

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**АТРОШЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**



УДК 539.3

**АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ  
СКЛАДЕНИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ  
З БОЛТОВИМ З'ЄДНАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Ткачук Микола Анатолійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри теорії і систем  
автоматизованого проектування механізмів і  
машин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Воробйов Юрій Сергійович**,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,  
головний науковий співробітник відділу надійності  
та динамічної міцності

кандидат технічних наук  
**Жигилій Дмитро Олексійович**,  
Сумський державний університет,  
старший викладач кафедри опору  
матеріалів і машинознавства

Захист відбудеться «29» червня 2016 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «27» травня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.Г. Сукіасов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проектування різних конструкцій, в яких застосовуються тонкостінні складові елементи, в тому числі – панелі, смуги, оболонки, стержні, що працюють при великих прогинах, стосується багатьох галузей машинобудування. Основне застосування даних елементів – в авіабудуванні, суднобудуванні, агропромисловості, зокрема, при виготовленні таких споруд як металеві зерносховища, обшивка літаків та суден тощо. Серед подібних об'єктів значне місце посідають складені конструкції, зокрема, із болтовим з'єднанням елементів.

Як свідчить практика проектування, виготовлення і експлуатації подібного типу конструкцій, у багатьох випадках розбіжність між розрахунковими станами цих об'єктів й тими, що реалізуються, не просто відчутне, а істотне, а в деяких випадках – катастрофічне. Це свідчить про доцільність перегляду вихідних постановок вирішуваних задач і коригування множини значущих чинників, що впливають на конструкційну міцність досліджуваних тонкостінних машинобудівних конструкцій. При проектних розрахункових дослідженнях тонкостінних конструкцій для забезпечення міцності необхідно враховувати не тільки їх напружено-деформований стан (НДС), але і його зміну при варіюванні конструктивних елементів, навантажень і застосовуваних матеріалів. Використання нових прикладних розрахункових програм відкриває перспективи удосконалення всього циклу проектних досліджень від вихідних постановок до формування математичних моделей, створення методів розв'язання виникаючих задач, числової їх реалізації і, в кінцевому підсумку, – розв'язання прикладних задач.

Таким чином, науково-прикладна задача визначення напружено-деформованого стану і оцінки міцності складених тонкостінних конструкцій (СТСК), з'єднаних болтовим кріпленням із зазором, з урахуванням особливостей тертя, наявності полімерних елементів, гофрування, геометричної, структурної, фізичної нелінійностей, є актуальна та визначила напрям дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин у НТУ «ХП» згідно з планом держбюджетних НДР МОН України: «Розробка теоретичних основ комп'ютерних кластерних технологій та унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних та надскладних механічних систем» (ДР № 0107U006813), «Розробка спеціалізованих програмно-модельних комплексів для комп'ютерного моделювання контактної взаємодії та синтезу форми складнопрофільних тіл» (ДР № 0113U000420) і господарськими договорами: «Розробка методів математичного моделювання поведінки елементів об'єктів бронетанкової техніки під дією розподіленого навантаження для забезпечення їхньої захищеності» (ДП «ХКБМ ім. О.О. Морозова», м. Харків), «Просторове моделювання напружено-деформованого стану металевого зерносховища» (ПАТ «Карлівський машинобудівний завод» (КМЗ), м. Карлівка Полтавської обл.), а також згідно з договорами про науково-технічне співробітництво з ДП «Завод ім. Малишева», (м. Харків), ПАТ «Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут», (м. Маріуполь), ДП «Харківський бронетанковий ремонтний завод» (ДП «ХБРЗ») та ПАТ «КМЗ», де здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження полягає у розробці та реалізації

методів розв'язання задач аналізу конструкційної міцності складених тонкостінних машинобудівних конструкцій із застосуванням болтового з'єднання елементів з урахуванням геометричної, фізичної та структурної нелінійностей.

Для досягнення мети поставлені наступні *задачі*:

- аналіз методів дослідження конструкційної міцності тонкостінних конструкцій;
- розробка методів розв'язання задач визначення НДС складених тонкостінних конструкцій з урахуванням контактної взаємодії, тертя та зазорів;
- створення математичної моделі опису НДС складених тонкостінних конструкцій із болтовим з'єднанням з урахуванням геометричної, фізичної та структурної нелінійностей, числова реалізація розроблених методів та моделей;
- розв'язання прикладних задач аналізу напружено-деформованого стану тонкостінних машинобудівних конструкцій на прикладі металевих бункерів, елементів авіаційних та автомобільних конструкцій, тощо;
- експериментальні дослідження та впровадження результатів досліджень у виробництво.

*Об'єкт дослідження:* конструкційна міцність складених тонкостінних машинобудівних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів у процесі експлуатації.

*Предмет дослідження:* закономірності напружено-деформованого стану і міцності складених тонкостінних машинобудівних конструкцій із застосуванням болтового з'єднання та їх залежність від варійованих параметрів.

**Методи дослідження.** У роботі використовуються методи скінченних різниць (МСР) і методи скінченних елементів (МСЕ) для моделювання напружено-деформованого стану складених тонкостінних машинобудівних конструкцій; методи твердотільного тривимірного моделювання – для створення параметричних моделей досліджуваних конструкцій. Для числового розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, дискретизованих за методом скінченних різниць, розроблено варіант модифікації методу простої ітерації. Експериментальне дослідження проводилося на спеціально створеному стенді із застосуванням динамометричного контролю зусиль та індикаторів годинникового типу для визначення переміщень досліджуваної системи. Комплекс числових досліджень проводився в середовищі програми ANSYS (ліцензія НТУ «ХПІ» від фірми EMT U, м. Київ, 2011 р.) та із застосуванням Pro/ENGINEER (ліцензія НТУ «ХПІ» від фірми PTC, м. Москва, 2009 р.) і SolidWorks (ліцензійний сертифікат на використання програмного забезпечення № SEN0213 18/02-2006). Для реалізації методу скінчених різниць використане програмне середовище, яке розроблене в ході дисертаційних досліджень для розв'язання задач визначення НДС системи смуг із болтовим з'єднанням.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розробці методів аналізу міцності складених тонкостінних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів на основі нелінійних математичних моделей напружено-деформованого стану в процесі експлуатації, що враховують, на відміну від традиційних, структурну, геометричну і фізичну нелінійність:

- здійснена модифікація системи розв'язувальних рівнянь позовжньо-поперечного вигину складеного стержня, яка полягає у процедурі осереднення внутрішніх зусиль розтягання-стискання за довжиною стержня, що дає можливість звести систему розв'язувальних співвідношень за методом скінченних різниць до систе-

ми лінійних рівнянь відносно вузлових прогинів та квадратичного рівняння, яке пов'язує внутрішнє зусилля розтягання-стискання із вузловими прогинами;

- розроблено метод розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь, що виникають при дискретизації диференційних рівнянь вигину при великих переміщеннях, на основі модифікації методу простої ітерації, що відрізняється введенням параметру прискорення ітераційного процесу, та визначено швидкість і області збіжності числового розв'язання;

- встановлені залежності характеристик конструкційної міцності елементів складених тонкостінних конструкцій від конструктивних і технологічних параметрів на основі геометрично, фізично та структурно нелінійних математичних моделей процесу деформування під дією багатоциклового віднульового навантаження;

- уперше встановлені особливості деформування системи двох стержнів, з'єднаних болтовим кріпленням, під дією поперечного навантаження із урахуванням попереднього затягування, тертя, проковзування та зазору, при симетричному багатоцикловому навантаженні, наявність на кривих «прогин - навантаження», «зусилля розтягання-стискання - навантаження», «взаємне проковзування стержнів - навантаження» петель гістерезиса, які викликані незворотністю процесів за наявності тертя;

- виявлені закономірності впливу на напружено-деформований стан складених тонкостінних конструкцій болтового з'єднання з урахуванням зазору і попереднього затягування, а також введення ущільнювальної шайби;

- розроблено методику для обґрунтування проектно-технологічних параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій із болтовим з'єднанням на основі результатів більш точного (порівняно із традиційними методиками) визначення їхнього напружено-деформованого стану із урахуванням значущих чинників.

**Практичне значення одержаних результатів** для машинобудівної галузі полягає в тому, що установлені закономірності впливу конкретних варійованих параметрів на напружено-деформований стан тонкостінних машинобудівних конструкцій, що дає змогу безпосередньо надати перевагу певним проектним рішенням, а саме: збільшення зазору у повздовжньому напрямку між болтом та панелями, що з'єднуються; зниження пружних характеристик матеріалу ущільнювальної шайби; зменшення периметра конструкцій порівняно із номінальним для запобігання ситуації виборки зазору внаслідок монтажних похибок; укладання пакету панелей з чергуванням панелей із різних з'єднаних наборів; підвищення коефіцієнта тертя між з'єднуваними панелями. Створений програмний комплекс, що впроваджений у практику проектних робіт на профільному підприємстві – «Карлівський машинобудівний завод» (КМЗ).

Результати досліджень впроваджені у практику проектно-дослідницьких робіт КМЗ та науково-дослідної частини НТУ «ХПІ», від яких отримані акти впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення і основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них: постановка задач, обробка й аналіз результатів числових та натурних експериментів для визначення залежності зміни характеристик конструкційної міцності елементів складених тонкостінних конструкцій від конструктивних і технологічних параметрів на основі геометрично, фізично та структурно нелінійних математичних моделей їх деформування під дією

навантаження; розробка методів розв'язання нелінійних задач на основі модифікації методу простої ітерації та визначення швидкості і області збіжності числового розв'язку задач з урахуванням геометричної нелінійності на прикладі стрижневої системи; аналіз закономірностей впливу болтового з'єднання в складених тонкостінних конструкціях з урахуванням зазору в з'єднанні і попереднього затягування; встановлення нелінійних залежностей прогинів системи тонкостінних елементів з болтовим з'єднанням від зовнішніх навантажень при одноразовому і багаторазових навантаженнях-розвантаженнях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати та положення роботи доповідались на Міжнародних науково-практичних конференціях (МНТК): XXI-XXIII МНТК «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2013-2015 рр.); VII МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 2015 р.); «III МНТК молодих спеціалістів» (м. Маріуполь, 2013 р.); 44<sup>й</sup>-46<sup>й</sup> МНТК «Проблеми якості та довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей і вузлів» (м. Севастопіль, м. Одеса, 2013-2015 рр.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 16 наукових працях, зокрема 10 статей у наукових фахових виданнях України (1 – у наукометричній базі), 1 – у закордонному періодичному фаховому виданні, 5 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 202 сторінки; у т.ч. 137 рисунків по тексту; 13 рисунків на окремих сторінках; 10 таблиць по тексту; список використаних джерел зі 199 найменувань на 20 сторінках, 3 додатки на 7 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладені актуальність теми дисертації, теоретична і практична цінність, сформульовані мета та основні завдання досліджень.

У **першому розділі** міститься аналіз методів розрахунку складених тонкостінних конструкцій (СТСК). Різним аспектам розрахунку тонкостінних конструкцій приділяється увага в роботах багатьох учених, таких як Т.Беличко, І.А. Біргер, В.Л. Бідерман, Д.В. Бреславський, М.І. Бобир, К. Васідзу, В.З. Власов, Ю.С. Воробйов, А.Л. Гольденвейзер, А.М. Гузь, Д.О. Жигилій, Б.Я. Кантор, Л.В. Курпа, Г.І. Львов, О.К. Морачковський, В.Л. Рвачов, О.О. Стрельнікова, В.Г. Сукіасов, А.Н. Шупіков, С.П. Тимошенко, Л.І. Турчак, А.П. Філіппов, А.П. Філін, Gan Tang, Lingfeng Yin, Xiaoming Guo, E. Gallego, C. Gonzalez-Montellano, A. Ramirez, F. Ayuga, Adem Dogangun, Zeki Karaca, Ahmet Durmus, Halil Sezen, J.M. Fuentes, Y.I. Maggia, R.M. Gonçalvesa, R.T. Leonb та інші. Для розв'язання виникаючих задач застосовуються різні аналітичні, числові та експериментальні методи. Однак на даний час розв'язки практичних задач, що виникають в реальних конструкціях, із урахуванням всієї множини значущих чинників для визначення складного НДС потребують подальшого удосконалення, враховуючи можливості сучасних пакетів прикладних програм. У зв'язку з цим розробка методу визначення НДС та конструкційної міцності тонкостінних машинобудівних конструкцій, з'єднаних болтовим кріпленням, а та-

кож його реалізація і визначення закономірностей розподілу прогинів, зміщень і поздовжніх зусиль на основі створення програмного комплексу прикладних розрахунків НДС елементів СТСК обрано як напрямок дисертаційних досліджень.

У другому розділі наведені математичні моделі визначення НДС тонкостінних конструкцій в лінійних і геометрично нелінійних постановках типу:

$$\left\{ \frac{d^2}{dx^2} \left( EI \frac{w''}{[1 + (w')^2]^{\frac{3}{2}}} \right) = q + \frac{d}{dx} \left[ P \left( \frac{dw}{dx} \right) \right]; \quad \frac{dP}{dx} + q_x = 0 \right. \quad \text{– стержні;} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} D \nabla^2 \nabla^2 w &= q + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ \frac{1}{Eh} \cdot \nabla^2 \nabla^2 \psi &= \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{aligned} \right. \quad \text{– пластини;} \quad (2)$$

$$\left\{ D \nabla^2 \nabla^2 w = \nabla_k^2 \psi + L(w, \psi) + q; \quad \frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \psi = -\nabla_k^2 w - \frac{1}{2} L(w, w) \right. \quad \text{– пологі оболонки,} \quad (3)$$

де  $w$  – прогини тонкостінних елементів;  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $I$  – момент інерції поперечного перерізу стержня;  $h$  – товщина оболонки або пластини;  $q$  – поперечне навантаження;  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $\psi$  – функція Ері,  $\nabla_k^2 = k_1 \partial^2 / \partial x_2^2 + k_2 \partial^2 / \partial x_1^2$ ,  $k_1 = 1/R_1$ ;  $k_2 = 1/R_2$  – кривини середньої поверхні, до деформування;  $L(w, \psi) = \partial^2 w / \partial x_1^2 \times \times \partial^2 \psi / \partial x_2^2 + \partial^2 w / \partial x_2^2 \cdot \partial^2 \psi / \partial x_1^2 - 2 \partial^2 w / \partial x_1 \partial x_2 \cdot \partial^2 \psi / \partial x_1 \partial x_2$ . Моделі (1, 2, 3) враховують, зокрема, вплив поздовжніх (тангенціальних) сил і геометричної нелінійності в цілому на НДС СТСК. Неврахування геометричної нелінійності для певного класу конструкцій при значних навантаженнях призводить до істотних похибок.

Для двох з'єднаних болтовим кріпленням стержнів сформовані розв'язувальні співвідношення для розрахунку тонкостінних металевих конструкцій. У постановці, враховується три види нелінійності: структурна, геометрична і фізична. При цьому запропоновані удосконалені підходи до визначення поздовжніх внутрішніх сил, що діють у конструкції. Проведено зіставлення результатів розв'язань з використанням різних методів на прикладі стрижневої системи, пластинчастих і оболонкових конструкцій. На цій основі побудована математична модель НДС СТСК з болтовим з'єднанням, яка покладена в основу дослідження тонкостінних конструкцій.

У першому наближенні систему (рис. 1, 2) розглянуто в стрижневій постановці для виявлення якісних особливостей поведінки СТСК під навантаженням. Така найпростіша система природнім чином виокремлюється як базовий елемент, наприклад, із конструкції збірного бункера (див. рис. 1).

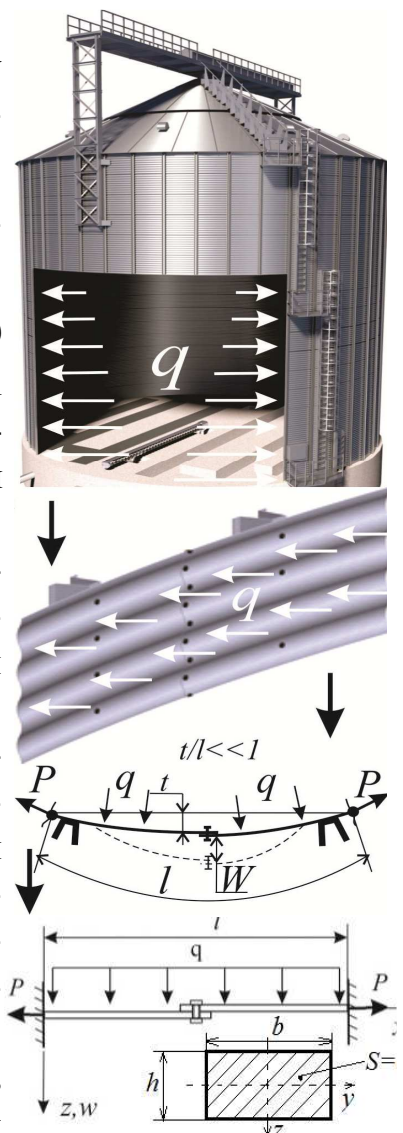


Рисунок 1 – Поздовжньо-поперечний вигин стержня (базовий елемент СТСК типу металевого бункера)

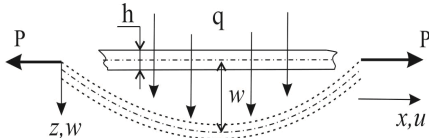


Рисунок 2 – Тонкостінний елемент при поздовжньо-поперечному вигині

Відштовхуючись від системи зв'язаних диференціальних рівнянь (1) при крайових умовах:

$$w \Big|_{x=0;l} = 0; \quad dw/dx \Big|_{x=0;l} = 0; \quad u(0) = 0; \quad u(l) = 0, \quad (4)$$

продемонстровано, що коли стріла прогину набагато менша довжини стержня (тобто нехтуючи в (1)  $(w')^2 \ll 1$ ), система розв'язувальних рівнянь (1) суттєво спрощується при крайових умовах (4). Тому у випадку поздовжньо-поперечного вигину стержня з урахуванням розподілу поздовжніх деформацій за співвідношенням  $\varepsilon_x = \frac{du}{dx} - z \frac{d^2w}{dx^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2$  за-

пропонована процедура осереднення внутрішнього зусилля розтягування-стиснення  $P$  за довжиною (рис. 3, 4). У підсумку замість зв'язаної системи диференціальних рівнянь (1) отримана зв'язана система у вигляді диференціального рівняння 4-го порядку та інтегрального співвідношення ( $EI = const$ ):

$$EIw^{IV} + Pw'' = q; \quad (5)$$

$$P(x) = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma \cdot dz = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E\varepsilon \cdot dz = ES \left( u'(x) + \frac{1}{2} (w'(x))^2 \right);$$

$$P_* \approx \frac{1}{l} \int_0^l P(x) dx = \frac{ES}{l} \left[ \int_0^l u'(x) dx + \frac{1}{2} \int_0^l (w'(x))^2 dx \right]; \quad P_*(w) = ES \frac{1}{2l} \int_0^l (w')^2 dx. \quad (6)$$

Співвідношення (6) дають змогу напряму зв'язати  $P$  тільки із розподілом прогинів  $w(x)$ . Відповідно, залежність від переміщень  $u(x)$  виключена.

Розподіл сили  $P$  за довжиною осереднюється та приймається як константа, що

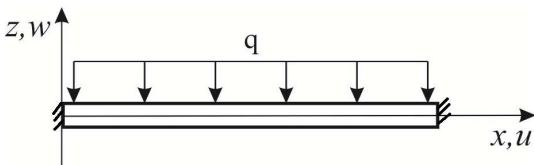


Рисунок 3 – Схема навантаження стержня

спрощує подальший аналіз поведінки системи. Для розв'язання системи (5), (6) використано метод скінченних різниць (МСР), із використанням якого отримано зв'язану нелінійну систему алгебраїчних рівнянь відносно вектора вузлових переміщень  $W$  та сили  $P_*$ :

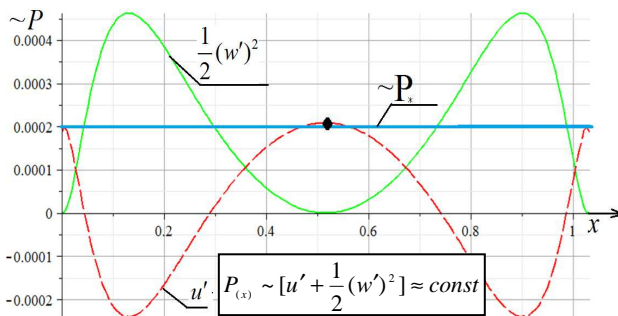


Рисунок 4 – Визначення поздовжньої сили  $P_*$  відповідно 4-го і 2-го порядків,  $Q$  – вектор вузлових навантажень, а інтегральний вираз в (6) замінюється формулою прямокутників в (7),  $i$  – номер вузлів різницевої схеми. Основна нелінійність в (7) зосереджена у залежності  $P_* = P_*(W)$ .

$$\begin{cases} (M_1 + P_* \cdot M_2)W = Q, \\ P_* \approx ES \frac{1}{2l} \sum_i^{n-1} \left( \frac{W_{i+1} - W_i}{\Delta} \right)^2 \Delta = \frac{1}{2l} \cdot \frac{ES}{\Delta} \sum_i^{n-1} (W_{i+1} - W_i)^2. \end{cases} \quad (7)$$

Матриці  $M_1$  і  $M_2$  в (7) описують скінченно-різницево диференціювання в (5) від-

Для розв'язання (7) запропоновано модифікований метод простої ітерації, де впроваджено параметр регулювання величини кроку на поточному ітераційному етапі  $\omega$ , як у методах розв'язання СЛАР типу верхньої або нижньої релаксації:

$$\begin{aligned}
 W^{(0)} &:= M_1^{-1} \cdot Q; & Q &:= Q + \Delta Q \pmod{} & (a) \\
 P_*^{(1)} &:= G(W^{(0)}); & & & (b) \\
 k &:= 1; & & & (c) \\
 W^{(k)} &:= [M_1 + P_*^{(k)} \cdot M_2]^{-1} \cdot Q; & & & (d) \\
 P_*^{(k+1)} &:= P_*^{(k)} + \omega \cdot (G(W^{(k)}) - P_*^{(k)}); \pmod{} & & & (e) \\
 k &:= k + 1; & & & (f) \\
 \text{if } \left[ \delta_W^k = \frac{\max |w_i^k - w_i^{(k-1)}|}{\max |w_i^k|} > \varepsilon_w \right] \text{ or } \left[ \delta_P^k = \frac{\max |P_*^k - P_*^{(k-1)}|}{\max |P_*^k|} > \varepsilon_p \right] & \text{ go to } (d). & (g) \\
 \text{if } (P_* \geq P_{*np}) \Rightarrow [P_* := P_{*np}; l := l + \Delta l] \pmod{} & & (h)
 \end{aligned} \tag{8}$$

де *a)* – розв’язання лінійної задачі для визначення прогину для поточного значення навантаження  $Q$  (покроково за навантаженням); *b)* – визначення першого наближення зусилля  $P_*$ ; *c), f)* – організація циклів ітераційного процесу; *d)* – визначення поточного значення вузлових прогинів; *e)* – визначення поточного значення повздовжнього зусилля (модифікація із введенням  $\omega$ ); *g)* – перевірка умов закінчення ітераційного процесу; *h)* – визначення величини проковзування складеного стержня.

Чисельні дослідження розподілів  $W$  та значень  $P_*$  дають змогу визначити вплив  $\omega$  на швидкість збіжності ітераційного процесу, на його характер, а також встановити рекомендований інтервал його значень в зоні  $\omega = 0,4$  (рис. 5, 6).

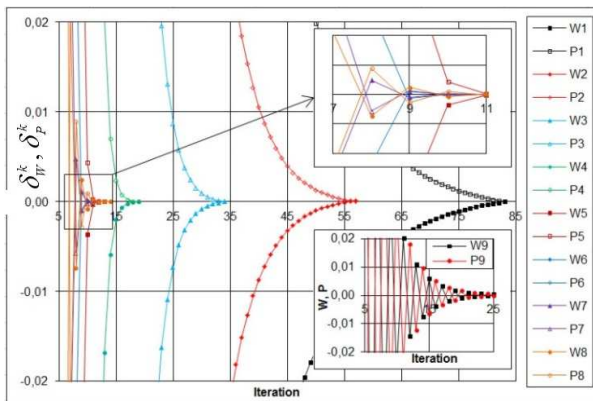


Рисунок 5 – Процес наближення розв’язку (відносних величин  $\delta_W^k$ ,  $\delta_P^k$ ) залежно від кількості ітерацій

Досліджено вплив різних чинників на точність розв’язку задачі визначення прогинів. Алгоритм (8) модифіковано стосовно системи смуг, з’єднаних між собою болтовим кріпленням. Додатково проведено визначення похибки, що вноситься в систему розв’язуваних рівнянь, і порівняння числового розв’язку за методом скінченних елементів і за методом скінченних різниць в геометрично лінійній і нелінійній постановках (рис. 7). Підтверджується повна відповідність розподілів прогину  $W$ , обчислених МСР та МСЕ.

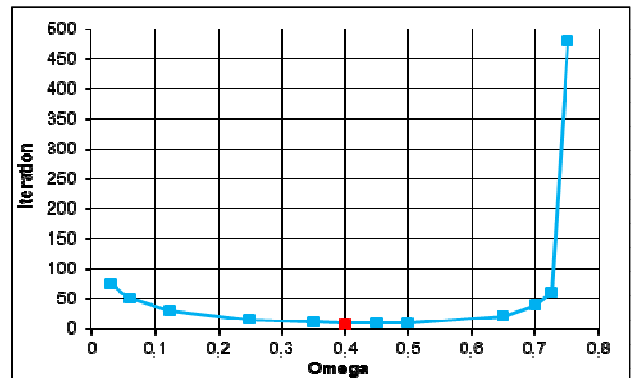


Рисунок 6 – Графік залежності необхідної кількості ітерацій для розв’язання нелінійної системи рівнянь від параметра  $\omega$

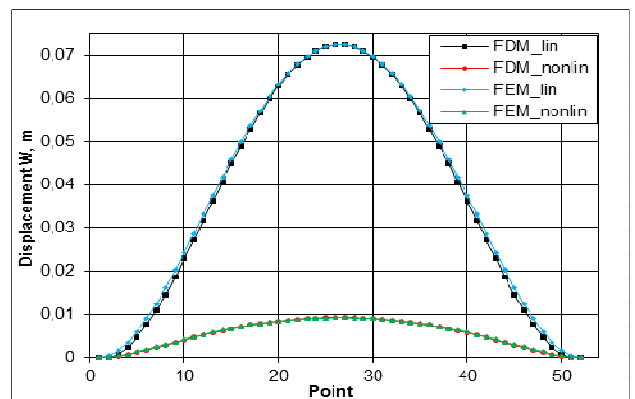
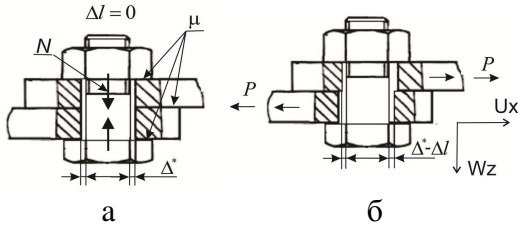


Рисунок 7 – Розподіл прогинів  $W$ , обчислений МСР та МСЕ з урахуванням і без урахування геометричної нелінійності

у власному програмному коді, що дає змогу досліджувати усі процеси розв'язання. Також проведений аналіз поведінки системи складених смуг при урахуванні сил тертя і зазору в болтовому з'єднанні, при модифікації співвідношень (1), (5-8). Вводиться параметр  $\tau = \Delta l / l$ , де  $\Delta l$  – поздовжнє зміщення стержнів один відносно іншого внаслідок проковзування із номінального положення (рис. 8). Зв'язок між  $\tau$  та силою  $P_*$  визначається законом Кулона :



$$\begin{cases} P_* < \mu N \Rightarrow \tau = 0; \\ P_* = \mu N \Rightarrow \tau = \frac{\mu N}{ES} - \frac{1}{2l} \int_0^l (w')^2 dx, \end{cases} \quad (9)$$

Рисунок 8 – Повздовжнє проковзування стержнів: а – номінальне положення; б – поточне положення

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя,  $N$  – сила попереднього затягування болта. Перша частина співвідношень (9) описує стан зчеплення двох стержнів під дією тертя, друга – відносного проковзування. Якщо позначити через  $\tau^* = \Delta^* / l$ , де  $\Delta^*$  – сумарний зазор у болтовому з'єднанні (див. на рис. 8, у даному випадку 2 мм), то залежність  $P_*$  від навантаження  $q$  (або при застосуванні МСР –  $Q$ ) описується на різних етапах різними залежностями. Етапи I-III відповідають різним випадкам (рис. 9):

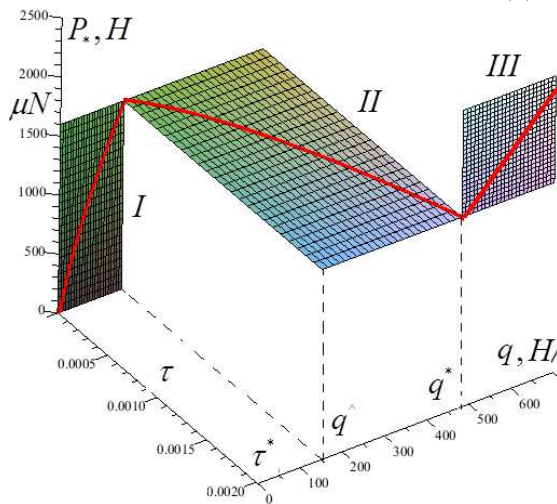


Рисунок 9 – Залежність  $P(q)$

$$\begin{aligned} I. P_* &= \frac{ES}{2l} \int_0^l (w')^2 dx; \\ II. P_* &= \mu N; \\ III. P_* &= ES \left[ \frac{1}{2l} \int_0^l (w')^2 dx - \tau^* \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

I – відповідає навантаженню від номінального положення (див. рис. 8, а) при  $q=0$  до величини  $q=q^*$ , коли  $P_* = \mu N$ ; II –  $P_* = const$ ,  $\tau=0 \div \tau^*$ , відбувається взаємне проковзування стержнів до задоволення умов рівноваги; III – етап після повного вибирання зазору  $\Delta^*$  при  $q=q^*$ , стержні працюють як єдине ціле.

У просторі  $(\tau, q, P_*)$  при монотонному навантаженні крива  $L: [P_* = P_*(q), \tau = \tau(q)]$  розташовується по чергово у площинах  $\tau=0$  (етап I),  $P_* = \mu N$  (етап II),  $\tau = \tau^*$  (етап III), тобто параметри  $P_*, \tau$  змінюються з ростом  $q$  по чергово. Аналогічно ведуть себе ці параметри при розвантаженні від  $q=q_{max}$  до  $q_{min} = -q_{max}$ . При цьому можуть виникнути перескоки між формами рівноваги (рис. 10). Відповідно, при складному немонотонному навантаженні необхідно розглядати процес зміни  $P_*, \tau$  покроково (модифікації: в (8, а) – приріст  $\Delta Q$ , а в (8, б) – зміна  $\Delta l$ ). Для багатьох конструкцій типу металічних зернохочищ штатним, як правило, є цикл навантаження до деякого рівня  $q_{max}$  (на різних рівнях висоти – різний), а після цього – розвантаження до нульового значення  $q$ , після чого цикл повторюється. Відповідно, проаналізовано в першу чергу вигляд кривої  $L$  для віднульового циклу

( $q=0 \rightarrow q_{\max} \rightarrow 0$ ) при його багаторазовому повторенні. Також потрібне визначення поведінки характеристик деформування системи при різних варіантах навантаження (крива  $M$ : [ $W_s = W_s(q)$ ,  $\tau = \tau(q)$ ], де  $W_s$  – стріла прогину стержня). На рисунку 10 представлені характерні криві  $M, L$  для симетричного та віднульового циклів навантаження.

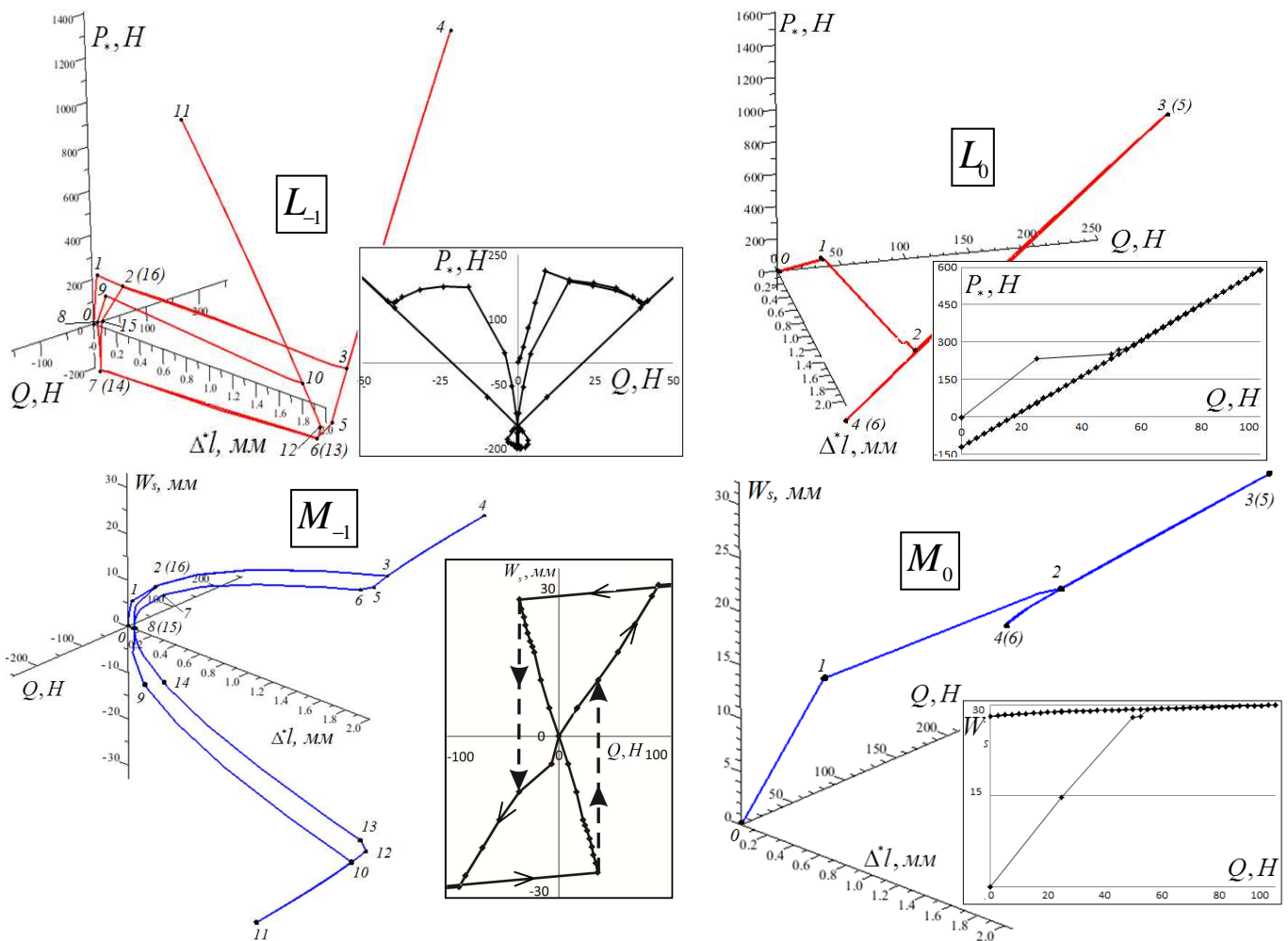


Рисунок 10 – Залежності між прогинами, проковзування та поздовжнього зусилля (просторові лінії  $M, L$ ) при різних циклах навантаження ( $r = -1$  – симетричний:  $q = q_{\max} \rightarrow q_{\min} \rightarrow 0 \rightarrow \dots$ ;

$r = 0$  – віднульовий:  $q = q_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow \dots$ )

Для кривих  $M_r, L_r$  характерним є наявність петель гістерезису: навантаження та розвантаження проходять різними шляхами, в системі проявляється незворотність напружено-деформованого стану за параметром навантаження. На різних ділянках (етапи  $I(0,1,2)$ ,  $II(2,3)$ ,  $III(3,4)$ , ..., рис. 10) криві  $M, L$  є досить плавними, але в точках переходу між ними спостерігаються зломи. Швидкості зміни  $P, W_s$  на різних етапах  $I, II, III...$  відрізняються. Можливі розриви на кривих  $M_{-1}, L_{-1}$  із причини втрати стійкості (штрихові лінії на рис. 10). Разом із тим таких розривів не спостерігається при віднульових циклах навантаження на кривих  $M_0, L_0$ . У цьому випадку відбувається при першому циклі навантаження перехід у більш навантажений стан, а надалі цикли розвантаження-навантаження проходять повторними майже співпадаючими усталеними траєкторіями із малою петлею гістерезису.

Таким чином, НДС конструкцій типу металічних зерносховищ визначається у вигляді двох складових: при первинному навантаженні відбувається перехід у деякий

стан із залишковими деформаціями, а надалі відбувається циклічне навантаження-розвантаження від цього стану до максимальних навантажень і в зворотному напрямі.

Проведений якісний аналіз НДС та конструкційної міцності складеної стрижневої системи із болтовим з'єднання, тертям та зазором служить трьом цілям. По-перше, це визначення якісних ефектів, що реалізуються у подібних системах. При цьому установлені характерні ділянки на кривих  $M, L$  на різних стадіях та при різних сценаріях навантаження. По-друге, це визначення значущих чинників, які слід враховувати при аналізі НДС подібних конструкцій. Зокрема, продемонстрована доцільність враховувати тертя, зазори, первинне затягування у болтовому з'єднанні та геометричну нелінійність. По-третє, це можливість проведення попереднього експрес-аналізу НДС на початкових етапах проектування подібного типу конструкцій. Такий аналіз дає змогу завчасно відкинути поготів непрацездатні варіанти, зосередившись у подальшому на обґрунтуванні прийнятих параметрів на обмеженому колі раціональних проектних рішень.

Запропонована структура досліджень подібних тонкостінних конструкцій (рис. 11), у вигляді послідовності етапів (1-3), поєднаних між собою логікою «від загальної конструкції – до типового елемента – до уточненої моделі всієї конструкції – до докладного аналізу НДС представницької області із болтовим з'єднанням».

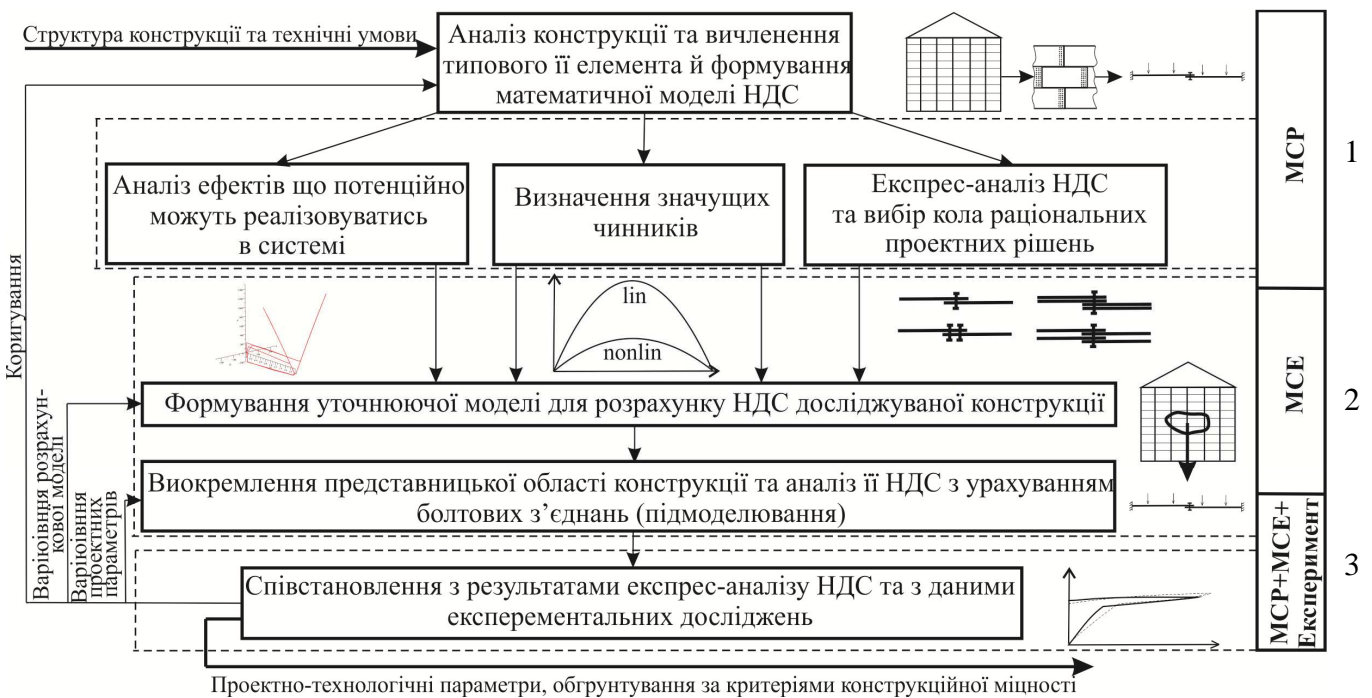


Рисунок 11 – Структура досліджень НДС складених тонкостінних конструкцій

Між різними етапами досліджень налагоджується система зворотніх зв'язків задля узгодженості одержуваних результатів. Цим самим коригується весь цикл проектних досліджень, забезпечується конструкційна міцність та раціональні проектно-технологічні параметри досліджуваних СТСК. Ще однією із переваг запропонованої структури досліджень є природний перехід до реалізації у вигляді спеціалізованих програмних комплексів, які можна «переналагоджувати» на ті чи інші машинобудівні тонкостінні конструкції. Таким чином, у розділі 2 реалізований перший етап досліджень (див. рис. 11).

У третьому розділі розроблено математичну модель НДС тонкостінних машинобудівних конструкцій з урахуванням усіх значущих чинників на прикладі елементів металевих зерносховищ (рис. 12), відповідно до етапу 2 (див. рис. 11). Застосовувалися як 3D, так і 2D постановки МСЕ, в процесі аналізу НДС враховувалися: геометрична нелінійність, попереднє затягування болтового кріплення, контакт, зазор в болтовому кріпленні, тертя між контактуючими поверхнями, фізична нелінійність матеріалу пластикової шайби. Для реалізації даних співвідношень залучався програмний комплекс ANSYS та макроси на мові APDL.

За результатами чисельних розрахунків встановлено, що: при одноразовому поступовому навантаженні відбувається на початку лінійне зростання компонент напружено-деформованого стану, тертя є достатнім для змикання, і смуги між собою не зрушуються; при певному рівні навантажень відбувається взаємне зміщення смуг, аж до деякої величини, яка не перевищує зазор; після вибирання зазору зростання переміщень уповільнюється, а напружень – прискорюється (рис. 13).

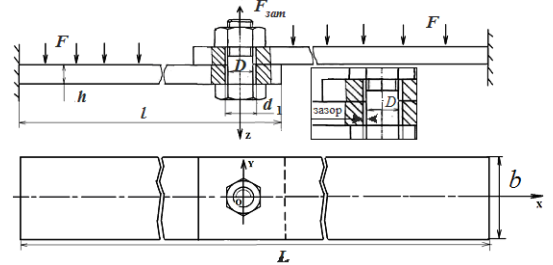
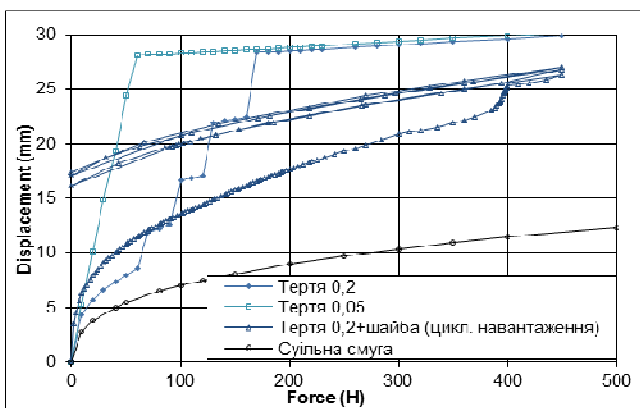
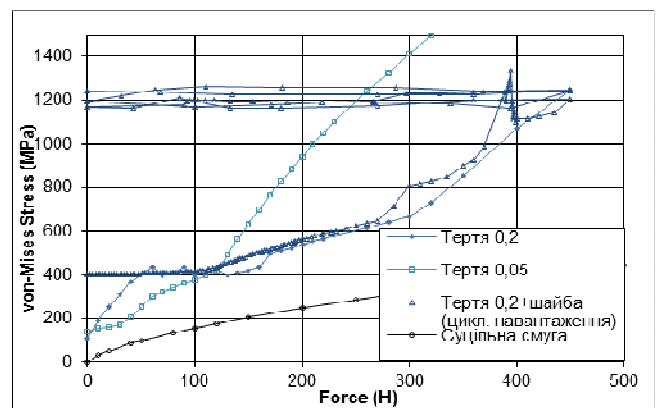


Рисунок 12 – Система смуг з болтовим кріпленням



а



б

Рисунок 13 – Стріла прогинів (а) (мм) та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (б) (МПа) залежно від навантаження (Н)

Виявлено відчутне різке зростання зусиль розтягування в тілах болтів порівняно із початковим їх рівнем, що в інших дослідженнях раніше не фіксувалося. Виявлено, що при знятті навантаження система не повертається в початковий стан. При повторних навантаженнях процес протікає приблизно по верхній ділянці першого навантаження. Це принципова особливість поведінки такого типу систем: вона різко змінюється при первинному циклі навантаженні, а при повторних – досить точно повторює свою поведінку (рис. 13).

Виявлено значний вплив зазору між болтом і отворами на НДС системи (рис. 14). Встановлено особливості впливу тертя і наявності пластикової шайби з нелінійного матеріалу типу Муні-Рівліна (властивості матеріалу поліетилену визначено із публікацій інших дослідників). У тому, що стосується пластикової шайби, маємо «згладжування» всіх характеристик і картин напружено-деформованого стану.

Крім того, досліджено вплив кількості болтів на працездатність конструкції: цей вплив неоднозначний та сильно залежить від похибок монтажу системи «отвори-

болти» (рис. 15). Додатково визначено вплив схеми формування пакету листових панелей на напружено-деформований стан досліджуваної системи.

За підсумками проведено аналіз результатів досліджень, сформувані висновки і розроблені рекомендації: рекомендується з'єднання смуг з послідовним чергуванням із різних пакетів панелей; позитивний вплив збільшеного зазору в поздовжньому напрямку; згладжувальний вплив пластикових шайб; позитивний вплив тертя; різко негативний вплив похибок монтажу; необхідність врахування гофрування, оскільки так звані «еквівалентні» ортотропні моделі дають значні похибки.

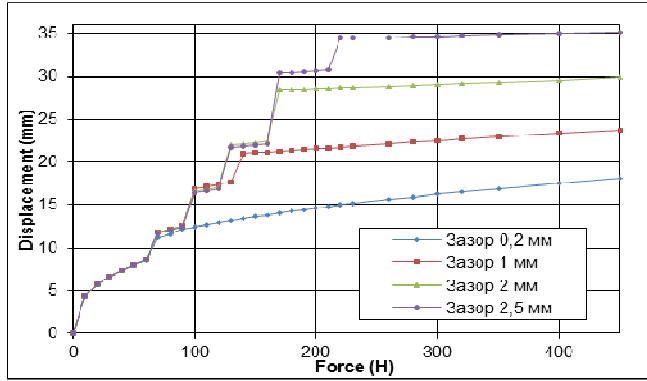


Рисунок 14 – Стріла прогинів складеної смуги з варіюванням зазора  $\Delta^*$  в з'єднанні (мм)

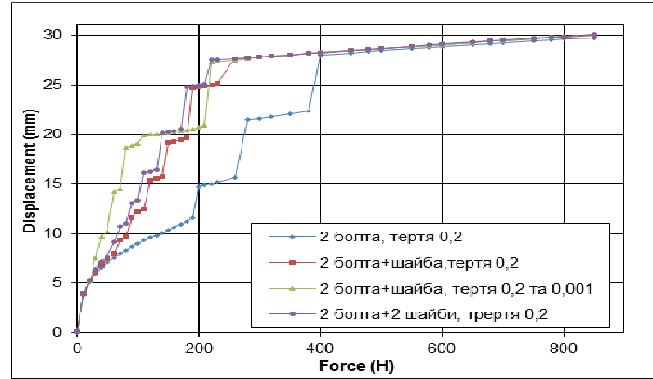


Рисунок 15 – Стріла прогинів складеної смуги з різною кількістю болтів (мм)

У розділі 4 з урахуванням отриманих рекомендацій і висновків здійснено розв'язання низки прикладних задач, в яких визначено конструкційну міцність та НДС металевих зерносховищ, елементів авіаконструкцій тощо.

При проведенні дослідження НДС металевих зерносховищ встановлено, що розподіл прогинів і напружень за висотою носить істотно нерівномірний характер (рис. 16), що відповідає експериментальним даним, які отримані у ході реальних випробувань. Використання моделі ортотропної оболонки згладжує розподіли напружень і не відповідає реальним розподілам компонент НДС.

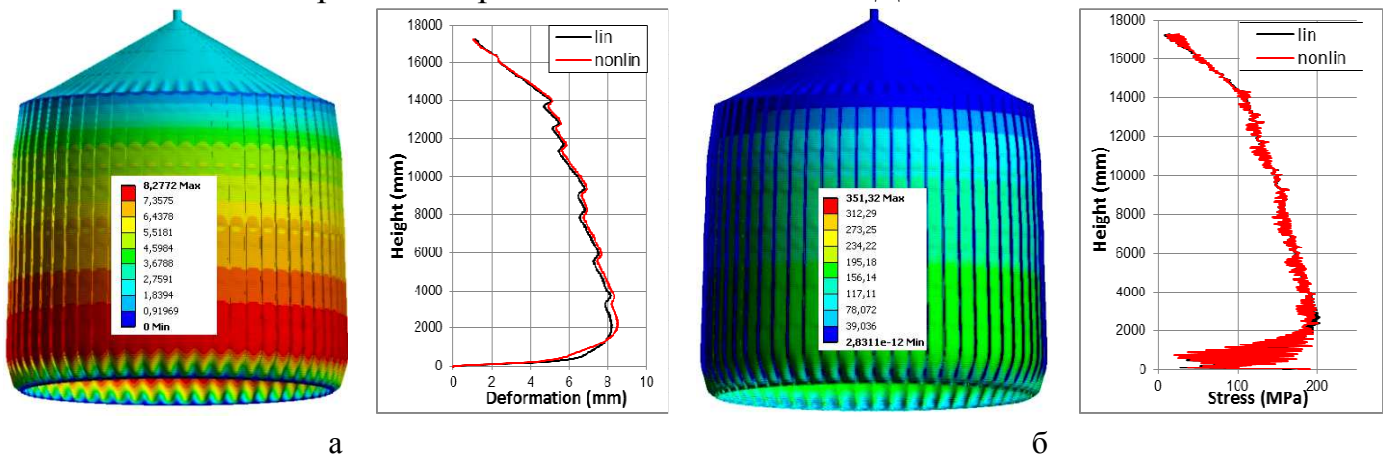


Рисунок 16 – Розподіл прогинів (а) та напружень за Мізесом, за висотою конструкції (б)

Проведено окреме дослідження впливу болтового з'єднання, на конструкційну міцність елементів тонкостінних конструкцій (рис. 17). Із конструкції зерносховища виділявся представницький елемент, на який за допомогою APDL-скрипта ANSYS передавалися крайові умови, отримані при дослідженні НДС всієї конструкції. Надалі визначається НДС у всіх важливих елементах: болт, ущільнювальна шайба і з'єднувальні листи в районі отворів, оцінюється їхня конструкційна міцність та фо-

рмуються відповідні рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних параметрів. У результаті розроблені рекомендації передані на підприємство ПАТ «КМЗ», що дають змогу удосконалити проектні параметри та технічні рішення.

На додаток досліджені конструкції фрагмента обшивки літака, автомобільних ресор, продемонстровано вплив окремих чинників на НДС. Підтверджено доцільність урахування всіх чинників в сукупності залежно від типу конструкції: зварної або з'єднаної болтовими чи іншими кріпленнями.

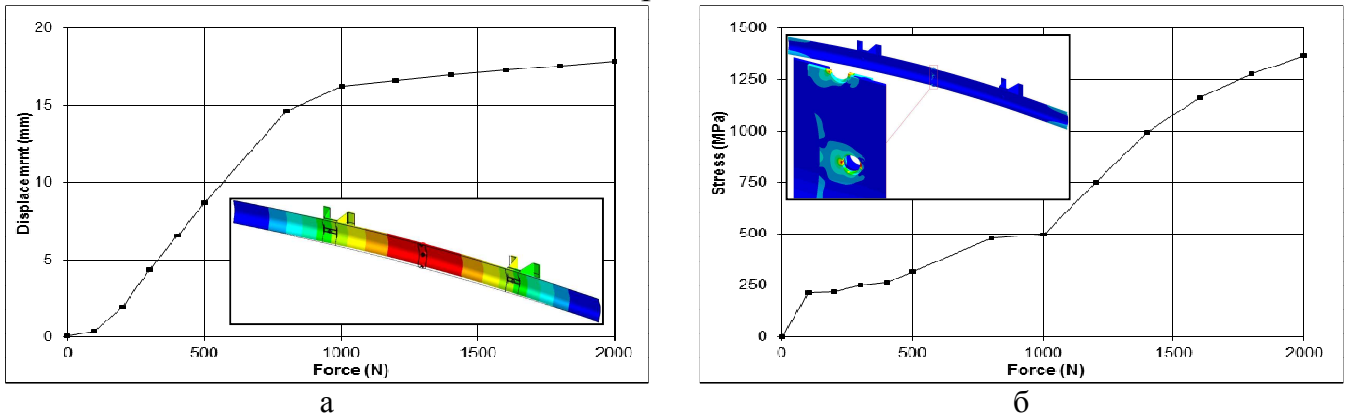


Рисунок 17 – Результати розрахунків виділеного сектора: а – стріла прогинів (мм); б – напруження за Мізесом (МПа)

У розділі 5 проведено співставлення теоретичних та експериментальних розрахункових оцінок прогинів зразків системи смуг з болтовим кріпленням, що за параметрами відповідають фрагментам панелей реальних силосів між вертикальними ребрами жорсткості (етап 3 згідно рис. 11). Для цього розроблена експериментальна установка (рис. 18).



Рисунок 18 – Експериментальна установка

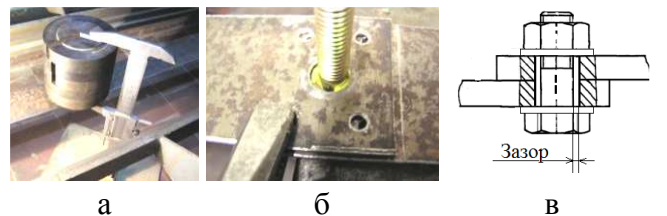


Рисунок 19 – Дослідження системи: а – навантаження мірними вантажами; б – вибраний зазор; в – компоновка болтового з'єднання

Дослідження поділялися на два етапи. У першому експерименті досліджувалася система смуг з болтовим з'єднанням і зазором, яка навантажувалася шляхом поступового додавання мірних вантажів (рис. 19), при цьому прогин фіксувався в центральній частині (рис. 20).

У другому експерименті навантаження системи здійснювалося у вигляді багатоциклового навантаження/розвантаження. Досліджувалося три види компоновань болтового з'єднання: з'єднання із зазором, з'єднання із ущільнювальною шайбою і з'єднання у вигляді послідовного набору смуг з ущільнювальною шайбою. Для вимірювання переміщень використовувався індикатор годинникового типу, зусилля вимірювалося за допомогою динамометра (рис. 21). Як результати отримано залежності прогинів від навантажень (рис. 22).

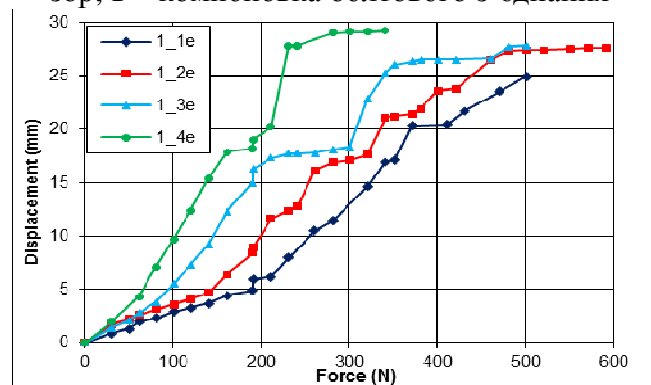


Рисунок 20 – Зафіксовані прогини (мм)

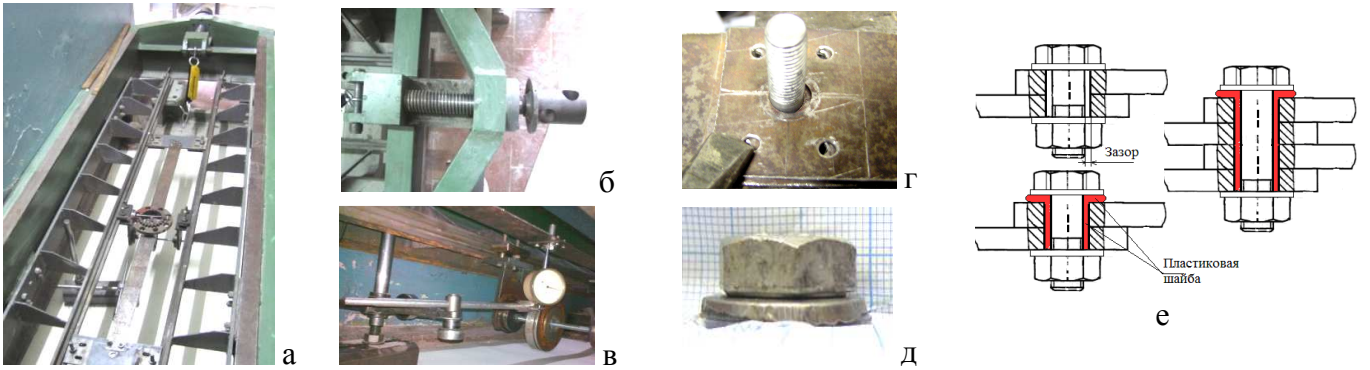


Рисунок 21 – Експериментальна установка (а, б) з вимірювальним обладнанням (в) і компоновкою болтових з'єднань (г, д, е)

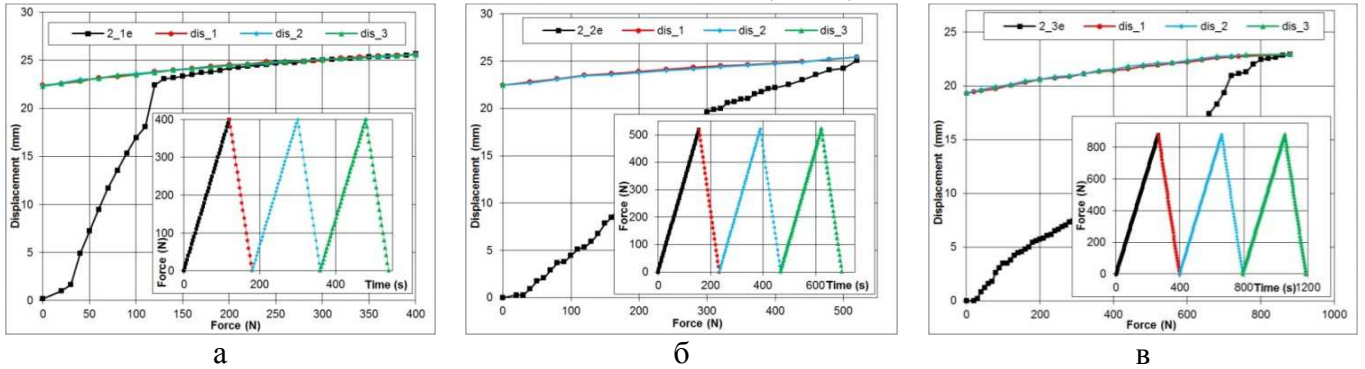


Рисунок 22 – Отримані прогини (мм): а – компоновка із зазором; б – компоновка із ущільнювальною шайбою; в – компоновка у вигляді послідовного набору смуг із ущільнювальною шайбою

При співставленні експериментальних та числових результатів якісна оцінка процесів збігається у функціональному плані, а для чисельних результатів відносна похибка не перевищує 12-15% (рис. 23).

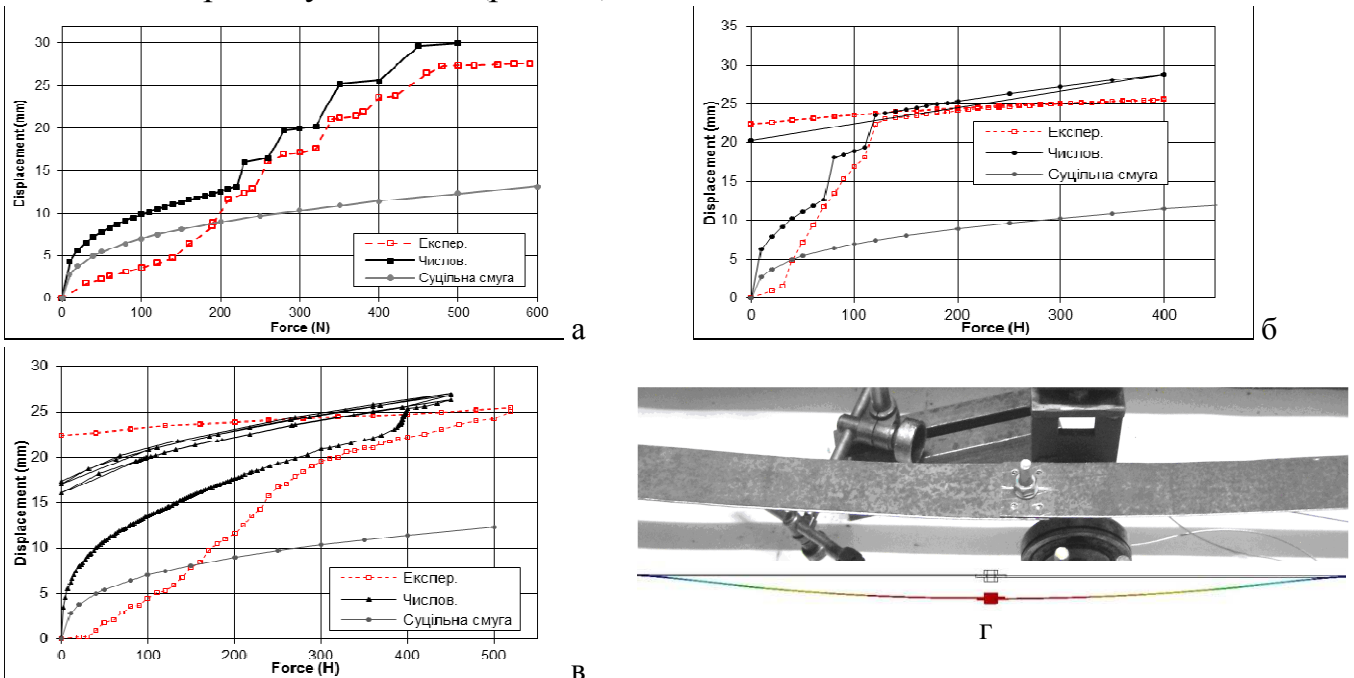


Рисунок 23 – Порівняння числових і експериментальних результатів: а – навантажування послідовними вантажами; б – циклічне навантаження, болтове з'єднання із зазором; в – циклічне навантаження, болтове з'єднання із зазором і ущільнювальною шайбою; г – експериментально зафіксовані прогини

Таким чином, у ході експериментальних досліджень продемонстрована достатня в якісному та кількісному плані адекватність запропонованих методів, достовірність і точ-

ність побудованих моделей та одержаних результатів числових досліджень тонкостінних складених конструкцій з урахуванням болтового з'єднання, а також підтверджені рекомендації, що наведені в роботі. Виявлена похибка становить близько 12-15%, а її вплив на загальний характер розподілу переміщень оцінюється як незначний.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-практичної задачі обґрунтування методів аналізу конструкційної міцності та моделей напружено-деформованого стану тонкостінних машинобудівних конструкцій із болтовим з'єднанням елементів. При цьому отримано такі наукові результати.

1. На основі аналізу стану питання здійснені висновки про доцільність оцінки конструкційної міцності з урахуванням контактної взаємодії, сил тертя, болтового з'єднання з зазором та ін., удосконалення існуючих методів визначення НДС елементів складених тонкостінних машинобудівних конструкцій. Виходячи з цього, розробка методів оцінки міцності та моделей НДС СТСК з урахуванням структурної, геометричної та фізичної нелінійностей обрано як напрями дисертаційних досліджень.

2. У роботі запропонований узагальнений підхід до розв'язання задачі про визначення НДС тонкостінних конструкцій в нелінійній постановці. При цьому враховується вся сукупність значущих чинників, що впливають на НДС тонкостінних машинобудівних конструкцій. Виконано розв'язання зв'язаної задачі про поздовжньо-поперечний вигин системи двох смуг (стержнів) у нелінійній постановці. Встановлено суттєвий вплив чинників геометричної, фізичної та структурної нелінійностей на НДС тонкостінних машинобудівних конструкцій.

3. На прикладі частинної задачі для двох з'єднаних болтовим кріпленням стержнів сформовані розв'язувальні співвідношення для розрахунку тонкостінних машинобудівних конструкцій. При цьому запропонована процедура осереднення поздовжньої сили, що діє в перерізі стержня. У результаті система зв'язаних диференціальних рівнянь приводиться до диференціального рівняння та інтегрального співвідношення. Проведено зіставлення результатів розв'язань із використанням різних методів на прикладі стрижневої системи, пластинчастих і оболонкових конструкцій. У запропонованій постановці були досліджені контактна взаємодія та урахування фізичної нелінійності поведінки матеріалів ущільнювальних елементів в болтовому з'єднанні. Також проведено аналіз урахування гофрування за різними моделями. На цій основі побудована математична модель для дослідження конструкційної міцності тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій із болтовим з'єднанням, що, на відміну від відомих, більш повна та адекватна.

4. Для розв'язання задачі про визначення НДС складеного стержня запропоновано модифікований метод ітераційного уточнення розв'язку із застосуванням параметра прискорення процесу. На прикладі розв'язання низки тестових задач визначено рекомендовані значення даного параметра за критерієм прискорення збіжності ітераційного процесу.

5. Для базового елемента СТСК у вигляді двох стержнів із болтовим з'єднанням установлено, що при багаторазовому навантаженні спостерігається не-

зворотність залежностей компонент НДС від параметра навантаження. При цьому для характерного віднульового циклу навантаження подібних конструкцій НДС природнім чином складається із двох частин: перша досягається при первинному навантаженні, а друга – практично повторюється при наступних циклах навантаження-розвантаження. Це суттєво прискорює розрахункові дослідження подібних конструкцій порівняно із традиційними підходами, коли вимагається багаторазове розв'язання послідовності нелінійних задач.

6. Вирішено низку прикладних задач моделювання НДС складених тонкостінних машинобудівних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів. Встановлено закономірності впливу урахування різних чинників на НДС досліджуваних тонкостінних машинобудівних конструкцій. Зокрема: рекомендується з'єднання смуг з послідовним чергуванням; позитивний вплив збільшеного зазору в поздовжньому напрямку; позитивний вплив тертя; згладжувальний вплив пластикової шайби; негативний вплив похибок монтажу; необхідність урахування гофрування. Для конструкцій металічних зерноскосовищ визначено проектно-технологічні параметри, що дають змогу утримати еквівалентні напруження в листах панелей на рівні до 300 МПа, прогини – 0,02 м. Розроблені також рекомендації щодо удосконалення цих конструкцій.

7. Експериментальні дослідження НДС зразків тонкостінних елементів (системи смуг) виконані на спеціально розроблених установках з метою верифікації результатів проведених чисельних розрахунків. Експериментально визначено характер поведінки системи смуг, з'єднаних болтовим кріпленням із зазором і застосуванням ущільнювальної шайби, навантажених рівномірно розподіленим по верхній кромці поперечним зусиллям і циклічним навантаженням у вигляді навантаження і розвантаження системи. Підтверджено якісну відповідність результатів числових і експериментальних досліджень зміни поперечних переміщень системи смуг при варіюванні компоновок болтового з'єднання і виду навантаження, що прикладається на систему (відхилення експериментальних від числових результатів не перевищує 12-15%).

8. Результати дисертаційних досліджень впроваджені в ході виконання низки бюджетних тем в НТУ «ХПІ», а також при виконанні господарських договорів та договорів про співпрацю з ПАТ «Карлівський машинобудівний завод». Отримано акти впровадження.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Атрошенко А.А. Обоснование расчетных моделей силосных установок / А.А. Атрошенко, В.Б. Третьяков, И.И. Иванцов, О.В. Веретельник // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 1(975). – С. 139 – 154.

*Здобувачем проведено обґрунтування розрахункових моделей елементів металевих зерноскосовищ.*

2. Атрошенко А.А. Численное исследование контактных задач для системы пластин, соединенных болтовым креплением в геометрически нелинейной постановке / А.А. Атрошенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №23 – С. 3-14.

3. Атрошенко А.А. Экспериментальное исследование системы пластин, соединенных болтовым крепежом / А.А. Атрошенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №14 – С. 105-112.
4. Атрошенко А.А. Анализ влияния геометрической нелинейности на решение задачи об изгибе полосы // А.А. Атрошенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №22 – С. 84-89.
5. Атрошенко А.А. Изгиб полосы с учетом больших перемещений и влияния продольных усилий / А.А. Атрошенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №29 – С. 3-13.
6. Атрошенко А.А. Экспериментальное исследование геометрически нелинейных задач на примере полос, соединенных болтовым крепежом / А.А. Атрошенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014 – № 1 – С. 3-10.
7. Атрошенко А.А. Численное исследование контактного взаимодействия многослойных панелей, соединенных болтовым крепежом, в геометрически нелинейной постановке / А.А. Атрошенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 31 – С. 3-11.
8. Атрошенко А.А. Экспериментальное исследование контактного взаимодействия сложнопрофильных шероховатых тел с учетом податливости / Н.Б. Скрипченко, Н.Н. Ткачук, А.А. Атрошенко, Н.А. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 34 – С. 124-130.  
*Здобувачем прийнято участь у проведенні експериментальних досліджень контактної взаємодії складнопрофільних шорстких тіл з урахуванням податливості.*
9. Атрошенко А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния гофрированных и сплошных панелей с учетом геометрической анизотропии и ортотропных свойств материала / А.А. Атрошенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 43 – С. 8-11.
10. Atroshenko O. A numerical analysis of non-linear contact tasks for the system of plates with a bolted connection and a clearance in the fixture / O. Atroshenko, M. Tkachuk, O. Ustipenko, O. Bondarenko, N. Diomina / Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків.: НПП ЧП «Технологічний Центр». – 2016. – С. 24 – 29.  
*Здобувачем проведено аналіз напружено-деформованого стану з'єднаних смуг за допомогою болтового кріплення і з урахуванням зазору в з'єднанні болт-отвір*
11. Атрошенко А.А. Анализ влияния монтажных погрешностей на прочностные и жесткостные характеристики элементов металлических зернохранилищ / А.А. Атрошенко, Н.А. Ткачук // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 3 – С. 100 – 108.  
*Здобувачем проведено аналіз впливу монтажних похибок на міцність і жорсткісні характеристики елементів металевих зернохранилищ*
12. Атрошенко А.А. Обоснование расчетных моделей элементов металлических емкостей для хранения зернопродуктов / А.А. Атрошенко, В.Б. Третьяков, И.И. Иванцов, О.В. Веретельник // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІ Міжнародної науково-практичної конфе-

ренції, Ч.І – Харків, НТУ «ХПІ», 2013. – С. 177.

*Здобувачем проведено обґрунтування розрахункових моделей елементів металевих зерносховищ.*

13. Атрошенко А.А. Анализ прочности и собственных частот колебаний тонкостенных конструкций: подходы, методы, модели / А.Ю. Танченко, П.В. Чурбанов, Н.А. Ткачук, А.А. Атрошенко // Азовмаш – 2013: Тези доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції молодих спеціалістів – Маріуполь, ОАО «Азовмаш», 2013. – С. 19.

*Здобувачем проведено аналіз міцності тонкостінних конструкцій.*

14. Атрошенко А.А. Экспериментальное исследование системы пластин, соединенных болтовым крепежом / А.А. Атрошенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХПІ», 2014. – С. 180.

15. Атрошенко А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния гофрированной и сплошной пластинок с учетом геометрической анизотропии и ортотропных свойств материала / А.А. Атрошенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХПІ», 2015. – С. 145.

16. Атрошенко А.А. Изгиб полосы с учетом геометрической нелинейности и определением влияния продольных усилий / А.А. Атрошенко, Н.А. Ткачук. // «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии»: Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції – Харків, НТУ «ХПІ», 2015. – С. 5-9.

*Здобувачем проведено аналіз вигину смуги з урахуванням геометричної нелінійності і визначенням впливу поздовжніх зусиль.*

## АНОТАЦІЇ

**Атрошенко О.О. Аналіз конструкційної міцності складених тонкостінних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертація присвячена розробці підходів, методів і моделей для дослідження конструкційної міцності складених тонкостінних машинобудівних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів. У роботі розв'язана задача аналізу напружено-деформованого стану складених тонкостінних машинобудівних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів, а також його реалізація і визначення закономірностей розподілу прогинів, зміщень і поздовжніх зусиль. Також в даній постановці урахувувались наступні важливі чинники: зазор у болтовому з'єднанні, сили тертя між контактуючими поверхнями, попереднє затягуванням болтових з'єднань, наявністю полімерних матеріалів, а також урахування гофрованої форми застосованих панелей.

На основі математичних моделей напружено-деформованого стану оболонкових, стрижневих та пластинчатих конструкцій, в роботі розроблена математична модель, яка

ураховує вплив поздовжніх сил і геометричної нелінійності в цілому на НДС складених тонкостінних конструкцій. Отримані результати розв'язання низки прикладних задач. Установленні закономірності зміни напружено-деформованого стану тонкостінних машинобудівних конструкцій при варіюванні проектно-технологічних параметрів.

*Ключові слова:* прикладна теорія пружності, тонкостінні конструкції, напружено-деформований стан, конструкційна міцність, складений стержень, вигин, болтове з'єднання, метод скінченних різниць, метод скінченних елементів, експеримент, силос, циліндричні бункери.

**Атрошенко А.А. Анализ конструкционной прочности составных тонкостенных конструкций с болтовым соединением элементов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке подходов, методов и моделей для исследования конструкционной прочности составных тонкостенных машиностроительных конструкций с болтовым соединением элементов. В работе решена задача анализа напряженно-деформированного состояния составных тонкостенных машиностроительных конструкций с болтовым соединением элементов, а также его реализация и определение закономерностей распределения прогибов, смещений и продольных усилий. Также в данной постановке учитывались следующие важные факторы: зазор в болтовых соединениях, силы трения между контактирующими поверхностями, предварительная затяжка болтовых соединений, наличие уплотнительных шайб состоящих из полимерных материалов, а также учета гофрированной формы применяемых панелей.

На основе математических моделей напряженно-деформированного состояния оболочечных, стержневых и пластинчатых конструкций в работе разработана математическая модель, которая учитывает влияние продольных сил и геометрической нелинейности в целом на НДС составленных тонкостенных конструкций. При этом предложена процедура осреднения продольных усилий, действующей в сечении стержня. В результате система связанных дифференциальных уравнения преобразуется к дифференциальному уравнению и интегральному соотношению. Для решения задачи об определении НДС составного стержня выбран метод конечных разностей. Предложен модифицированный метод итерационного уточнения решения с применением параметра ускорения процесса. На примере решения ряда тестовых задач определены рекомендуемые значения данного параметра по критерию ускорения сходимости итерационного процесса. Проведено сопоставление результатов решений с использованием различных методов на примере стержневой системы, пластинчатых и оболочечных конструкций. В предлагаемой постановке были учтены контактное взаимодействие, физическая нелинейность поведения материалов уплотнительных элементов в болтовых соединениях.

Также установлено, что при многократном нагружении исследуемой системы полос наблюдается необратимость зависимостей компонент НДС от параметра нагрузки. При этом для характерного отнулевого цикла нагрузки подобных конструкций НДС состоит

из двух частей: первая достигается при первичном нагружении, а вторая – практически повторяется при последующих циклах нагружения/разгрузки.

Получены результаты решения ряда прикладных задач. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций на примере металлических бункеров при варьировании проектно-технологических параметров.

Экспериментально определен характер поведения системы полос, соединенных болтовым крепежом с зазором, нагруженных равномерно по верхней кромке поперечным циклическим усилием. Проведено сравнение полученных численных результатов исследований с полученными экспериментальными данными. Подтверждено качественное и количественное соответствие результатов численных и экспериментальных исследований изменения прогибов системы полос.

*Ключевые слова:* прикладная теория упругости, тонкостенные конструкции, напряженно-деформированное состояние, конструкционная прочность, составной стержень, изгиб, болтовое соединение, метод конечных разностей, метод конечных элементов, эксперимент, силос, цилиндрические бункеры.

**Atroshenko O. Structural strength analysis of the compound thin-walled structures with joint elements.** – With manuscript rights.

Thesis for the degree of Candidate of technical Sciences in specialty 05.02.09 – dynamics and strength of machines. National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the development of approaches, methods and models to study structural strength of composite thin-walled engineering structures with bolted elements. This work solves the problem of analysis of the stress-strain state of composite thin-walled engineering structures with bolted elements, as well as its implementation and determination of the distribution of deflections, displacements and longitudinal efforts. Also in this formulation the following important factors were taken into account: the gap in bolted joints, friction force between the contacting surfaces, the pre-tightening of bolted connections, the presence of polymeric materials, as well as consideration of the corrugated shape of panels used.

On the basis of mathematical models of the stress-strain state of the shell, the rod and plate structures, a mathematical model that takes into consideration the influence of axial forces and geometric nonlinearity in general on stress-strain state of composed thin-walled structures was elaborated in this thesis. The results of solving some applied problems were obtained. The regularities of changes of stress-strain state of thin-walled engineering structures at variation of design and process parameters were defined.

*Keywords:* applied theory of elasticity, thin-walled construction, stress-strain state, structural strength, compound rod, bend, bolt connection, the finite difference method, finite element modelling, experiment, silos, cylindrical tanks.



Відповідальний за випуск  
к.т.н., доц. кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП»  
Ларін О.О.

Підписано до друку 17.05.2016 р.  
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.  
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 65

---

Надруковано в друкарні ФО-П Дуюнова Т.В.  
63023, м. Харків, вул. Весніна, 12.  
Тел. (057) 717-28-80  
e-mail: promart\_order@ukr.net

---