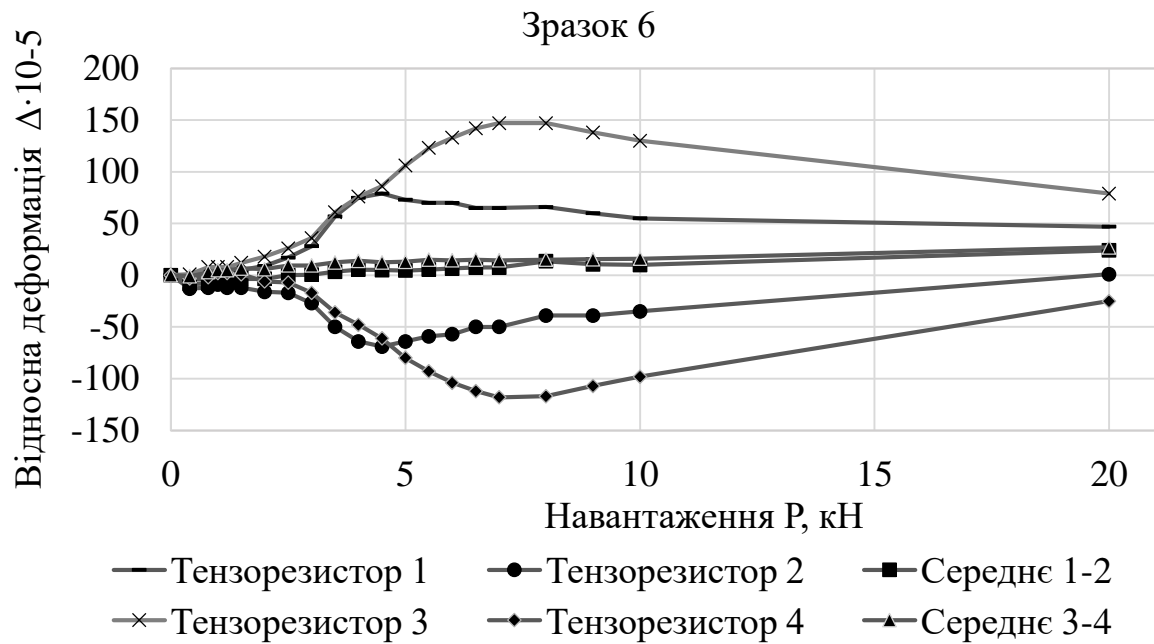


Рис. В.1. Графіки залежності відносної деформації зразків від навантаження

Продовження додатку В

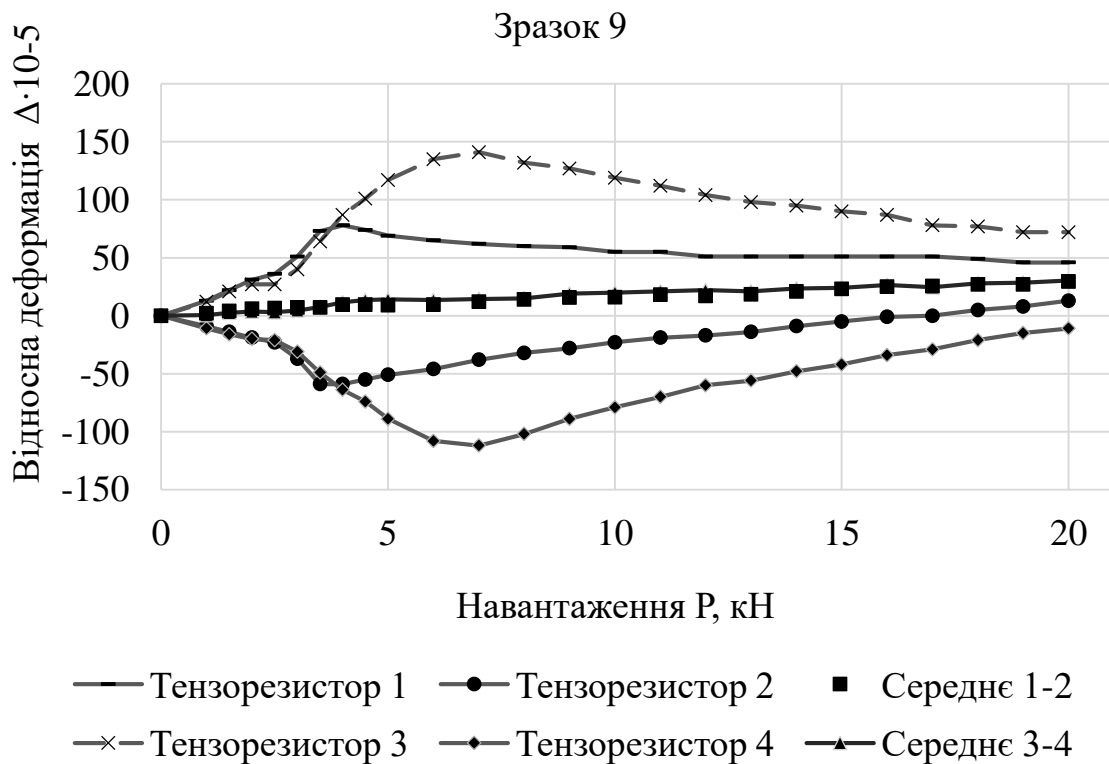
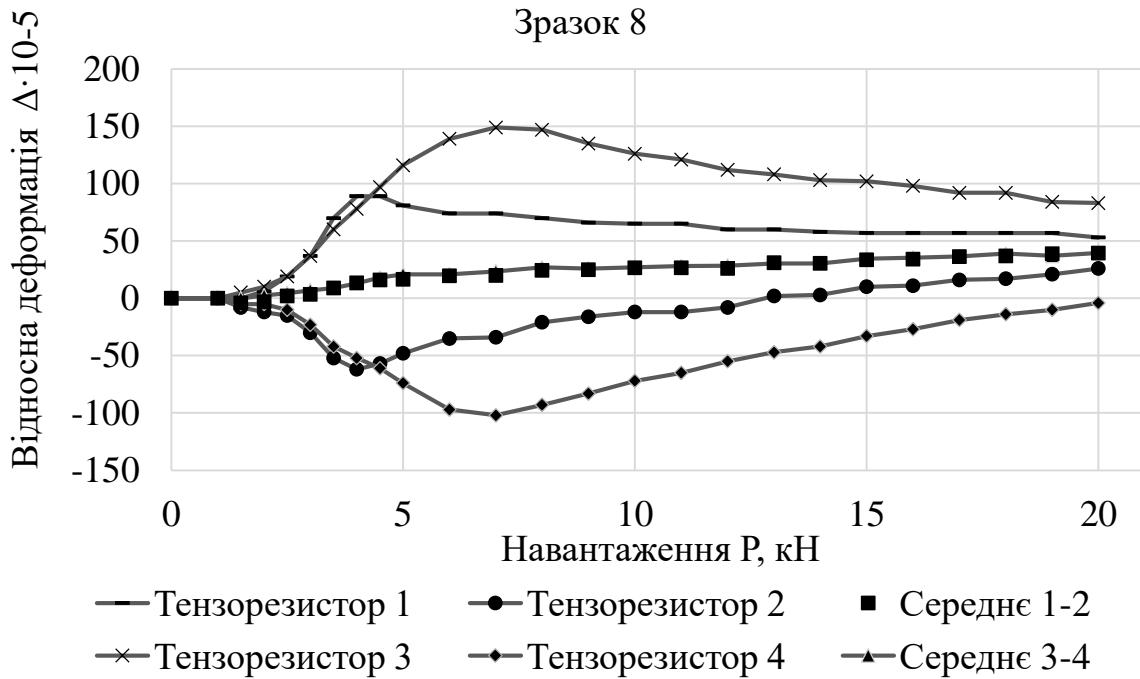


Рис. В.1.(продовження). Графіки залежності відносної деформації зразків від навантаження

Таблиця В2

Експериментальні значення величини деформації розкриття фальцевого замку
на етапах навантаження

| Нав-ня, кН | Деформація розкриття, мм | | | |
|---------------|--------------------------|----------|----------|----------|
| | Зразок 6 | Зразок 7 | Зразок 8 | Зразок 9 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,5 | 0,41 | 0,48 | 0,5 | 0,49 |
| 2,0 | 0,98 | 1,04 | 1,12 | 1,07 |
| 1,5 | 0,61 | 0,67 | 0,7 | 0,67 |
| 2,5 | 1,78 | 1,72 | 2,21 | 2,02 |
| 1,5 | 1,1 | 1,04 | 1,44 | 1,26 |
| 3,0 | 3,31 | 3,36 | 3,65 | 3,41 |
| 1,5 | 2,19 | 2,18 | 2,6 | 2,24 |
| 3,5 | 6,77 | 6,59 | 6,65 | 6,6 |
| 1,5 | 5,35 | 5,18 | 5,25 | 5,18 |
| 4,0 | 11,73 | 11,44 | 11,24 | 11,71 |
| 1,5 | 10,43 | 10,14 | 9,9 | 10,38 |
| 4,5 | 22,58 | 22,46 | 22 | 22,74 |
| 1,5 | 21,6 | 21,44 | 21 | 21,72 |
| 5,0 | 32,11 | 33 | 29 | |
| 1,5 | 30,11 | 31 | 26 | |
| 5,5 | 37,11 | | | |
| 6,0 | 40,11 | | | |
| 6,5 | 43,11 | | | |

Продовження додатку В



Рис. В.2. Графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замку за цикл

Продовження додатку В

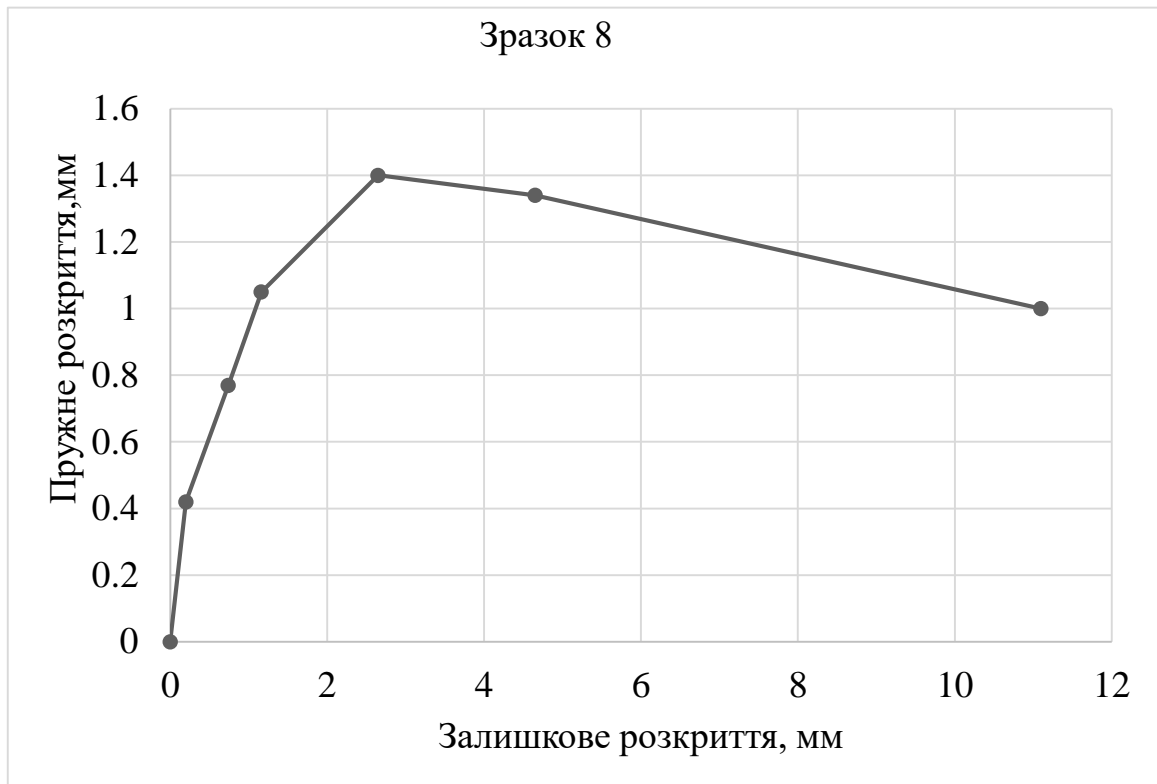


Рис. В.2. (продовження). Графік залежності між пружною та залишковою деформаціями розкриття фальцевого замку за цикл

Продовження додатку В

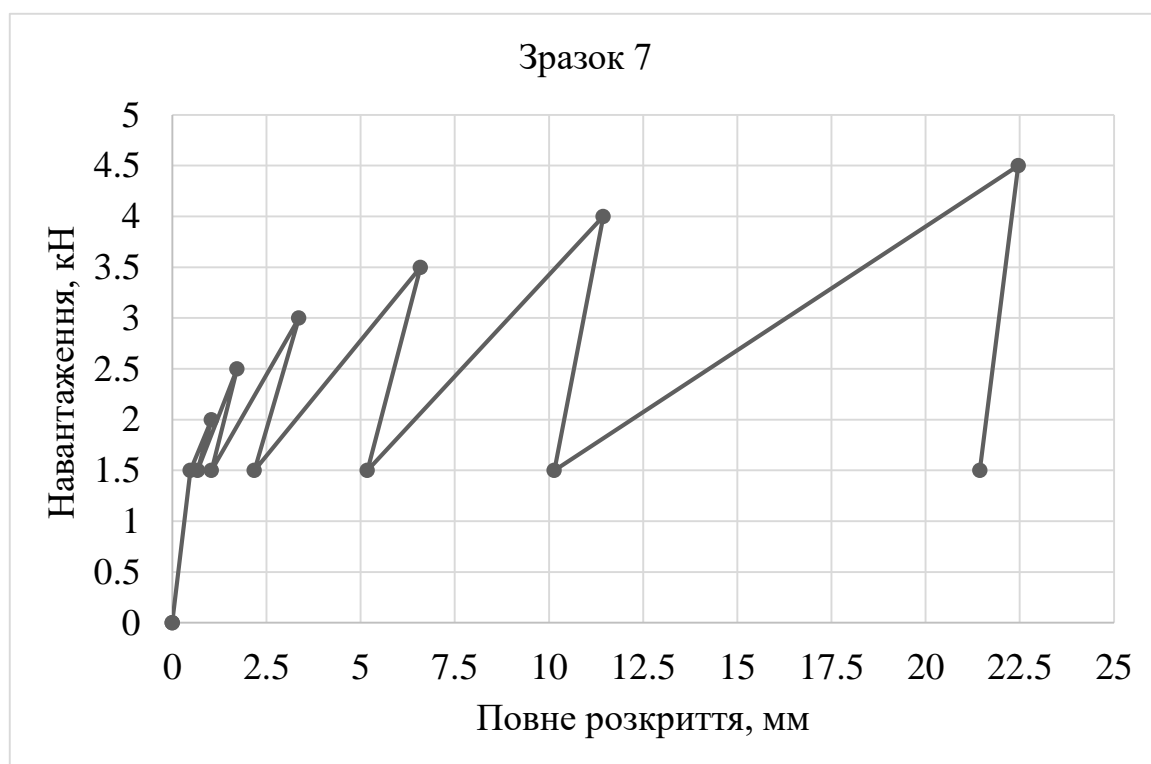
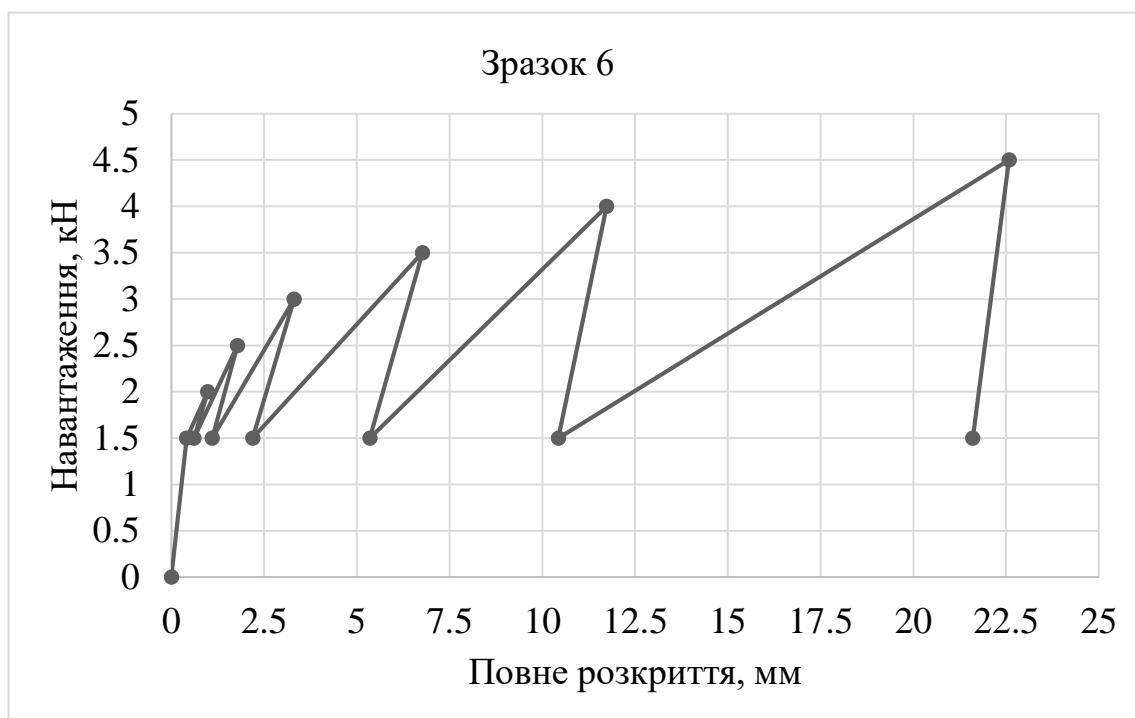


Рис. В.3. Графік залежності повної деформації розкриття фальцевого замка від циклічного навантаження

Продовження додатку В

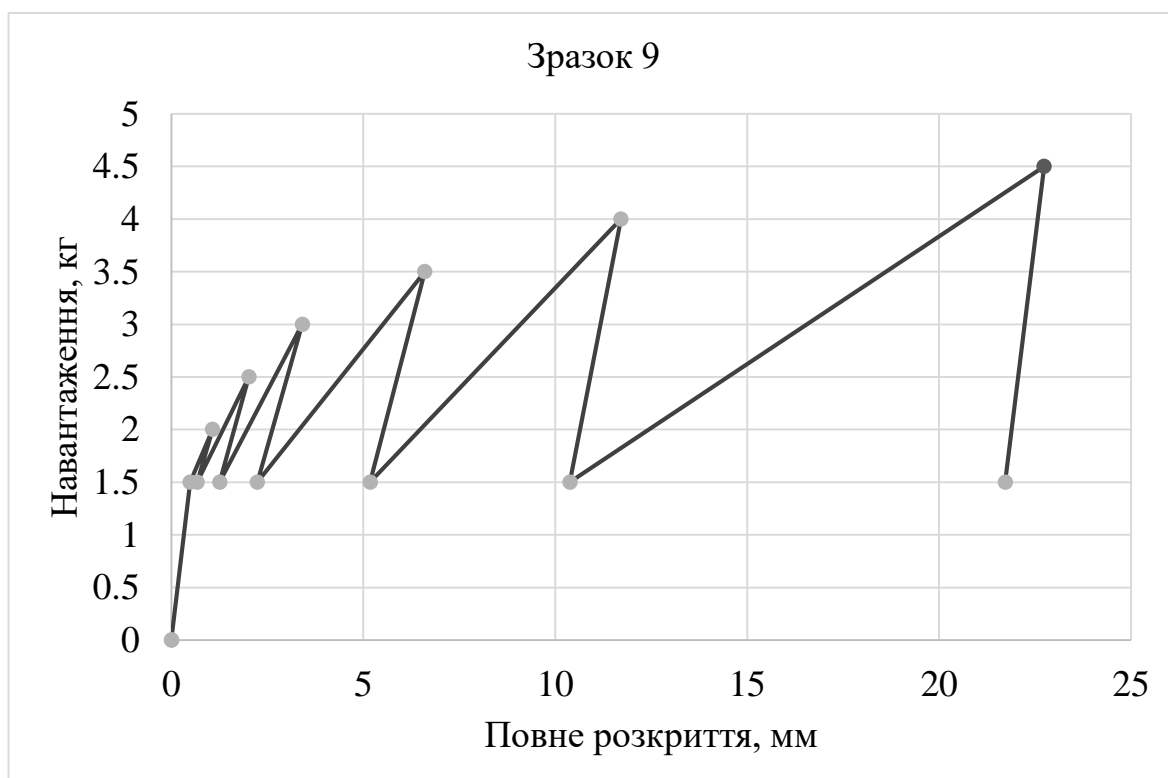
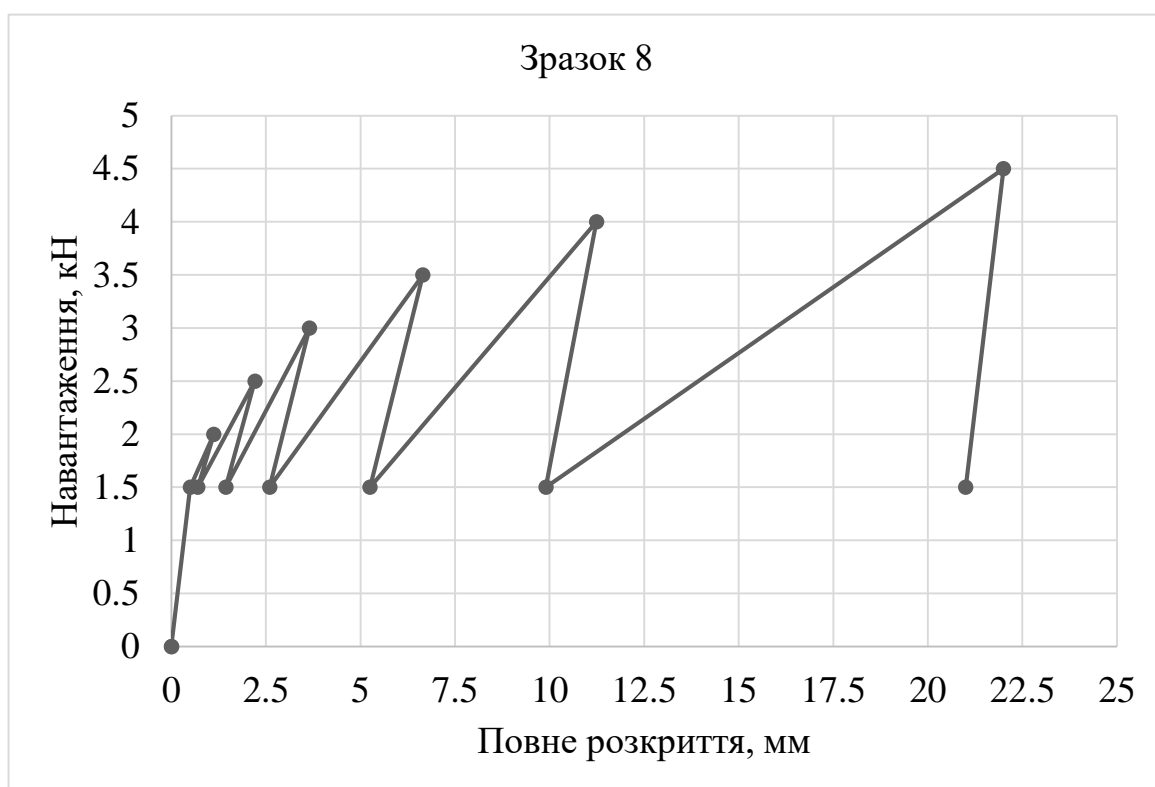




















Рис. В.3. (продовження). Графік залежності повної деформації розкриття фальцевого замка від циклічного навантаження

Таблиця ВЗ










Етапи руйнування фальцевого замка в залежності від розтягуючого навантаження

| | | | |
|--------------------|---|--|---|
| Нав-ня, кН | 0 | 1 | 2,5 |
| Характер розкриття |  |  |  |
| Нав-ня, кН | 3 | 3,5 | 4 |
| Характер розкриття |  |  |  |
| Нав-ня, кН | 4,5 | 5 | 6 |
| Характер розкриття |  |  |  |

Продовження таблиці В3

| | | | |
|-----------------------|---|--|---|
| Нав-ня, кН | 7 | 8 | 9 |
| Характер розкриття |  |  |  |
| Нав-ня, кН | 10 | 11 | 12 |
| Характер розкриття |  |  |  |
| Нав-ня, кН | 13 | 14 | 15 |
| Характер розкриття |  |  |  |

Продовження таблиці В3

| | | | |
|-----------------------|---|--|---|
| Нав-ня, кН | 16 | 17 | 18 |
| Характер розкриття |  |  |  |
| Нав-ня, кН | 19 | 20 | 18 |
| Характер розкриття |  |  |  |
| Нав-ня, кН | 15 | 14 | 10 |
| Характер розкриття |  |  |  |

ДОДАТОК Г
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖФАЛЬЦЕВОЇ ЗОНИ
ОБОЛОНКИ СИЛОСУ НА ЗГІН

Таблиця Г1

Експериментальні дані прогину міжфальцевої зони

| Нав-ня, кН | Прогин, мм | Нав-ня, кН | Прогин, мм | | | | |
|---------------|------------|---------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| | Зразок 2 | | Зразок 3 | Зразок 4 | Зразок 5 | Зразок 6 | Зразок 7 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 11,5 | 0,25 | 1,46 | 2,31 | 2,8 | 2,21 | 3,11 |
| 1,4 | 15,7 | 0,5 | 3,16 | 4,03 | 4,59 | 3,81 | 4,6 |
| 2,2 | 21,8 | 0,75 | 5,39 | 5,7 | 6,31 | 5,17 | 6,12 |
| 2,8 | 31,5 | 1 | 7,37 | 8,51 | 8,4 | 6,96 | 7,97 |
| 3,6 | 52 | 1,25 | 10,33 | 9,57 | 10,4 | 8,72 | 12,51 |
| 4 | 67 | 1,5 | 12,69 | 11,44 | 12,44 | 10,4 | 14,31 |
| 4,8 | 94,8 | 1,75 | 15,53 | 13,54 | 14,28 | 12 | 15,95 |
| 5,2 | 104,9 | 2 | 17,76 | 15,67 | 16,42 | 13,95 | 17,8 |
| | | 2,25 | 22,28 | 18,72 | 18,69 | 16,05 | 21,13 |
| | | 2,5 | 24,58 | 24,34 | 21,92 | 19,07 | 22,62 |
| | | 2,75 | 31,72 | 30,79 | 28,91 | 25,09 | 27,39 |
| | | 3 | 38,96 | 35,61 | 33,7 | 29,76 | 32,63 |
| | | 3,25 | 45,42 | 40,42 | 38,29 | 33,24 | 37,55 |
| | | 3,5 | 53,09 | 45,72 | 43,16 | 46,85 | 42,55 |
| | | 3,75 | 60,67 | 50,77 | 48,86 | 59,07 | 46,29 |
| | | 4 | 66,19 | 55,61 | 54,04 | 62,91 | 49,58 |
| | | 4,5 | - | 62,23 | 61,58 | 65,06 | 64,77 |

Таблиця Г2

Експериментальні дані розкриття фальцевого замку

| Нав-ня, кН | Зразок 3 | | | | Зразок 4 | | | | Зразок 5 | | | |
|---------------|--------------------------------|------|------|------|--------------------------------|------|------|------|--------------------------------|------|------|------|
| | Розкриття фальцевого замку, мм | | | | Розкриття фальцевого замку, мм | | | | Розкриття фальцевого замку, мм | | | |
| | I-1 | I-2 | I-3 | I-4 | I-1 | I-2 | I-3 | I-4 | I-1 | I-2 | I-3 | I-4 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 0,06 | 0,04 | 0,13 | 0,11 | 0,04 | 0,06 | 0,13 | 0,11 | 0,05 | 0,05 | 0,18 | 0,19 |
| 0,5 | 0,13 | 0,08 | 0,23 | 0,21 | 0,06 | 0,1 | 0,23 | 0,21 | 0,11 | 0,1 | 0,3 | 0,32 |
| 0,75 | 0,24 | 0,14 | 0,38 | 0,36 | 0,08 | 0,17 | 0,35 | 0,31 | 0,15 | 0,15 | 0,43 | 0,46 |
| 1 | 0,30 | 0,17 | 0,55 | 0,51 | 0,13 | 0,24 | 0,5 | 0,44 | 0,22 | 0,24 | 0,59 | 0,64 |
| 1,25 | 0,40 | 0,22 | 0,76 | 0,71 | 0,26 | 0,34 | 0,65 | 0,58 | 0,31 | 0,34 | 0,74 | 0,8 |
| 1,5 | 0,45 | 0,28 | 0,96 | 0,87 | 0,43 | 0,45 | 0,8 | 0,72 | 0,43 | 0,47 | 0,97 | 1,02 |
| 1,75 | 0,55 | 0,37 | 1,17 | 1,03 | 0,58 | 0,59 | 1 | 0,89 | 0,62 | 0,6 | 1,17 | 1,23 |
| 2 | 0,68 | 0,46 | 1,35 | 1,17 | 0,71 | 0,73 | 1,21 | 1,09 | 0,79 | 0,75 | 1,4 | 1,47 |
| 2,25 | 0,84 | 1,14 | 1,55 | 1,87 | 0,95 | 1,01 | 1,57 | 1,41 | 1,00 | 0,93 | 1,7 | 1,75 |
| 2,5 | 1,10 | 2,37 | 1,93 | 2,35 | 1,57 | 1,63 | 2,04 | 2,34 | 1,31 | 1,3 | 2,14 | 2,18 |
| 2,75 | 1,84 | 3,77 | 2,8 | 3,31 | 2,50 | 2,6 | 2,2 | 2,36 | 2,66 | 2,21 | 3,08 | 3,27 |
| 3 | 2,59 | 4,53 | 3,74 | 3,82 | 3,29 | 3,34 | 3,15 | 4,26 | 3,25 | 3 | 3,92 | 4,22 |

Продовження таблиці Г2

| Нав-ня, кН | Зразок 6 | | | | Зразок 7 | | | |
|---------------|--------------------------------|------|-----|------|--------------------------------|------|------|------|
| | Розкриття фальцевого замку, мм | | | | Розкриття фальцевого замку, мм | | | |
| | I-1 | I-2 | I-3 | I-4 | I-1 | I-2 | I-3 | I-4 |
| 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0,00 | 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 0,09 | 0,04 | - | 0,08 | 0,08 | 0,05 | 0,09 | 0,11 |
| 0,5 | 0,13 | 0,1 | - | 0,17 | 0,13 | 0,11 | 0,11 | 0,21 |
| 0,75 | 0,21 | 0,16 | - | 0,21 | 0,20 | 0,17 | 0,22 | 0,31 |
| 1 | 0,27 | 0,25 | - | 0,37 | 0,30 | 0,25 | 0,43 | 0,45 |
| 1,25 | 0,37 | 0,37 | - | 0,68 | 0,38 | 0,34 | 0,59 | 0,59 |
| 1,5 | 0,47 | 0,49 | - | 0,8 | 0,49 | 0,45 | 0,73 | 0,77 |
| 1,75 | 0,60 | 0,61 | - | 1,15 | 0,60 | 0,54 | 0,9 | 0,93 |
| 2 | 0,71 | 0,76 | - | 1,35 | 0,73 | 0,67 | 1,08 | 1,19 |
| 2,25 | 0,89 | 0,92 | - | 1,59 | 0,93 | 0,85 | 1,33 | 1,41 |
| 2,5 | 1,15 | 1,21 | - | 1,91 | 1,30 | 1,2 | 1,72 | 1,84 |
| 2,75 | 1,95 | 2,08 | - | 2,79 | 2,26 | 2,06 | 2,67 | 2,79 |
| 3 | 2,78 | 2,96 | - | 3,73 | 3,12 | 2,89 | 3,56 | 3,73 |

Продовження додатку Г

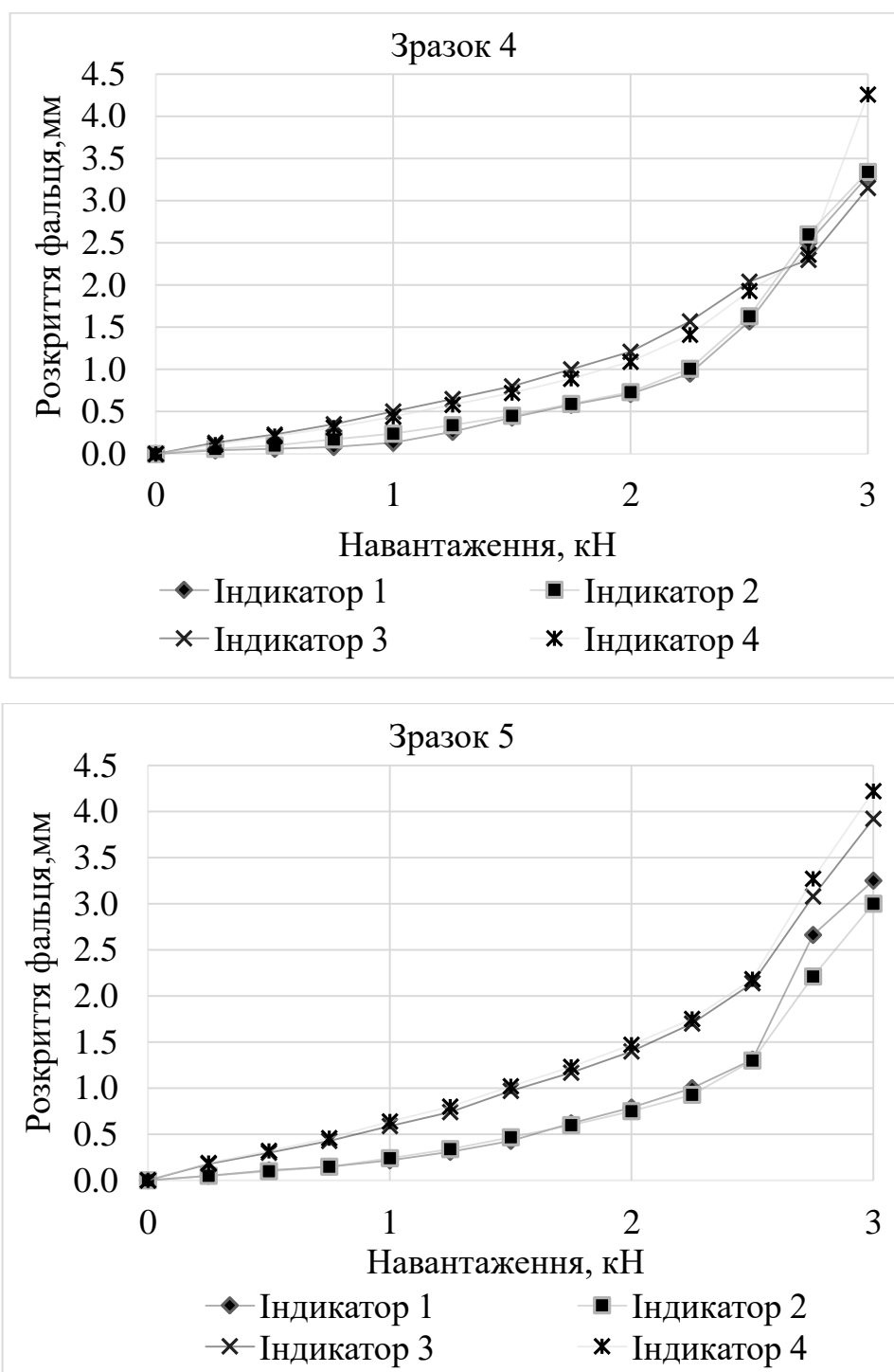


Рис. Г.1. Графіки розкриття фальцевих замків від навантаження

Продовження додатку Г

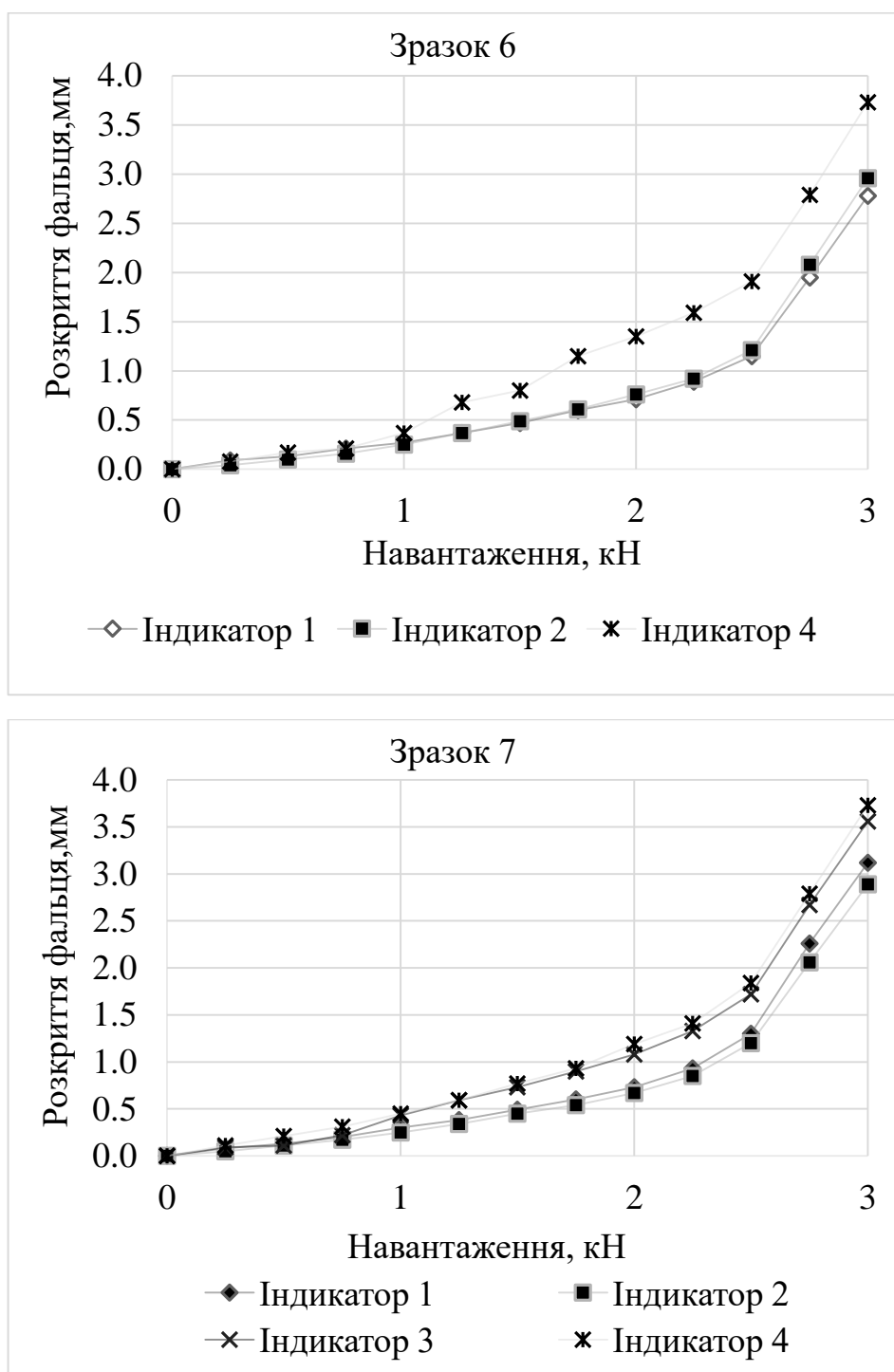


Рис. Г.1.(продовження). Графіки розкриття фальцевих замків від навантаження

Продовження додатку Г

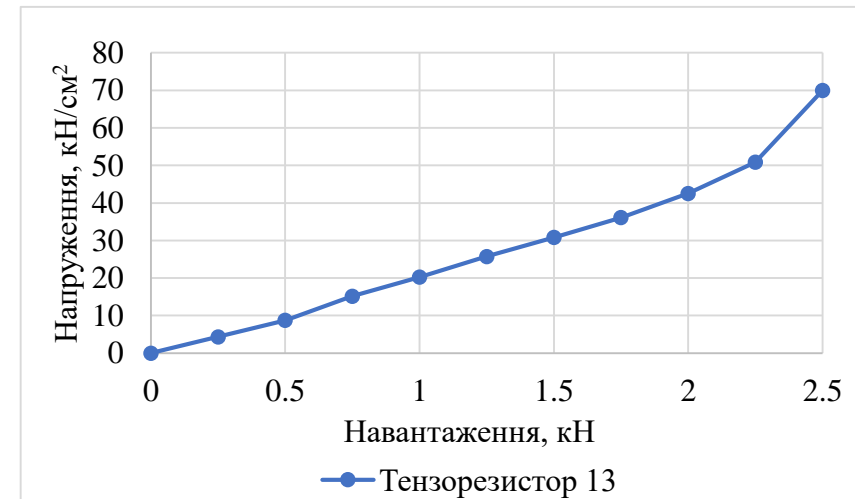
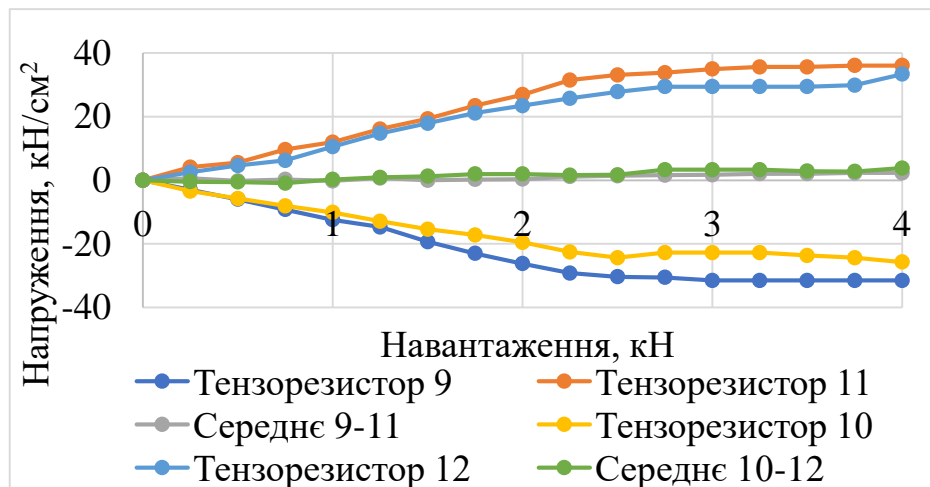
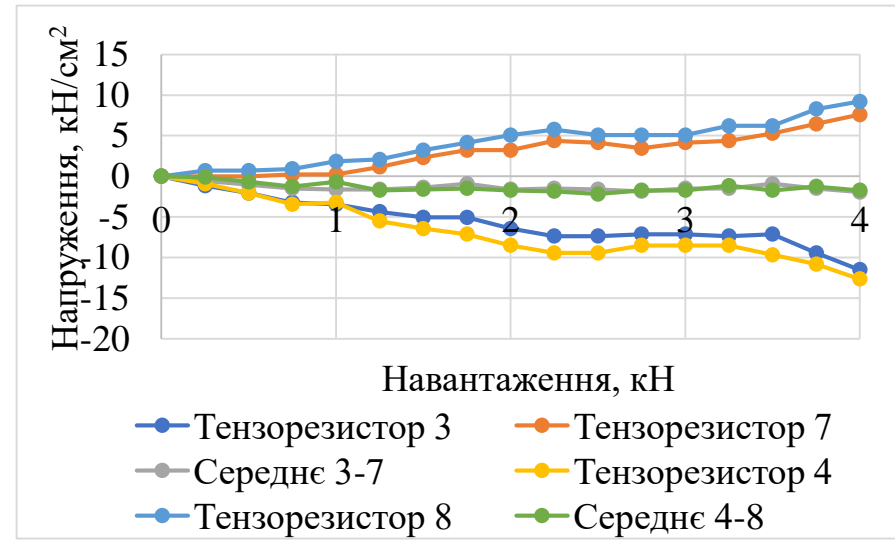
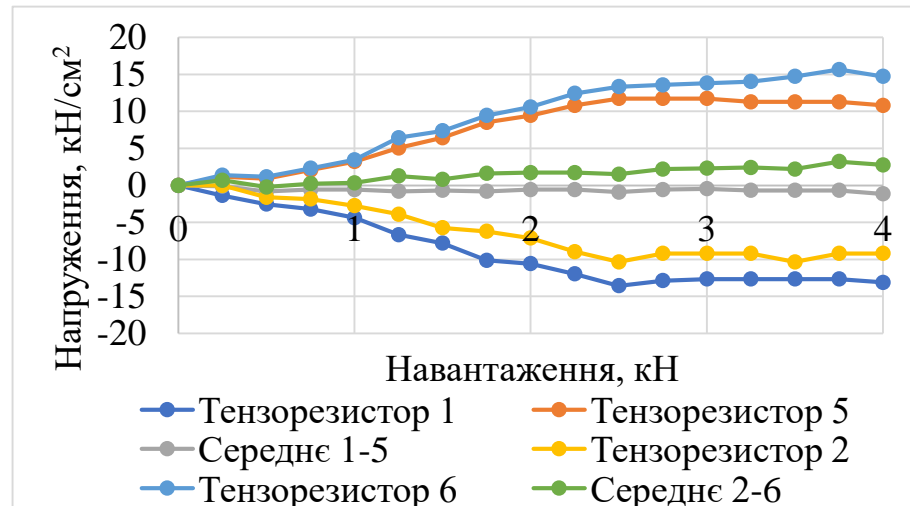


Рис. Г.2. Графіки залежності напруження від навантаження, дані з тензорезисторів зразка 3

Продовження додатку Г

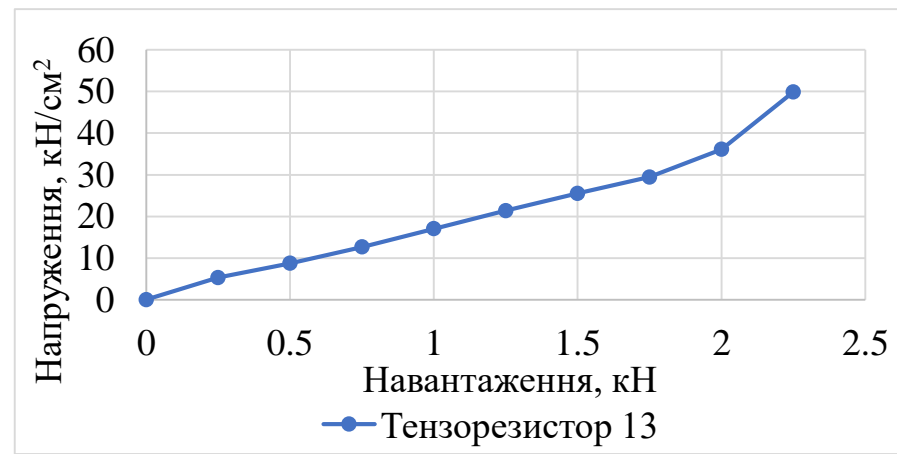
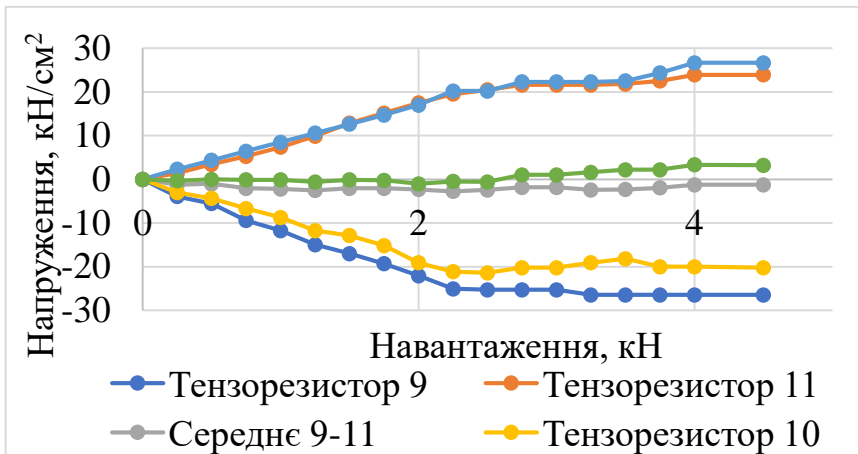
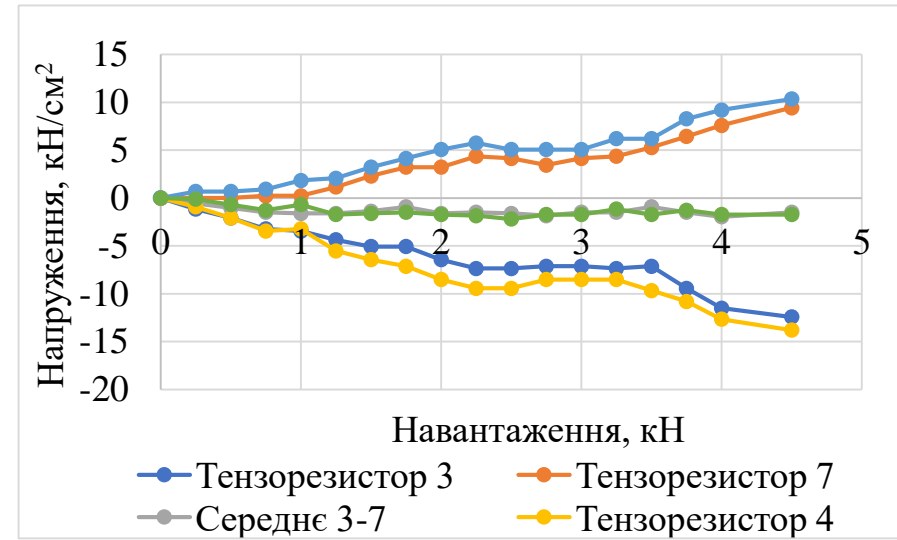
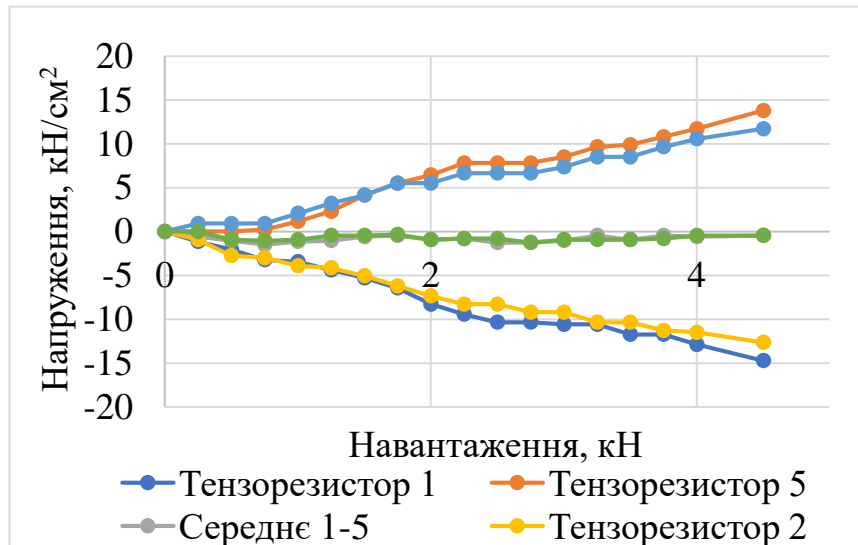


Рис. Г.3. Графіки залежності напруження від навантаження, дані з тензорезисторів зразка 4

Продовження додатку Г

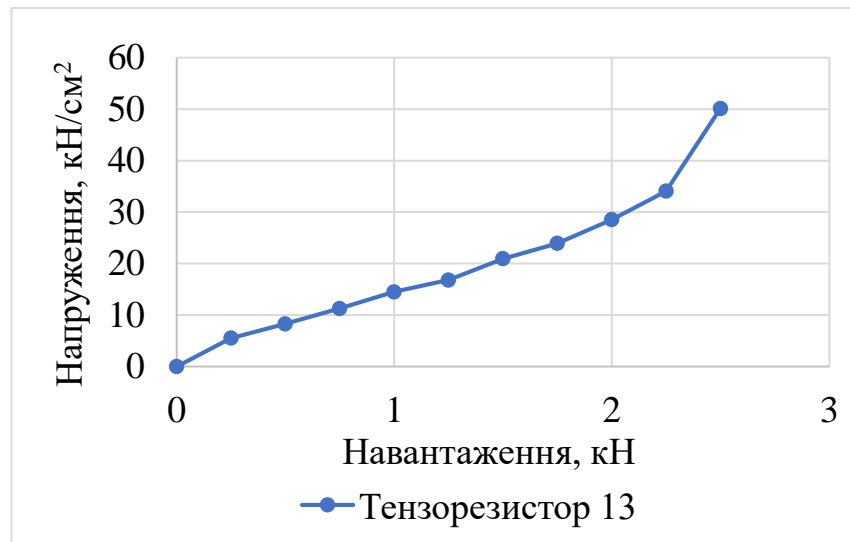
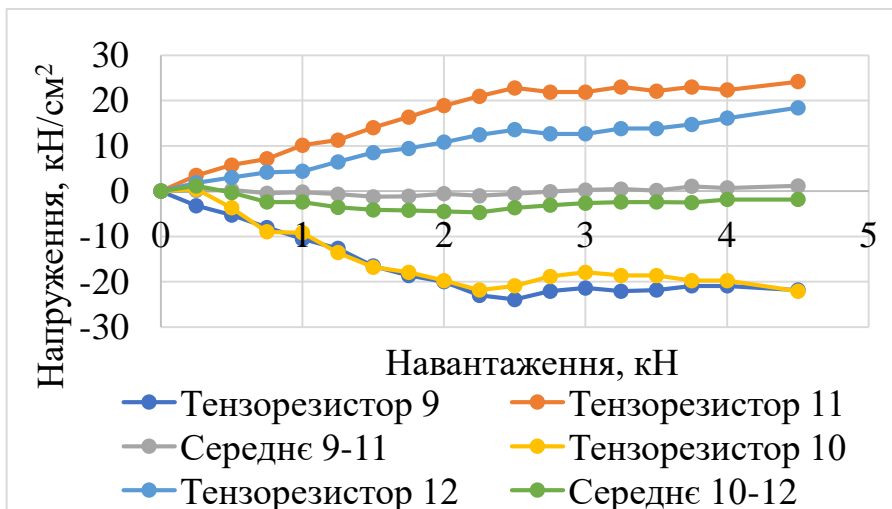
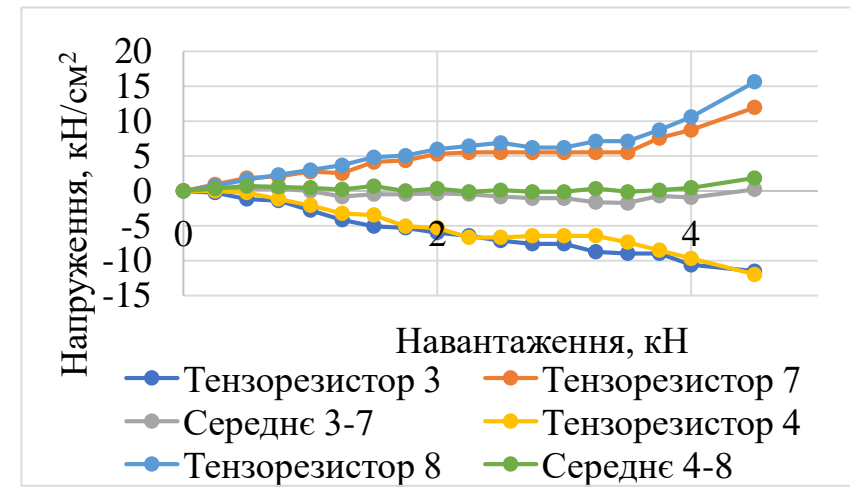
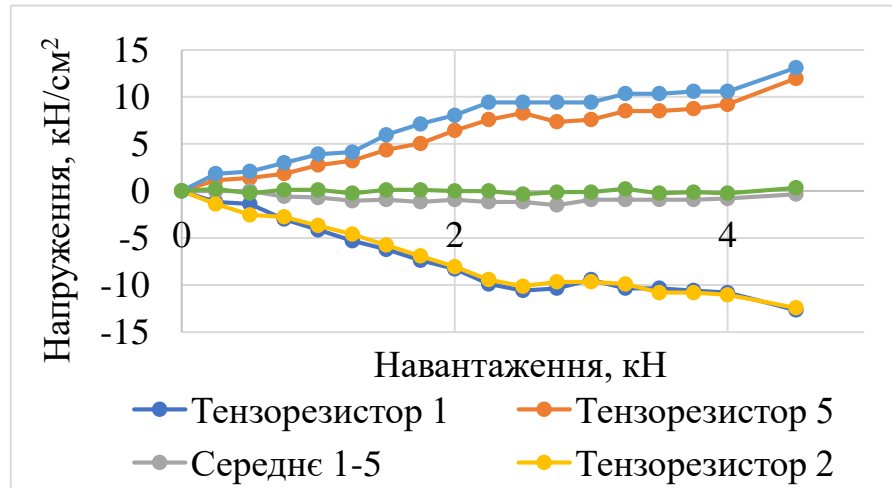


Рис. Г.4. Графіки залежності напруження від навантаження, дані з тензорезисторів зразка 5

Продовження додатку Г

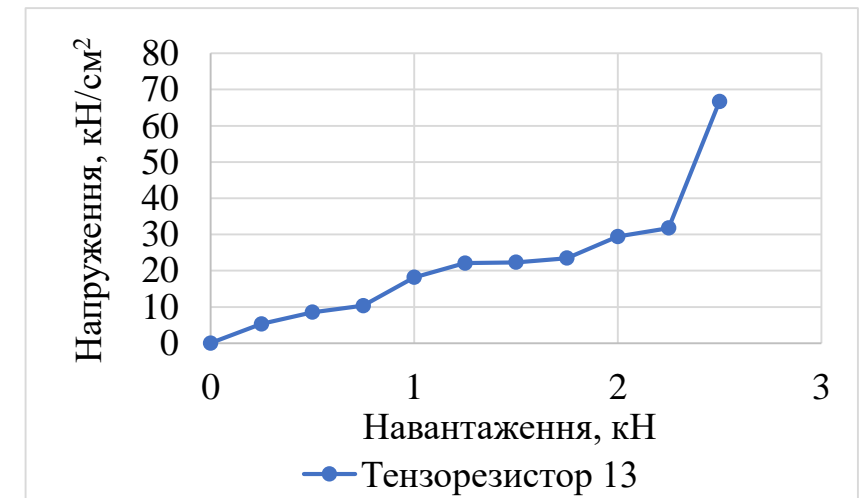
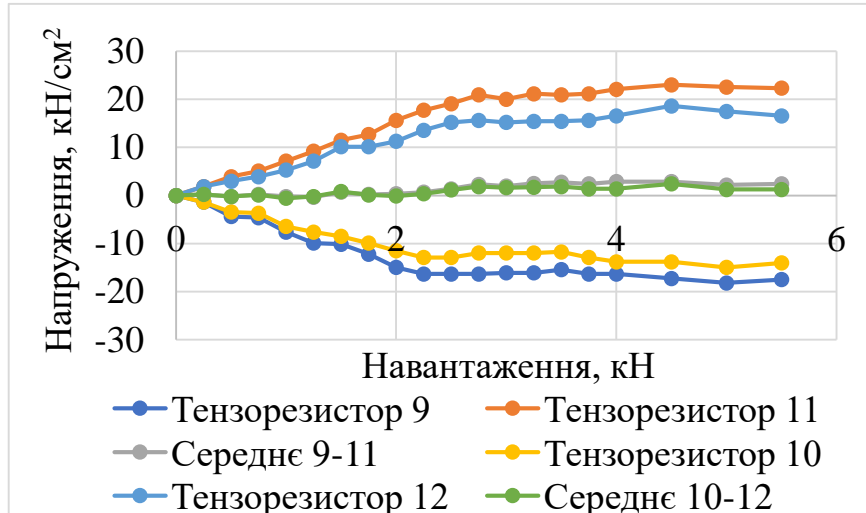
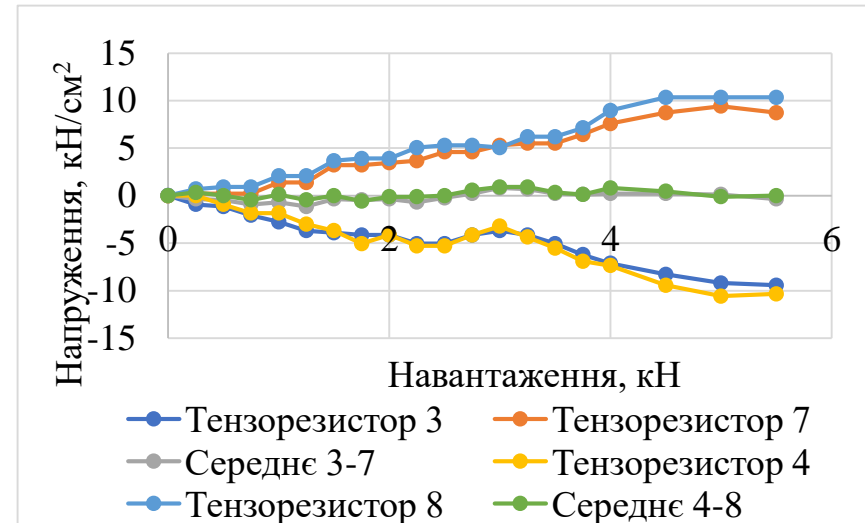
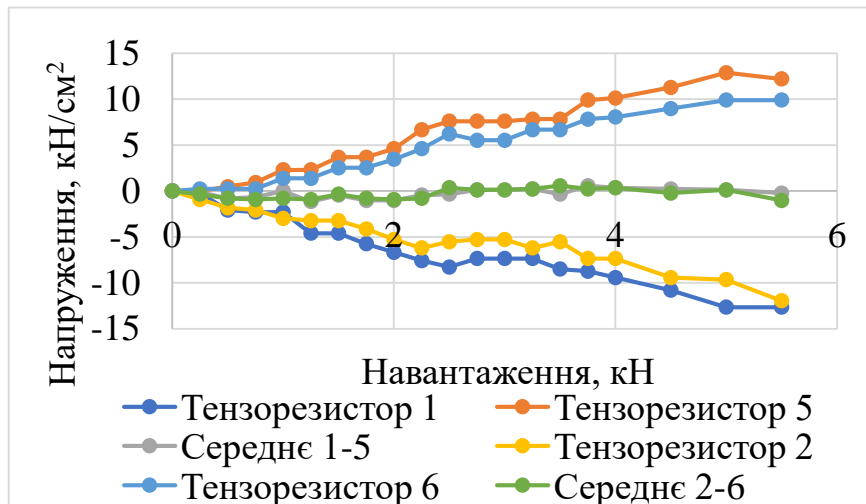


Рис. Г.5. Графіки залежності напруження від навантаження, дані з тензорезисторів зразка б

Продовження додатку Г

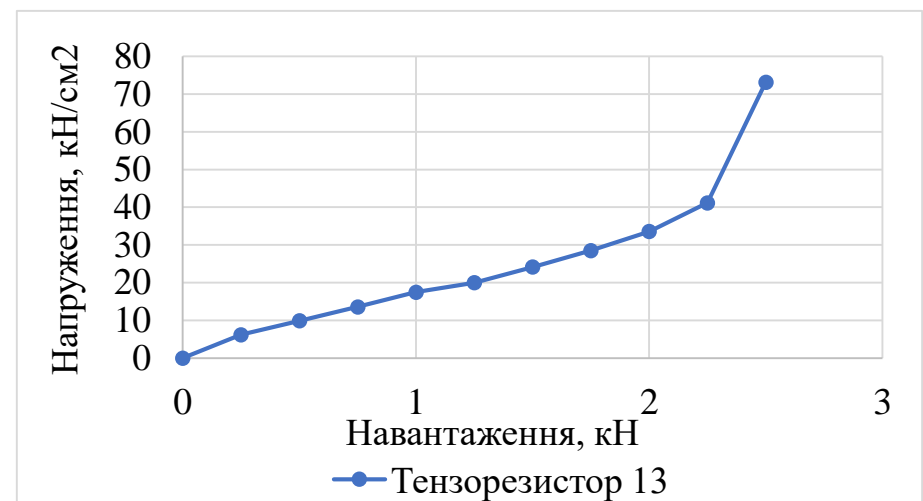
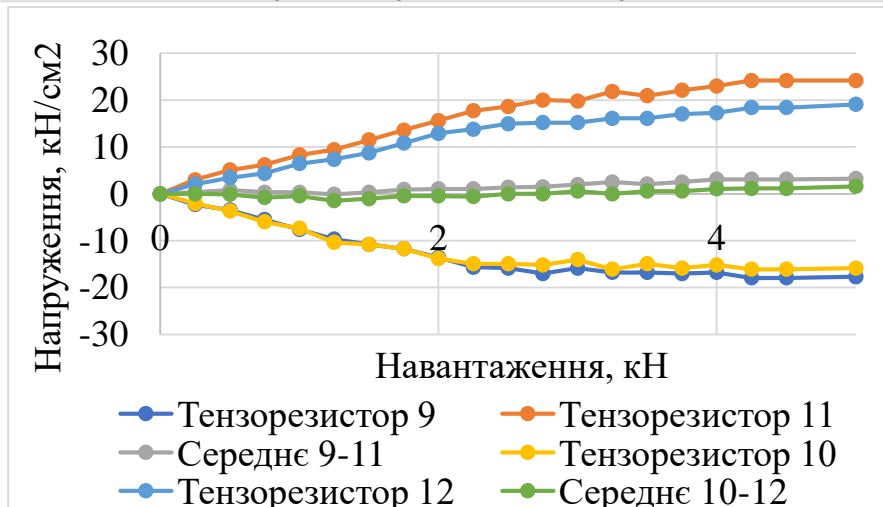
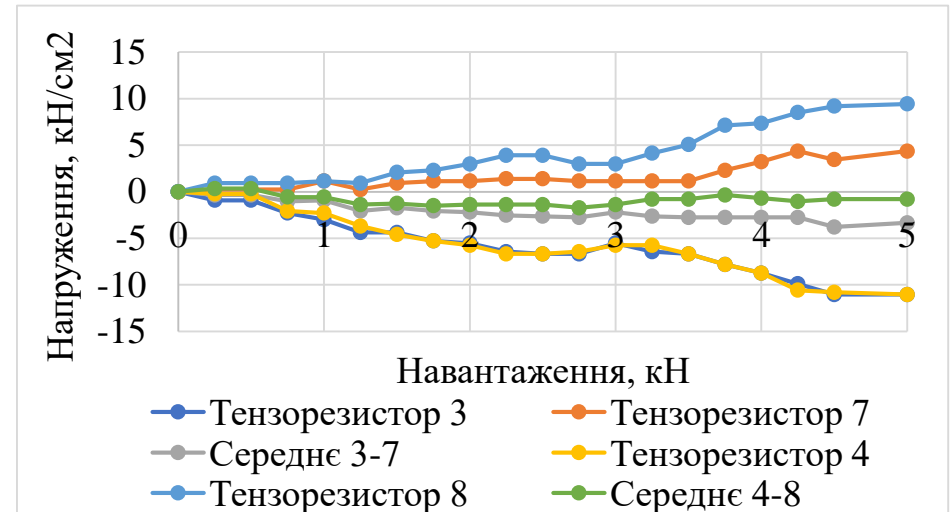
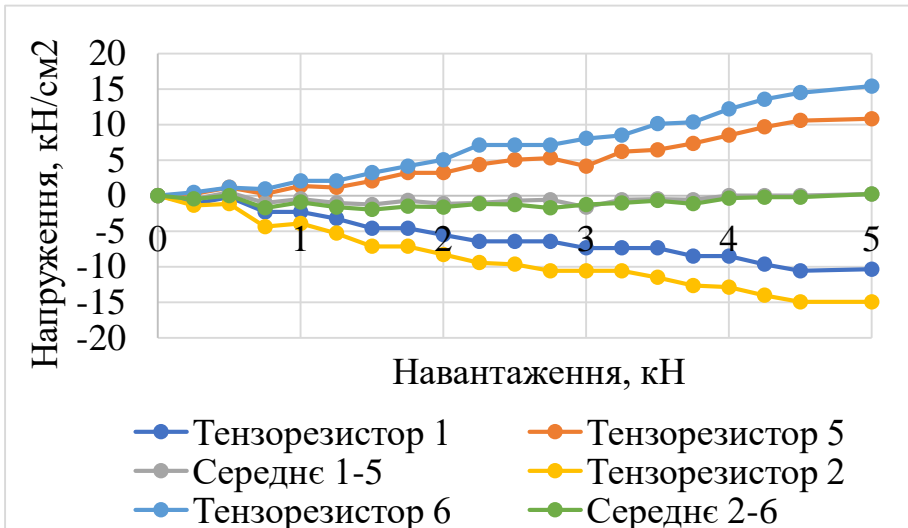


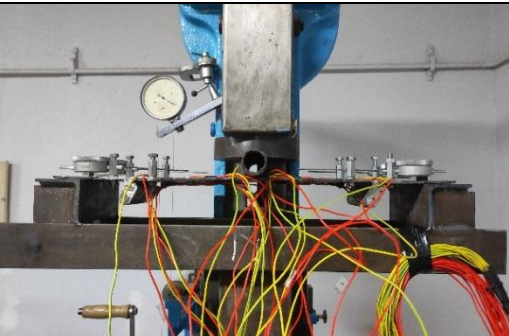
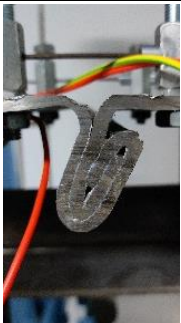


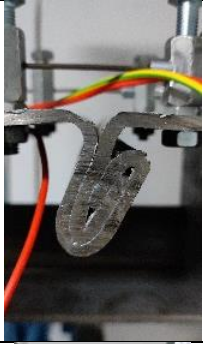

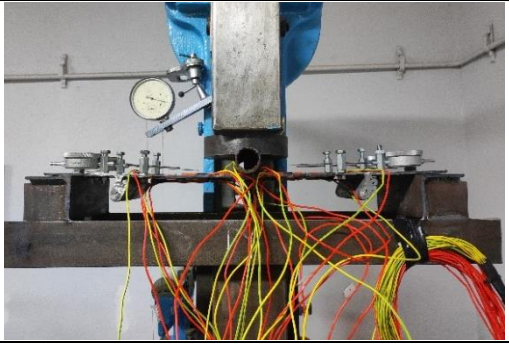
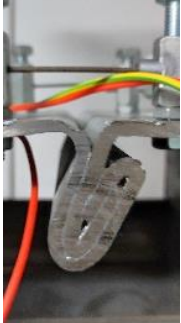

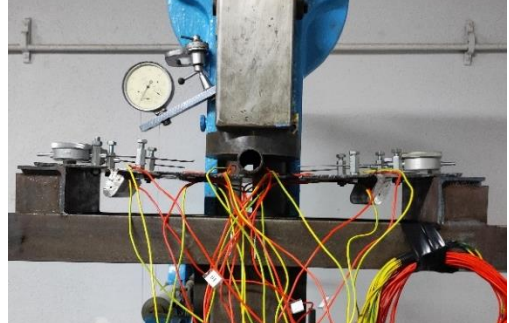


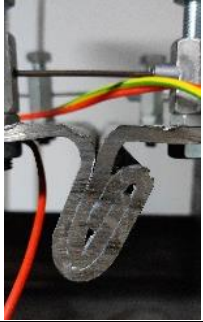

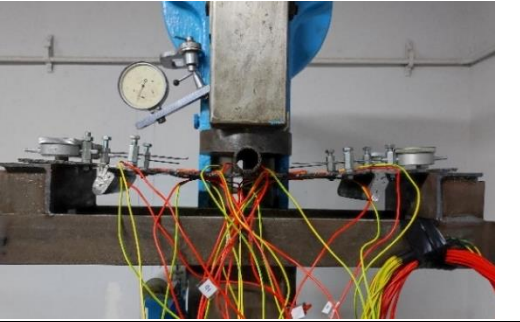


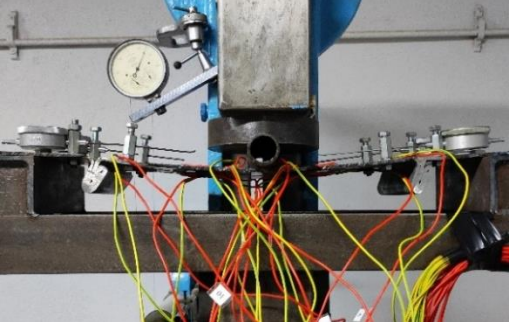


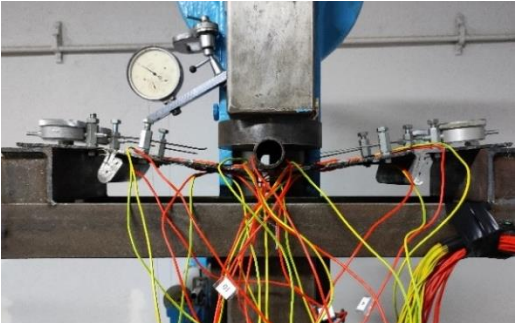

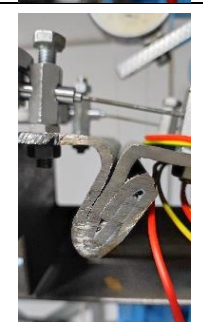
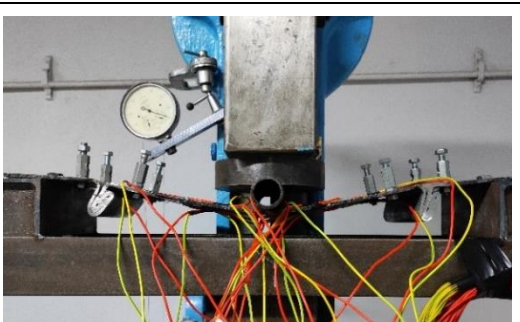


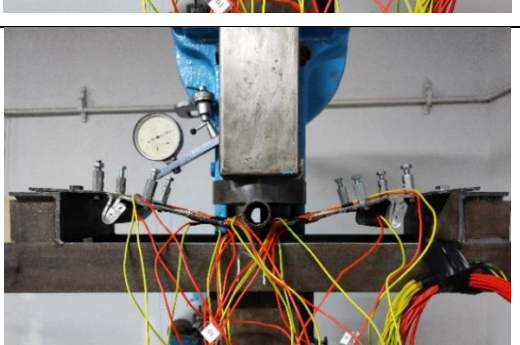
Рис. Г.6. Графіки залежності напруження від навантаження, дані з тензорезисторів зразка 7

Таблиця ГЗ

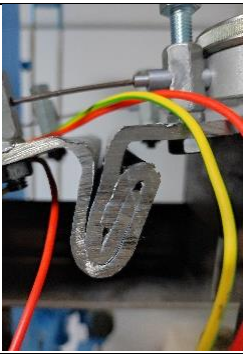
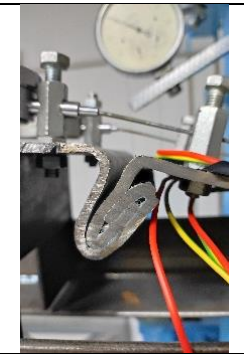
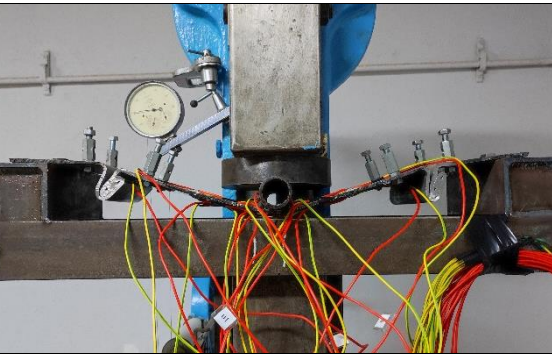


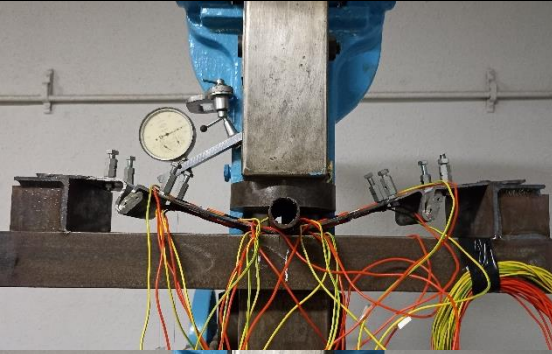


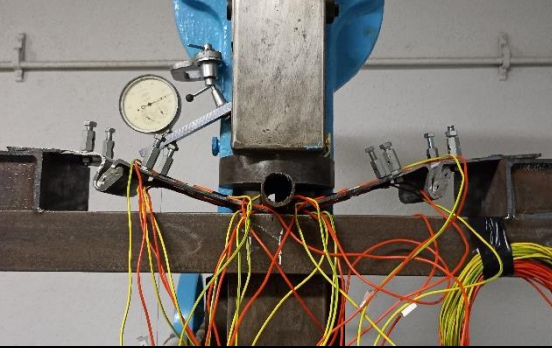
Етапи розкриття фальцевих замків та прогинів міжфальцевої зони в залежності від навантаження згину

| Навання, кН | Фальц з індикаторами 1-2 (зліва) | Фальц з індикаторами 3-4 (справа) | Міжфальцева зона |
|-------------|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 |  |  |  |
| 0,5 |  |  |  |
| 1 |  |  |  |
| 1,5 |  |  |  |

Продовження таблиці Г3

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----|---|---|--|
| 2 |  |  |  |
| 2,5 |  |  |  |
| 3 |  |  |  |
| 3,5 |  |  |  |
| 4 |  |  |  |

Продовження таблиці ГЗ

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----|---|---|--|
| 4,5 |  |  |  |
| 5,0 |  |  |  |
| 5,5 |  |  |  |

ДОДАТОК Д
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ
РОБОТИ

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Оксененко Катерини Олександрівни

на тему:

«Оцінювання надійності конструкцій спірально-фальцевих силосів для сипучих матеріалів»

Зібрана інформація щодо досвіду експлуатації металевих спірально-фальцевих силосів на прикладі двох елеваторів, яка наведена в дисертаційній роботі здобувачки кафедри будівельних конструкцій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Оксененко Катерини Олександрівни на тему «Оцінювання надійності конструкцій спірально-фальцевих силосів для сипучих матеріалів», була врахована при організації технічної експлуатації елеватора підприємства ТОВ «РОСТ-АГРО».

При обстеженні спірально-фальцевих силосів на ТОВ «РОСТ-АГРО» було використано розроблений у дисертаційній роботі алгоритм оцінювання надійності металевих спірально-фальцевих силосів.

Директор

ТОВ «РОСТ-АГРО»



Максим БЕРНАЦЬКИЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ



Професор з науково-
лабораторної та навчальної
роботи

 А.М. Мартиненко

2024 року

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Оксененко Катерини Олександрівни на тему «Оцінювання надійності
конструкцій спірально-фальцевих силосів для сипучих матеріалів» в
учбовому процесі

В учбовому процесі у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» результати дисертаційної роботи Оксененко К.О. використовуються при читанні навчальних курсів: «Сучасні проблеми надійності в будівництві» та «Методика граничних станів і нормування навантажень» для магістрів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Аспірантка Оксененко К.О. є також співавтором навчального посібника – Sergii Pichugin, Lina Klochko, Kateryna Oksenenko «Methods of limit states and load standartization». Manual. – Poltava: National University «Yuri Kondratyuk Poltava Politechnic», 2022. – 241 p.

Д.т.н., професор, зав. кафедри
будівельних конструкцій



А.М. Павліков

Д.т.н., професор



С.Ф. Пічугін