

УДК 539.3: 004.94

*О.О. АТРОШЕНКО, Н. Б. СКРІПЧЕНКО, Ю.В. ТАРАН, А.Л. ФАЛЬКО, Ю.І. МАТВІЄНКО***АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ СКЛАДЕНИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ З БОЛТОВИМ З'ЄДНАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ**

Стаття присвячена розробці підходів, методів і моделей для дослідження конструкційної міцності складених тонкостінних машинобудівних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів. Розв'язана задача аналізу напружено-деформованого стану (НДС) складених тонкостінних машинобудівних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів, а також програмна реалізація і визначення закономірностей розподілу прогинів, зміщень і поздовжніх зусиль. В даній постановці урахувались наступні важливі чинники: зазор у болтовому з'єднанні, сили тертя між контактуючими поверхнями, попереднє затягування болтових з'єднань, наявність полімерних матеріалів, а також урахування гофрованої форми застосованих панелей. На основі математичних моделей напружено-деформованого стану оболонкових, стержневих та пластинчатих конструкцій розроблена математична модель, яка урахує вплив поздовжніх сил і геометричної нелінійності в цілому на НДС складених тонкостінних конструкцій. Отримані результати розв'язання низки прикладних задач. Установлені 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

Работа 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 предлагаемой постановке были учтены контактные уравнения преобразуется к дифференциальному уравнению и интегральному соотношению. 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.

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 is 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

Вступ. 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 [1-5]. Це свідчить про доцільність перегляду вихідних постановок вирішуваних задач і коригування множини значущих чинників, що впливають на конструкційну міцність досліджуваних тонкостінних машинобудівних

© Атрошенко О.О., Скрипченко Н. Б., Таран Ю.В.,
Фалько А.Л., Матвієнко Ю.І., 2016

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 [6, 7]. 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 дослідження.

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.

У роботі використовуються методи скінченних різниць (МСР) і методи скінченних елементів (МСЕ) для моделювання НДС складених тонкостінних машинобудівних конструкцій; методи твердотілого 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.

Аналіз методів розрахунку складених тонкостінних конструкцій

Різним аспектам розрахунку складених тонкостінних конструкцій (СТСК) 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. Воробійов, 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. Шуліков, 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. Gonçalves, R.T. Leonb та інші. Для розв'язання виникаючих задач застосовуються різні аналітичні, числові та експериментальні методи [5-7]. 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 також його реалізація і визначення закономірностей розподілу прогинів, зміщень і поздовжніх зусиль на основі створення програмного комплексу прикладних розрахунків НДС елементів СТСК обрано як напрямок досліджень.

Математичне моделювання напружено-деформованого стану елементів складених тонкостінних конструкцій із болтовим з'єднанням

Маємо математичні моделі визначення НДС тонкостінних конструкцій в лінійних і геометрично нелінійних постановках типу [8-11]:

– стержні

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

– пластини

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

– поліг оболонки

$$\begin{cases} D \nabla^2 \nabla^2 w = \nabla_k^2 \psi + L(w, \psi) + q; \\ \frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \psi = -\nabla_k^2 w - \frac{1}{2} L(w, w), \end{cases} \quad (3)$$

де w – прогини тонкостінних елементів;
 E – модуль пружності матеріалу;
 I – момент інерції поперечного перерізу стержня;
 h – товщина оболонки або пластины;
 q – поперечне навантаження;
 ∇^2 – оператор Лапласа;
 ψ – 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;

$$L(w, \psi) = \partial^2 w / \partial x_1^2 \partial^2 \psi / \partial x_2^2 + \partial^2 w / \partial x_2^2 \partial^2 \psi / \partial x_1^2 - 2 \partial^2 w / \partial x_1 \partial x_2 \cdot \partial^2 \psi / \partial x_1 \partial x_2 .$$

Моделі (1–3) 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).

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

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} - z \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \quad \text{запропонована процедура}$$

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 ($EI = const$):

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

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

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

$$P_*(w) = ES \frac{1}{2l} \int_0^l (w')^2 dx.$$

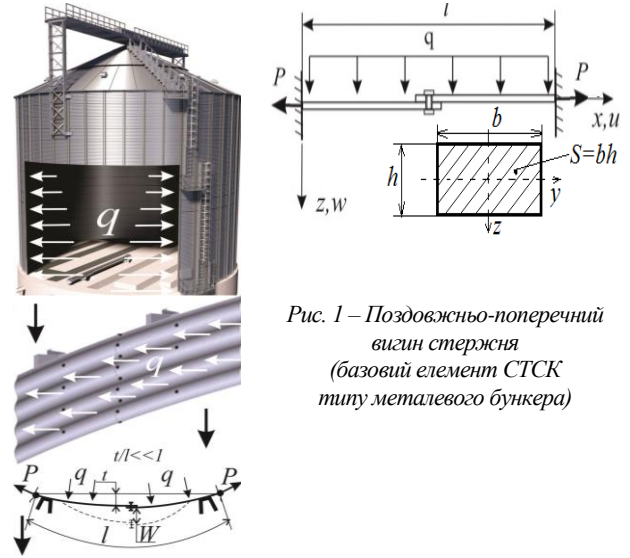


Рис. 1 – Поздовжньо-поперечний вигин стержня (базовий елемент СТСК типу металевого бункера)

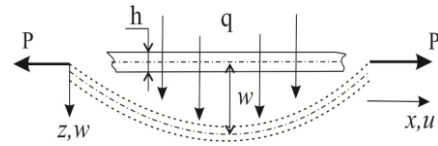


Рис. 2 – Тонкостінний елемент при поздовжньо-поперечному вигині

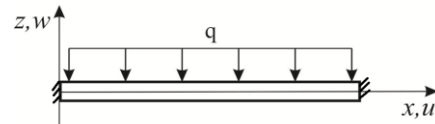


Рис. 3 – Схема навантаження стержня

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 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_* :

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

Матриці M_1 і M_2 в (7) описують скінченно-різницевою диференціювання в (5) відповідно 4-го і 2-го порядків, Q – вектор вузлових навантажень, а

інтегральний вираз в (6) замінюється формулою прямокутників в (7), i – номер вузлів різничевої схеми. Основна нелінійність в (7) зосереджена у залежності $P_* = P_*(W)$.

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

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

де $a)$ – розв'язання лінійної задачі для визначення прогину для поточного значення вузлових навантажень 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 поздовжнього зусилля (модифікація із введенням ω); $g)$ – перевірка умов закінчення ітераційного процесу; $h)$ – визначення величини проковзування складеного стержня.

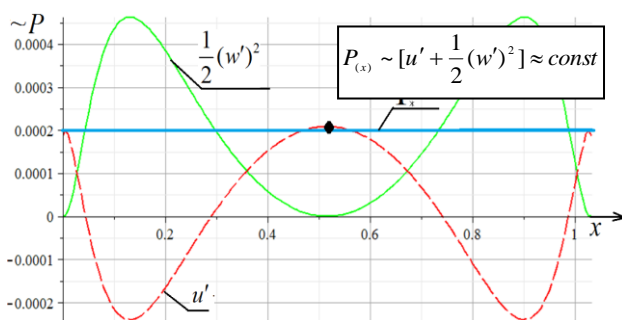


Рис. 4 – Визначення поздовжньої сили P_*

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

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. МСР реалізований у власному програмному коді, що дає змогу досліджувати усі процеси розв'язання.

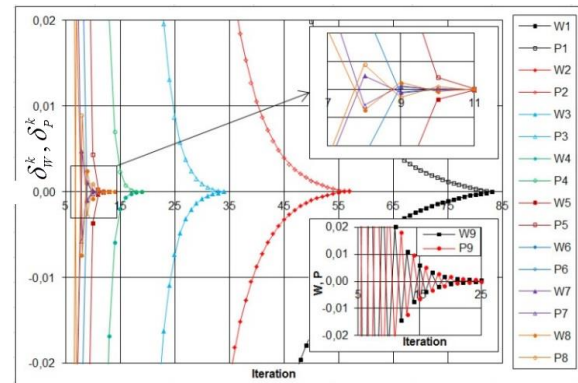


Рисунок 5 – Процес наближення розв'язку (відносних величин δ_W^k, δ_P^k) залежно від кількості ітерацій

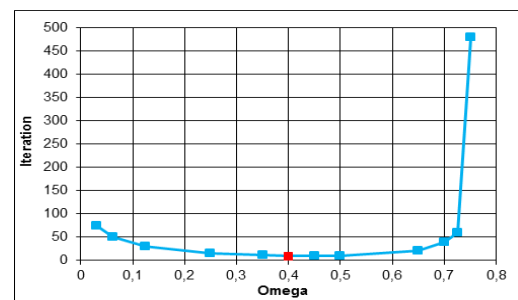


Рис. 6 – Графік залежності необхідної кількості ітерацій для розв'язання нелінійної системи рівнянь від параметра ω

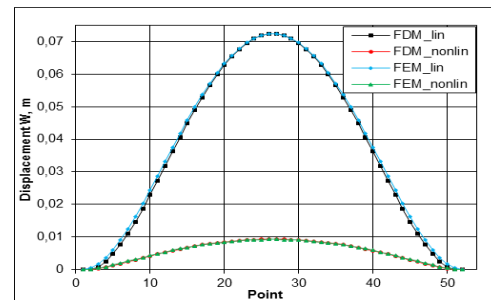


Рис. 7 – Розподіл прогинів W , обчислений МСР та МСЕ з урахуванням і без урахування геометричної нелінійності

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 Δl – поздовжнє зміщення стержнів один відносно іншого внаслідок проковзування із номінального положення (рис. 8). Зв'язок між τ та силою P_* визначається законом Кулона :

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

де μ – коефіцієнт тертя, N – сила попереднього затягування болта. Перша частина співвідношень (9) описує стан зчеплення двох стержнів під дією тертя, друга – відносного проковзування.

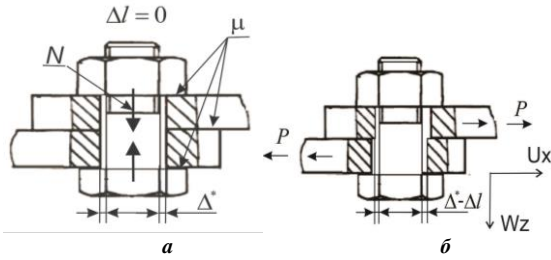


Рисунок 8 – Повздовжнє проковзування стержнів: а – номінальне положення; б – поточне положення

Якщо позначити через $\tau^* = \Delta^*/l$, де Δ^* – 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):

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

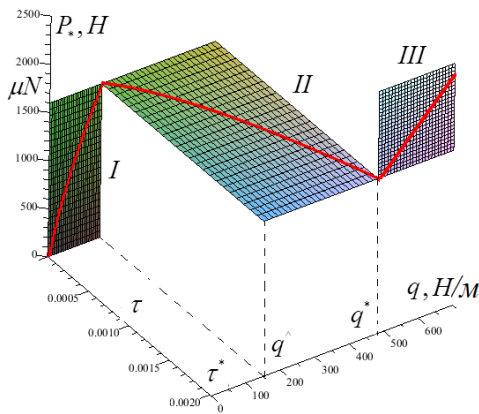


Рис. 9 – Залежність $P(q)$

У (10) I – відповідає навантаженню від номінального положення (див. рис. 8, а) при $q=0$ до величини $q = q^{\wedge}$, 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 Δ^* при $q = q^*$, стержні працюють як єдине ціле.

У просторі (τ, q, P_*) при монотонному навантаженні крива $L: [P_* = P_*(q), \tau = \tau(q)]$ розташовується по чергову у площинах $\tau=0$ (етап I), $P_* = \mu N$ (етап II), $\tau = \tau^*$ (етап III), тобто параметри P_*, τ змінюються з ростом q по чергову. 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_*, τ покроково (модифікації: в (8, а) – приріст ΔQ , а в (8, б) – зміна Δl).

Для багатьох конструкцій типу металічних зерносовищ 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 рис. 10 представлені характерні криві M, L для симетричного та віднульового циклів навантаження. 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_* 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 зерносовищ 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'єднанням, 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.

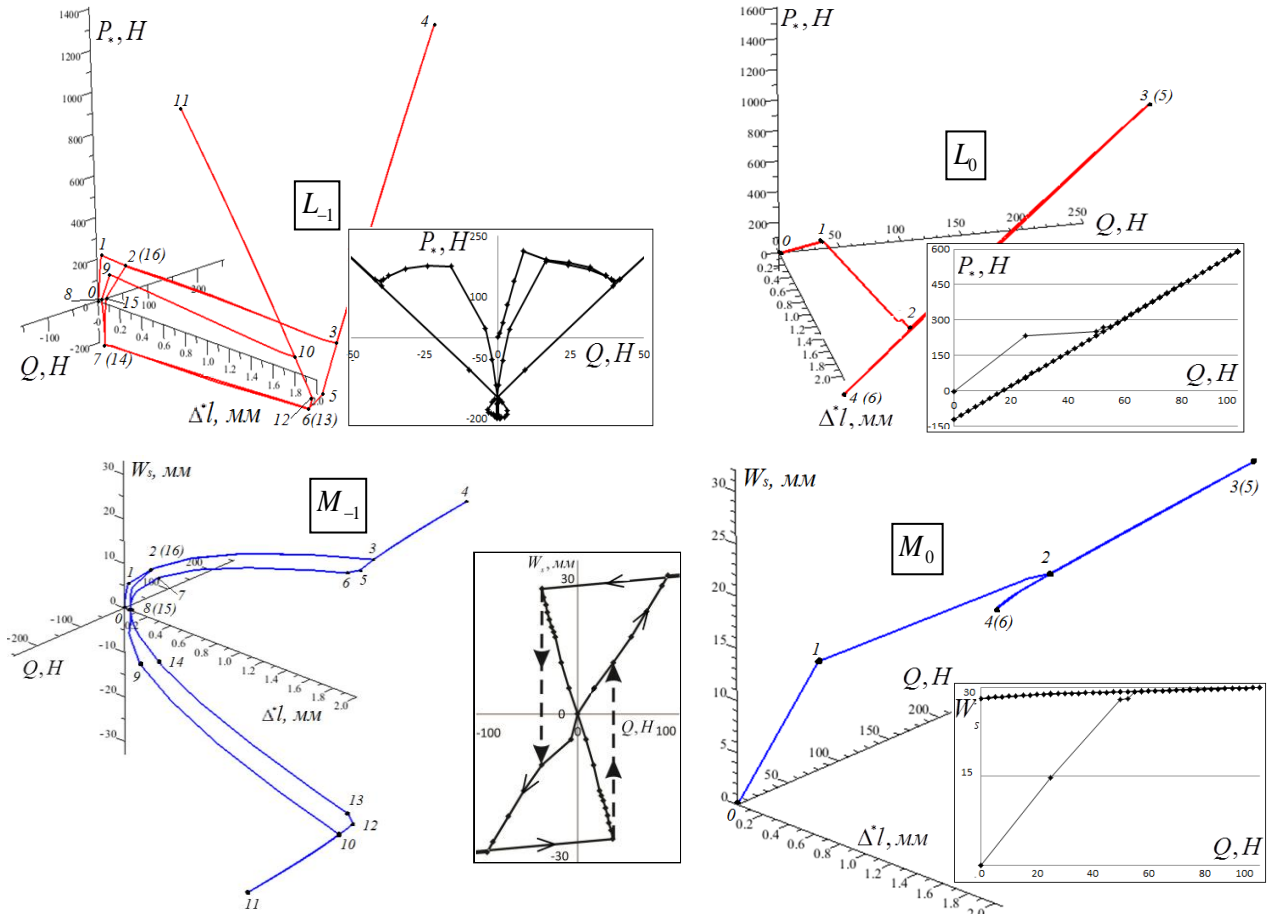


Рис. 10 – Залежності між прогинами, проковзування та поздовжнього зусилля (просторові лінії M, L) при різних циклах навантаження (r = -1 – симетричний: q = q_{max} → q_{min} → 0 → ...; r = 0 – віднульовий: q = q_{max} → 0 → ...)

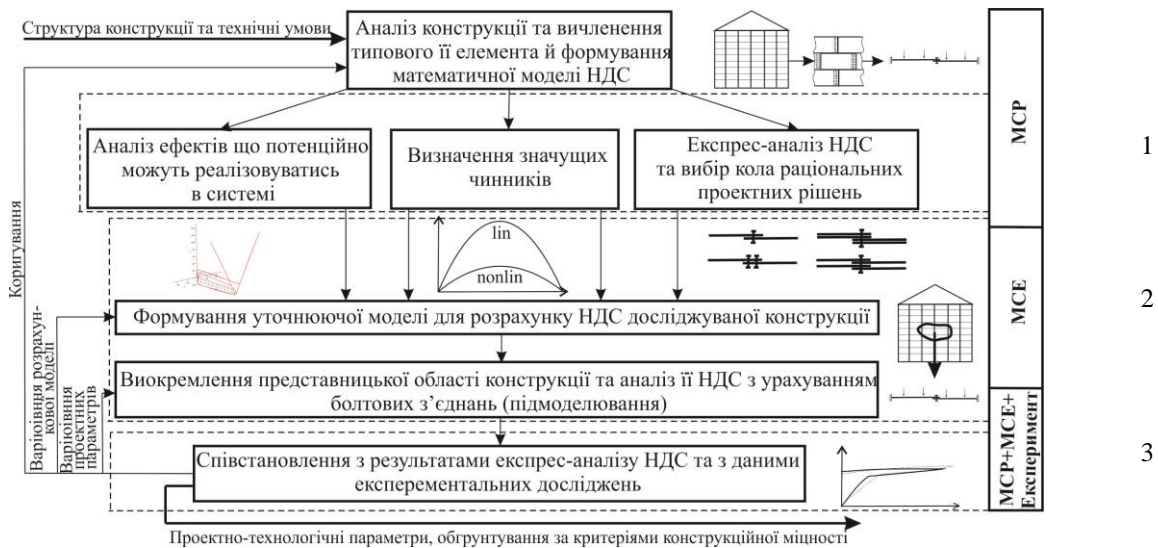


Рис. 11 – Структура досліджень НДС складених тонкостінних конструкцій

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".

Між різними етапами досліджень налагоджується система зворотних 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 "переналаджувати" на ті чи інші машинобудівні тонкостінні конструкції. Таким чином, реалізований перший етап досліджень (див. рис. 11).

Чисельна реалізація пропонованих підходів та моделей напружено-деформованого стану тонкостінних машинобудівних конструкцій

У роботі 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.

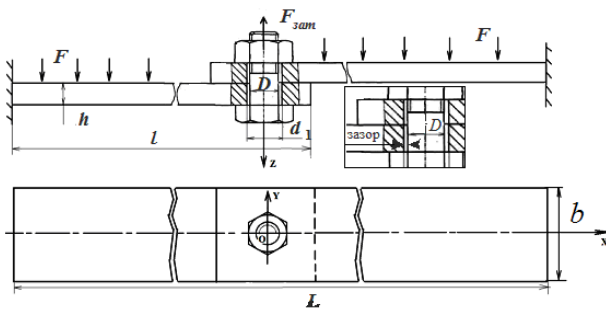


Рис. 12 – Система смуг з болтовим кріпленням

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).

Виявлено відчутне різке зростання зусиль розтягування в тілах болтів порівняно із початковим їх рівнем, що в інших дослідженнях раніше не фіксувалося. Показано, 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 навантаження, а при повторних – досить точно повторює свою поведінку (див. рис. 13).

Знайдено значний вплив зазору між болтом і отворами на НДС системи (рис. 14). Встановлено особливості впливу тертя і наявності пластикової шайби з нелінійного матеріалу типу Муни-Рівліна (властивості матеріалу поліетилену визначено із публікацій інших дослідників) [5-7]. У тому, що стосується пластикової шайби, маємо "згладжування" всіх характеристик і картин НДС.

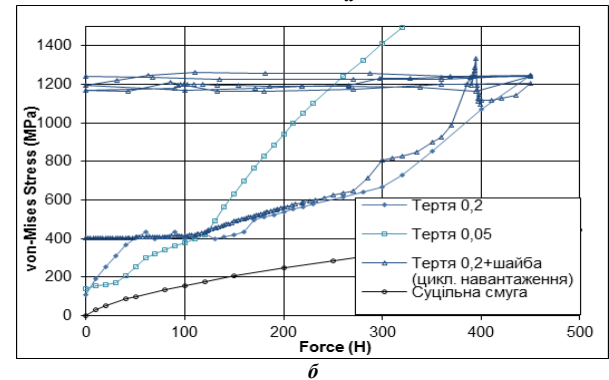
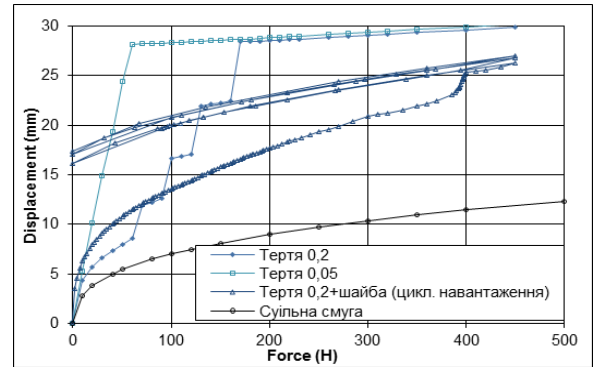


Рис. 13 – Картини НДС складених тонкостінних конструкцій залежно від навантаження:

а – стріла прогинів (мм); б – максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа)

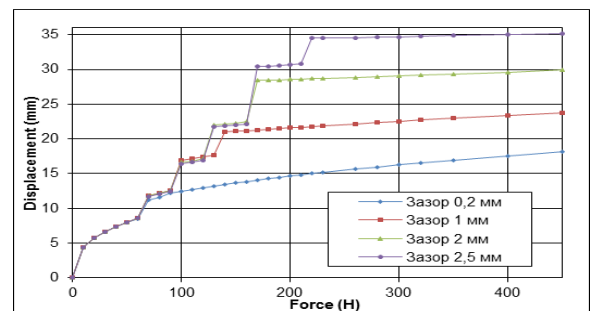


Рис. 14 – Стріла прогинів складеної смуги з варіюванням зазору Δ^* в з'єднанні (мм)

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.

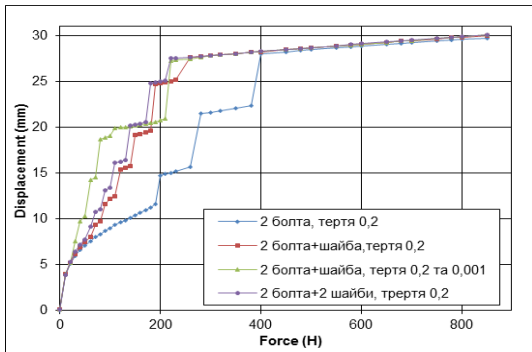


Рис. 15 – Стріла прогинів складеної смуги з різною кількістю болтів (мм)

Розв'язання прикладних задач

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.

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 формуються відповідні рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних параметрів. У результаті розроблені рекомендації передані на машинобудівні підприємства 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.

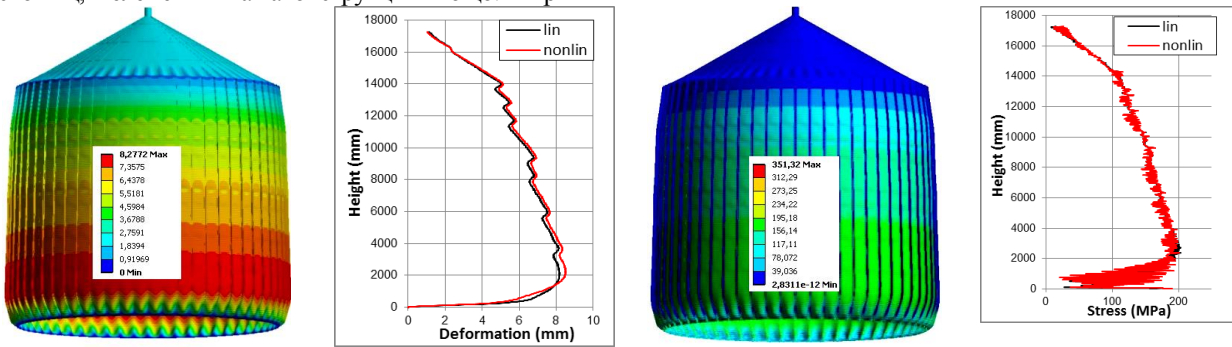


Рис. 16 – Картини НДС складених тонкостінних конструкцій за висотою конструкції: а – розподіл прогинів; б – напружень за Мізесом

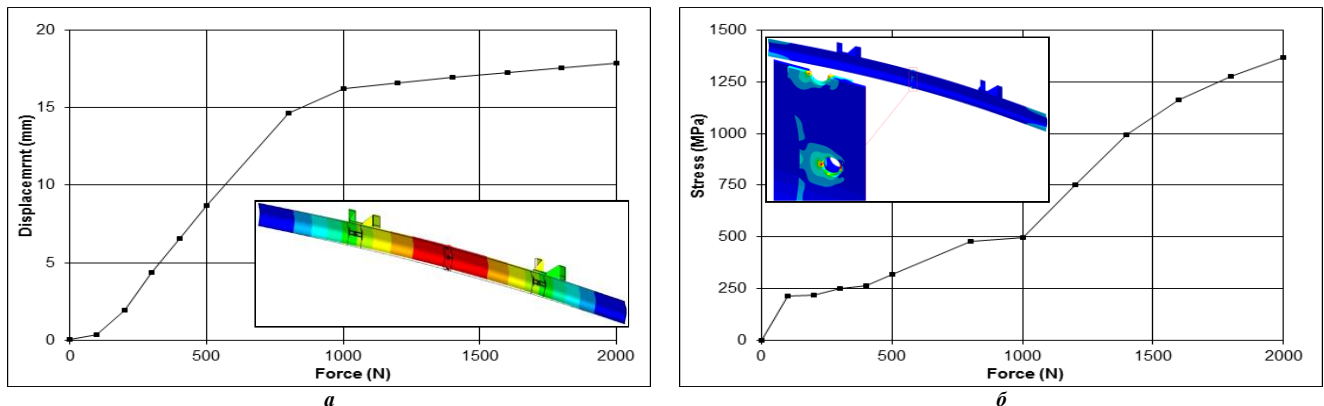


Рис. 17 – Результати розрахунків виділеного сектора: а – стріла прогинів (мм); б – напруження за Мізесом (МПа)

Експериментальне дослідження

У роботі 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).

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).



Рис. 18 – Експериментальна установка

У другому експерименті навантаження системи здійснювалося у вигляді багатоциклового навантаження/розвантаження. Досліджувалося три види компоновки 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).

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).

Таким чином, у ході експериментальних

досліджень продемонстрована достатня в якісному та кількісному плані адекватність запропонованих методів, достовірність і точність 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.

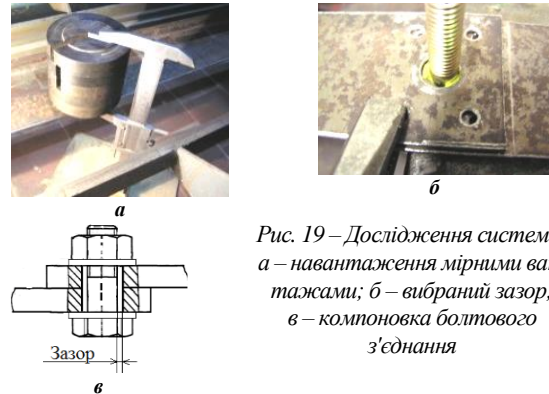


Рис. 19 – Дослідження системи: а – навантаження мірними вантажами; б – вибраний зазор; в – компоновка болтового з'єднання

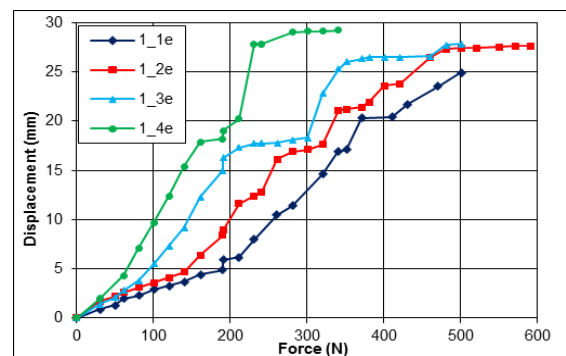


Рис. 20 – Зафіксовані прогини (мм)

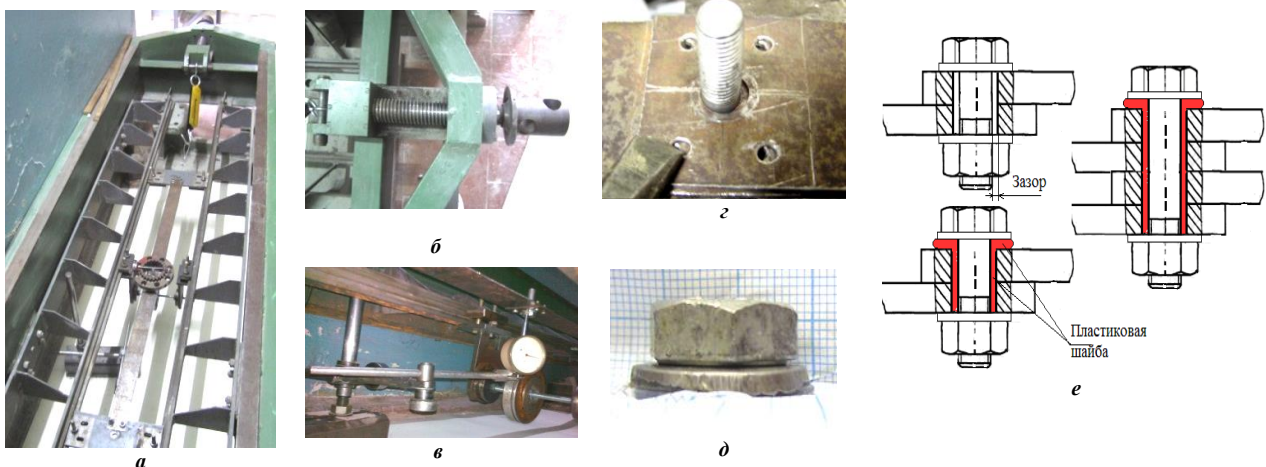


Рис. 21 – Експериментальна установка: а, б – загальний вигляд; в – з вимірювальним обладнанням; г, д, е – різні компоновки болтових з'єднань

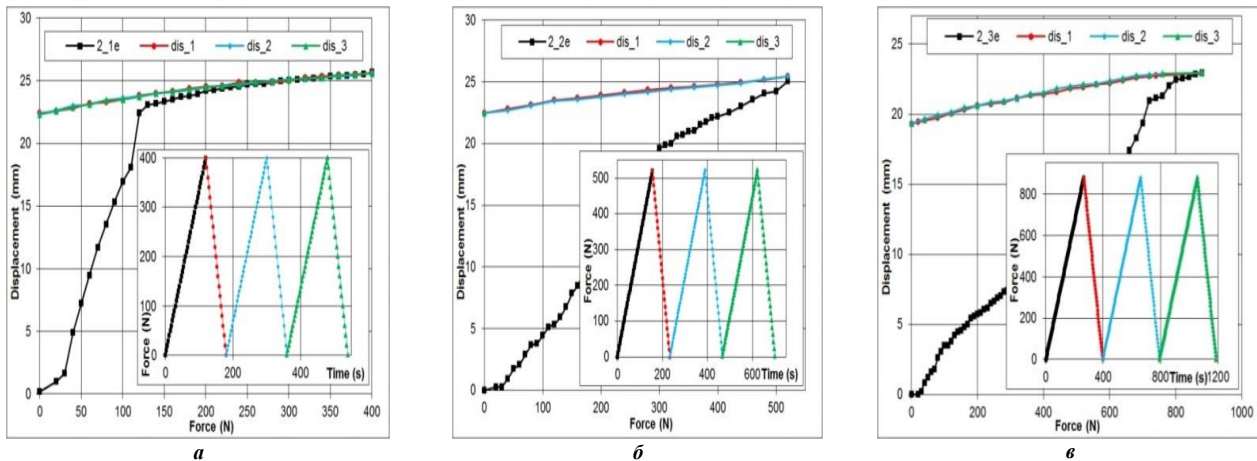


Рис. 22 – Отримані прогини (мм):

a – компоновка із зазором; *б* – компоновка із уцілювальною шайбою;
в – компоновка у вигляді послідовного набору смуг із уцілювальною шайбою

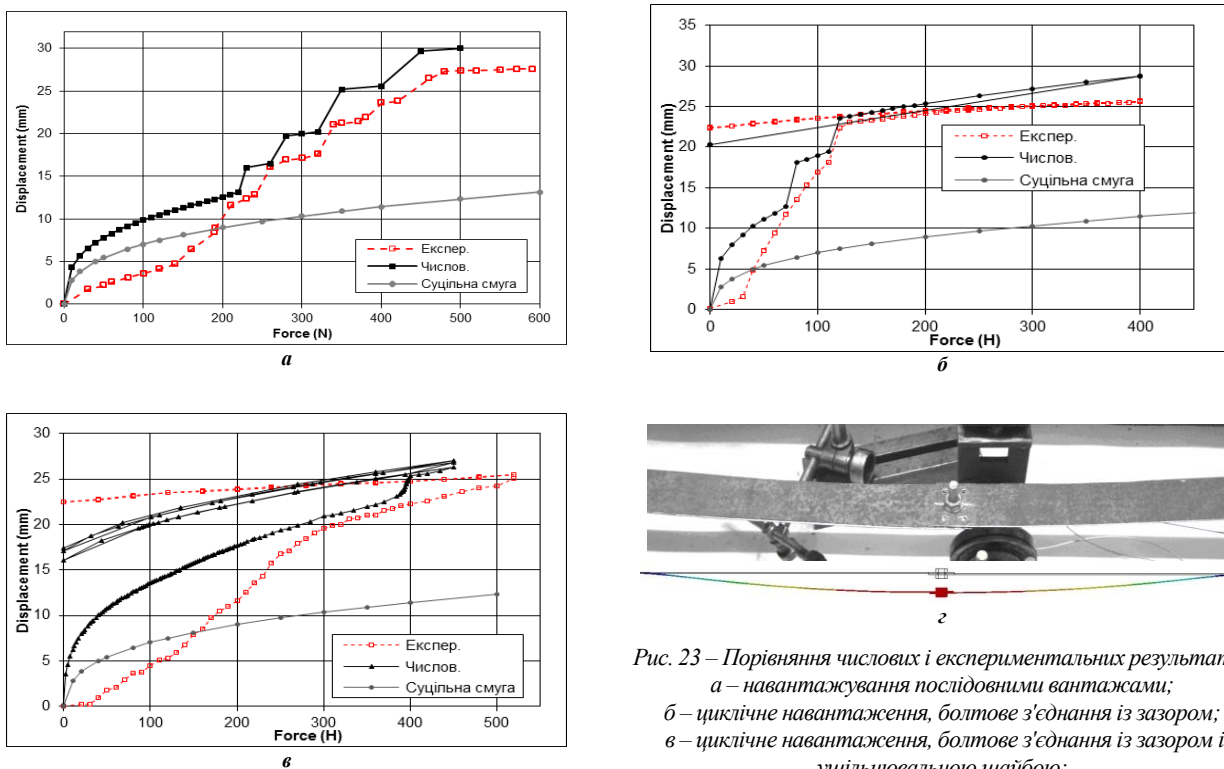


Рис. 23 – Порівняння числових і експериментальних результатів:

a – навантаження послідовними вантажами;
б – циклічне навантаження, болтве з'єднання із зазором;
в – циклічне навантаження, болтве з'єднання із зазором і уцілювальною шайбою;
з – експериментально зафіксовані прогини

Висновки

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. У роботі запропонований узагальнений підхід до розв'язання задачі про визначення напружено-деформованого стану 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 напружено-деформований стан тонкостінних машинобудівних конструкцій.

2. 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.

3. Для розв'язання задачі про визначення напружено-деформованого стану 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.

4. Для базового елемента СТСК у вигляді двох стержнів із болтовим з'єднанням встановлено, що при багаторазовому навантаженні спостерігається незворотність залежностей компонент напружено-деформованого стану від параметра навантаження. При цьому для характерного віднульового циклу навантаження подібних конструкцій напружено-деформований стан природним 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.

5. Розв'язано низку прикладних задач моделювання напружено-деформованого стану складених тонкостінних машинобудівних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів. Встановлено закономірності впливу урахування різних чинників на напружено-деформований стан 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 зернохловищ 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.

6. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану 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.

7. 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%).

Список літератури

1. **Атрошенко А.А.** Исследование напряженно-деформированного состояния гофрированных и сплошных панелей с учетом геометрической анизотропии и ортотропных свойств материала / **А.А. Атрошенко** // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 43 – С. 8-11.
2. **Атрошенко О.** A numerical analysis of non-linear contact tasks for the system of plates with a bolted connection and a clearance in the fixture / **О. Атрошенко, М. Ткачук, О. Устиненко, О. Bondarenko, N. Diomina** / Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: НПП ЧП "Технологічний Центр", 2016. – С. 24 – 29.
3. **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.
4. **EN 1991-1-4.** 2005. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1–4: General Actions – Wind Actions. Brussels, CEN.
5. **Yongjiu Shi** Analysis on Shear Behavior of High-Strength Bolts Connection / **Yongjiu Shi, Meng Wang, Yuanqing Wang** // International Journal of Steel Structures. 2011. – 11 (2), 203-213.
6. **Gan Tang** Finite Element Analysis and Experimental Research on Mechanical Performance of Bolt Connections of Corrugated Steel Plates / **Gan Tang, Lingfeng Yin, Xiaoming Guo, Jin Cui** // International Journal of Steel Structures. 2015.– 15(1), 193-204.
7. **Fan L.** Finite element modeling of single lap screw connections in steel sheeting under static shear / **Fan L., Rondal J., Cescotto S.** // Thin-Walled Structure. – 1997. – 27(2). – P. 165- 185.
8. **Васидзу, К.** Вариационные методы в теории упругости и пластичности. Пер. с англ. / **К. Васидзу** – М.: Мир, 1987. – 542 с.
9. **Филиппов А.П.** Численные методы в прикладной теории упругости. / **А.П. Филиппов, В.И. Булгаков, Ю.С. Воробьев, Б.Я. Кантор, Г.А. Марченко.** – К.: Наукова думка, 1968. – 252 с.
10. **Бидерман В.Л.** Механика тонкостенных конструкций. Статика. / **В.Л. Бидерман.** – М.: Машиностроение, 1977. – 488 с.
11. **Биргер И.А.** Расчет на прочность деталей машин / **И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич.** – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Атрошенко А.А.** Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija gofirovannyh i sploshnyh panelej s uchetom geometricheskoj anizotropii i ortotropnyh svojstv materiala / **А.А. Атрошенко** // Visnik NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2015. – No 43. – P. 8-11.
2. **Атрошенко О.** A numerical analysis of non-linear contact tasks for the system of plates with a bolted connection and a clearance in the fixture / **О. Атрошенко, М. Ткачук, О. Устиненко, О. Bondarenko, N. Diomina** / Shidno-Єvrops'kij zhurnal peredovih tehnologij. – Kharkiv: NPP ChP "Tehnologichnij Centr", 2016. – P. 24 – 29.
3. **Атрошенко А.А.** Analiz vlijanija montazhnyh pogreshnostej na prochnostnye i zhestkostnye harakteristiki jelementov metallicheskih zernohranilishh / **А.А. Атрошенко,**

N.A. Tkachuk // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. – Belgorod: BGTU im. V.G. Shuhova, 2016. – No 3 – P. 100 – 108.

4. **EN 1991-1-4**, 2005. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1– 4: General Actions – Wind Actions. Brussels, CEN.

5. **Yongjiu Shi** Analysis on Shear Behavior of High-Strength Bolts Connection / **Yongjiu Shi, Meng Wang, Yuanqing Wang** // International Journal of Steel Structures. 2011. – 11 (2), 203-213.

6. **Gan Tang** Finite Element Analysis and Experimental Research on Mechanical Performance of Bolt Connections of Corrugated Steel Plates / **Gan Tang, Lingfeng Yin, Xiaoming Guo, Jin Cui** // International Journal of Steel Structures. 2015.– 15(1), 193-204.

7. **Fan L.** Finite element modeling of single lap screw connections in steel sheeting under static shear / **Fan L., Rondal J., Ces-**

cotto S. // Thin-Walled Structure. – 1997. – 27(2). – P. 165- 185.

9. **Filippov A.P.** Chislennyye metody v prikladnoy teorii uprugosti. / **A.P. Filippov, V.I. Bulgakov, Yu.S. Vorobev, B.Ya. Kantor, G.A. Marchenko.** – Kiev: Naukova dumka, 1968. – 252 p.

10. **Biderman V.L.** Mehanika tonkostennykh konstruktсий. Statika. / **V.L. Biderman.** – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 488 p.

11. **Birger I.A.** Raschet na prochnost detaley mashin / **I.A. Birger, B.F. Shorr, G.B. Iosilevich.** – Moscow: Mashinostroenie, 1993. – 640 p.

Поступила (received) 11.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз конструкційної міцності складених тонкостінних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів / **О.О. Атрошенко, Н.Б. Скрипченко, Ю.В. Таран, А.Л. Фалько, Ю.І. Матвієнко** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – № 39 (1211). – С. 27-38. – Бібліогр. 11 назв. – ISSN 2079-0775.

Анализ конструкционной прочности составных тонкостенных конструкций с болтовым соединением элементов / **А.А. Атрошенко, Н.Б. Скрипченко, Ю.В. Таран, А.Л. Фалько, Ю.И. Матвиенко** // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – № 39 (1211). – С. 27-38. – Библиогр.: 11 назв.– ISSN 2079-0775.

Structural strength analysis of the compound thin-walled structures with joint elements / **O. Atroshenko, N. Skripchenko, Taran Yu., Falco A., Matvyuenko Yu.** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Machines and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No 39 (1211). – P. 27–38. ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів (About authors)

Атрошенко Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-65-34; e-mail: atroshenko@tmm-sapr.org

Атрошенко Олександр – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", researcher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-65-34; e-mail: atroshenko@tmm-sapr.org

Скрипченко Наталія Борисівна – кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", молодший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-65-34; e-mail: natalia.skripchenko@ntu.kharkiv.edu.

Скрипченко Наталія – Ph.D., NTU "KhPI", junior researcher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-65-34; e-mail: natalia.skripchenko@ntu.kharkiv.edu.

Таран Юрій Володимирович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01

Taran Yuri – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", the department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", Kharkiv, phone: +38 (057) 707-69-01

Фалько Артем Леонідович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01

Falco Artem – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", the department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", Kharkiv, phone: +38 (057) 707-69-01

Матвієнко Юрій Ігорович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01

Matvyuenko Yuriy – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", the department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", Kharkiv, phone: +38 (057) 707-69-01