

УДК 624.074.43

Р.В. Коренєв

Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова,
Україна

ВПЛИВ ВІРТУАЛЬНИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН І СТІЙКІСТЬ СПЕЦІАЛЬНИХ ОБОЛОНКОВИХ СИСТЕМ

В рамках цього дослідження побудовані скінченно-елементні моделі ребристої оболонки, що відображає ідеалізовану роботу оболонкової системи, виконаної з тонкостінних холоднодеформованих елементів, а також скінченно-елементна модель оболонкової системи, що демонструє вплив віртуальних недосконалостей. Виконано аналіз напружено-деформованого стану зазначених систем. Розв'язана задача стійкості, в тому числі стійкість деформованої схеми.

Ключові слова: оболонкові системи, тонкостінні холоднодеформовані профілі, стійкість, незамкнута циліндрична ребриста оболонка.

Постановка проблеми

В Україні, а також в країнах Європейського союзу активно використовуються конструкції оболонкового типу з холоднодеформованих тонколистових металевих профілів. Дані конструкції (рис. 1) активно застосовують в архітектурно-планувальних рішеннях, як промислового так і цивільного будівництва.



Рис. 1. Архітектурно-будівельні рішення будівель і споруд із застосуванням зазначених конструкцій

Використання оболонкових конструкцій даного типу в якості остова і в якості покриття будівель і споруд, обумовлено низькою вартістю будівництва,

доступністю матеріалів, необхідних для виробництва і швидкістю виробництва і монтажу. Виготовлення конструктивних елементів, що лежать в основі даних систем відбувається на будівельному майданчику. Схема виробництва і монтажу показана на рис. 2.

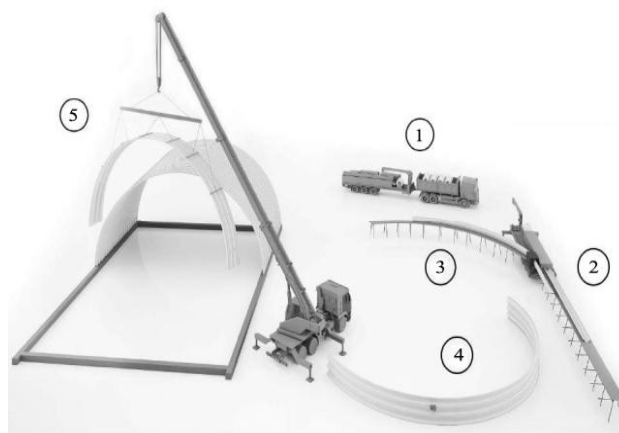


Рис. 2. Схема виробництва і монтажу збірних оболонкових систем

Відповідно до даної схеми:

- 1 - доставка товару профілезгинального стану і штрипса на будівельну майданчик;
- 2 - виробництво прямолінійного профілю;
- 3 - вальцювання прямолінійного профілю в арочний по заданому радіусу;
- 4 - збірка на землі аркових профілів в монтажні блоки;
- 5 - монтаж аркових блоків на опорні конструкції.

Незважаючи на аргументовану популярність конструкцій, що розглядаються, в нормативних документах, що діють на території як України [1], [2], так і країн СНД [3] і Європейського союзу [4], відсутні чіткі рекомендації та методики з їх розрахунку і конструювання. Особливий науковий інтерес представляє напружено-деформований стан зазначених оболонкових систем.

Сказане, в сукупності, зумовлює необхідність проведення численних і натурних експериментальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Детальний опис технології виготовлення (в умовах будівельного майданчика) і монтажу спеціальних оболонкових систем описується в статті [5]. Особливість роботи окремих конструктивних елементів, з трапецієподібним поперечним перерізом, розглянуті в роботі [6]. Оцінка роботи поперечного перерізу з урахуванням редуційного фактору, обґрунтованого наявністю поперечного гофрування, викликаного особливостями технології виробництва конструктивного елемента, позначені в роботі [7].

Інформація про випадки аварій розглянутих систем розглянуті в статтях [8], [9].

Виклад основного матеріалу

Мета дослідження - дослідити вплив віртуальних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість спеціальних оболонкових систем.

Об'єкт дослідження - спеціальна одношарова оболонкова система (рис. 3), основним несучим елементом якої є холоднодеформований арковий тонкостінний профіль (рис. 4).



Рис. 3. Спеціальна одношарова оболонкова система

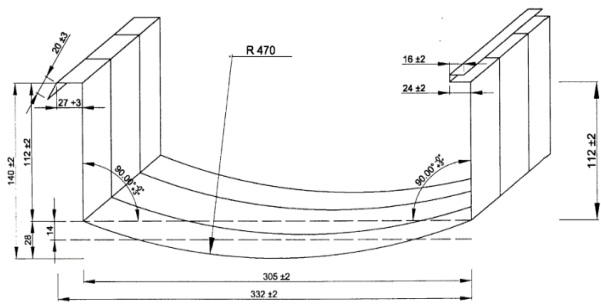


Рис. 4. Поперечний перетин розрахункового аркового профілю [10]

З метою уточнення геометричних характеристик досліджували одиночний арковий профіль, по [10] - 305А, з товщиною вихідного металу $t = 1.2$ мм, для визначення моменту інерції відносно горизонтальної осі.

Момент інерції перерізу був визначений за формулою:

$$I_x = \frac{PL^3}{48Ef} \quad (1)$$

де P - навантаження, кг;

L - проліт, см;

E - модуль пружності 1-го роду, кг / см²;

f - переміщення, см.

На рис. 5 представлена розрахункова схема проведення експерименту. Розрахунковий проліт $L = 295$ см. Навантаження прикладали в середині прольоту попередньо тарованими бетонними вантажами. Після припинення росту деформацій, на кожному кроці, робили розвантаження зразка і контроль залишкових деформацій. У зв'язку з початковим вигином (кривизною) профіля, контролювали переміщення на опорі і в середині прольоту з метою оцінки обтиску на опорі і переходом вигину в прогин.

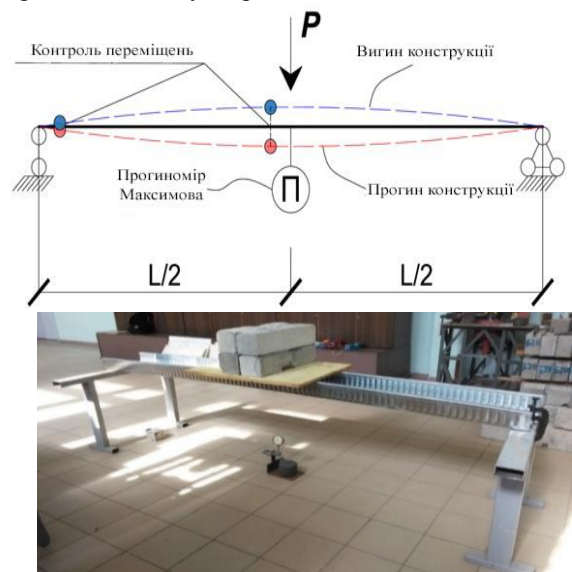


Рис. 5. Розрахункова схема експерименту і вид установки для випробувань

Результати (рис. 6) показали, що у зв'язку з частковим наростанням залишкових деформацій при збільшенні навантаження, значення моменту інерції падало. Проте, середнє значення моменту інерції було $I_x = 118.7 \text{ см}^4$, а значення моменту інерції, отримане для даного профілю з використанням програмного комплексу (ПК) «Ліра 10.6»

$I_x = 113 \text{ см}^4$. Різниця склала $\sim 4.8\%$, що є задовільним.

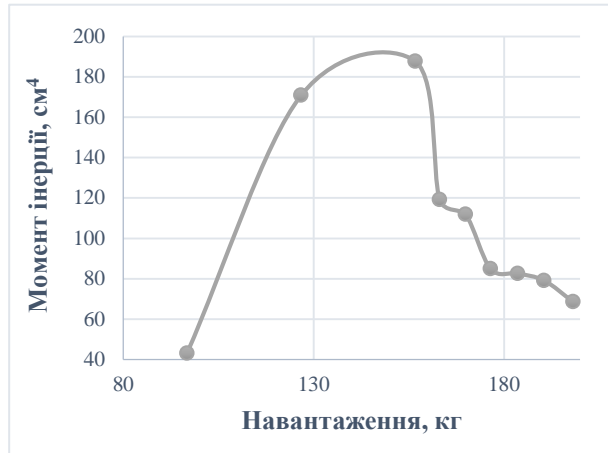


Рис. 6. Зміна моменту інерції в залежності від навантаження

Дане дослідження ґрунтовано гіпотезами класичної теорії оболонок, заснованої на гіпотезах Кірхгофа-Лява [11] і прийнятті положення про спільне деформування конструктивної системи.

Моделювання і розрахунок проводили в середовищі багатofункціонального програмного комплексу «Ліра» [12], що застосовується для проектування і розрахунку будівельних конструкцій, в основі якого лежить метод скінченних елементів (МСЕ), застосування саме МСЕ є найбільш оптимальним у такого роду завданнях [13].

Розрахунок проводили виходячи з таких умов, та вводячи наступні гіпотези та припущення:

- закріплення систем в опорній зоні (в зоні оголовка фундаменту) - нерухомий шарнір;
- елементи з'єднання аркових профілів між собою забезпечують рівнопрочні зв'язку, що дозволяє прийняти положення про спільне деформування;
- вплив поперечних гофр аркового конструктивного елементу не враховується;
- поперечний переріз (рис. 4), що має кривизну стінки апроксимовано поперечним перерізом без кривизни, але з таким же значенням моменту інерції;
- по торцях оболонок прийнято закріплення, що моделює наявність торцевих діафрагм, тобто заборонені вертикальні і горизонтальні переміщення

вузлів оболонки, що лежать в площині торцевої діафрагми.

Проводили розрахунок двох моделей оболонкових систем, що представляють собою циліндричні незамкнуті оболонки з ідентичними граничними умовами, зазначеними вище, і ідентичними габаритними розмірами:

R - радіус оболонки, рівний 11,63 м;

$H = R$ - стріла підйому;

$L = 2R$ - довжина оболонки;

$t = 1.2 \text{ мм}$ - товщина матеріалу оболонки;

В якості матеріалу застосовували сталь з фізико-механічними характеристиками:

- об'ємна вага - 7.85 тс / м³;
- модуль пружності - $2,1 \times 10^5 \text{ Мпа}$;
- коефіцієнт Пуассона - 0,3

Навантаження задавали як статичне, рівномірно розподілене навантаження, емітуюче власну вагу оригінальної оболонкової системи аналогічних габаритів.

Для вирішення поставленого завдання, при моделюванні застосовувався універсальні прямокутний скінченний елемент оболонки (КЕ 41). Даний КЕ призначений для розрахунку тонких оболонок (плит, балок-стінок). На рис. 7 представлені схематичне зображення КЕ і послідовність нумерації його вузлів [14].

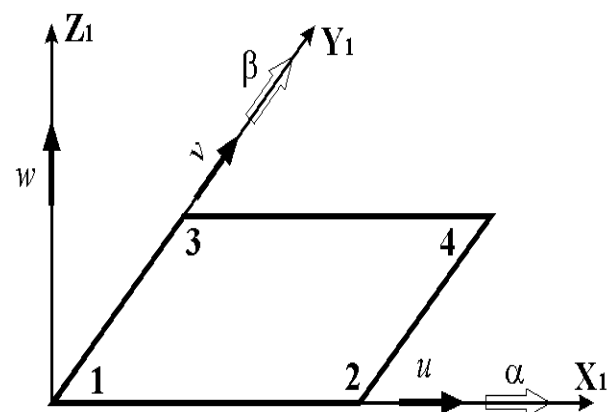


Рис. 7. Схематичне зображення КЕ 41

У кожному з вузлів КЕ є по шість ступенів свободи [12] :=

U - горизонтальне переміщення, позитивний напрямок якого збігається з напрямком X_1 ;

V - горизонтальне переміщення, позитивний напрямок якого збігається з напрямком Y_1 ;

W (w) - вертикальне переміщення (прогин), позитивний напрямок якого збігається з напрямком осі Z_1 ;

$UX \alpha = \frac{d\omega}{dy}$ - кут повороту щодо осі X_1 , позитивний напрямок якого протилежно напрямку обертання годинникової стрілки, якщо дивитися з кінця осі X_1 ;

$UY \beta = \frac{d\omega}{dx}$ - кут повороту щодо осі YI, позитивний напрямок якого протилежно напрямку обертання годинникової стрілки, якщо дивитися з кінця осі YI;

UZ γ - кут повороту щодо осі Z загальної системи координат.

Ступені свободи U, V відповідають мембранним, а W, UX, UY - згинальній деформації. Кут повороту UZ не входить в число вузлових параметрів, що визначають деформації елемента і в місцевій системі координат дорівнює нулю. Цей ступінь свободи з'являється при стикуванні елементів, які не лежать в одній площині, і необхідна для обліку просторової роботи конструкції.

Перша з розглянутих моделей (FEM-1), являє собою ребристу оболонку (рис. 8), з зазначеними раніше габаритами і граничними умовами, що складається з 18634 вузлів та 18360 скінченних елементів зазначеного типу.

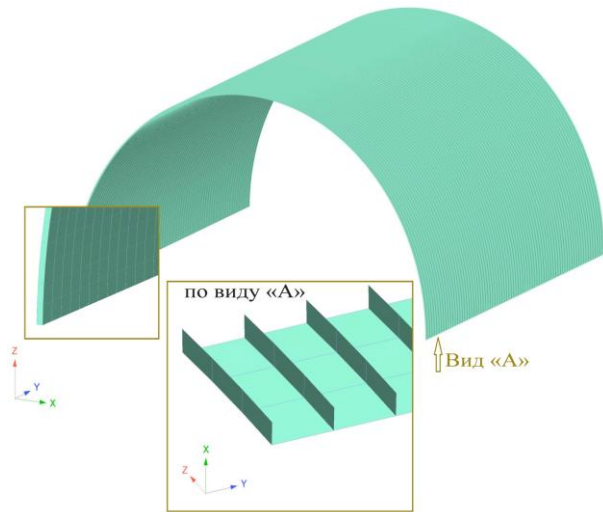


Рис. 8. Скінченно-елементна модель ребристою оболонки (FEM-1).

Товщина шпангоутів (ребер) прийнята, як подвоєна товщина оболонки, згідно з прийнятими раніше положенням.

Друга модель (FEM-2) відображає віртуальні недосконалість, у вигляді відхилення кута полиць від вертикалі на 3°, згідно з технологією виробництва [10] і рис. 4.

Дане припущення призводить до трансформації ребристої оболонки в оболонку іншого типу, з огляду на появу простору між нижніми гранями конструктивних елементів системи.

Зазначена модель є циліндричною «умовно-складчастою» оболонкою відкритого типу (рис. 9), складається з 26983 вузлів і 26640 скінченних елементів зазначеного типу.

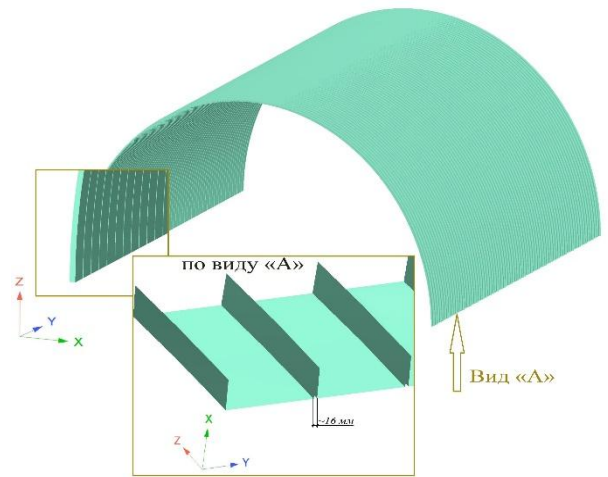


Рис. 9. Скінченно-елементна модель «умовно-складчастою» оболонки (FEM-1).

В ході розрахунку, для двох розглянутих оболонкових систем, були отримані ізополя:

- зусиль мембранної групи N_x, N_y (рис. 10, 11);
- зусиль дотичних напружень t_{xy} (рис. 12);
- зусиль згинальних моментів M_x, M_y, M_{xy} (рис. 13, 14, 15);
- зусиль поперечних сил Q_x, Q_y (рис. 16, 17);
- щільність енергії деформації (Рис. 18);

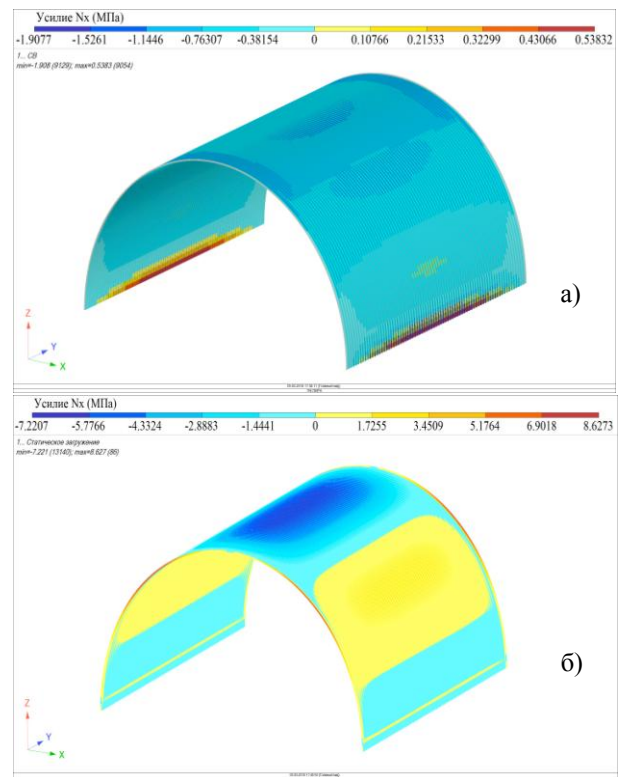


Рис. 10. Ізополя зусиль N_x для:
а) FEM-1;
б) FEM-2

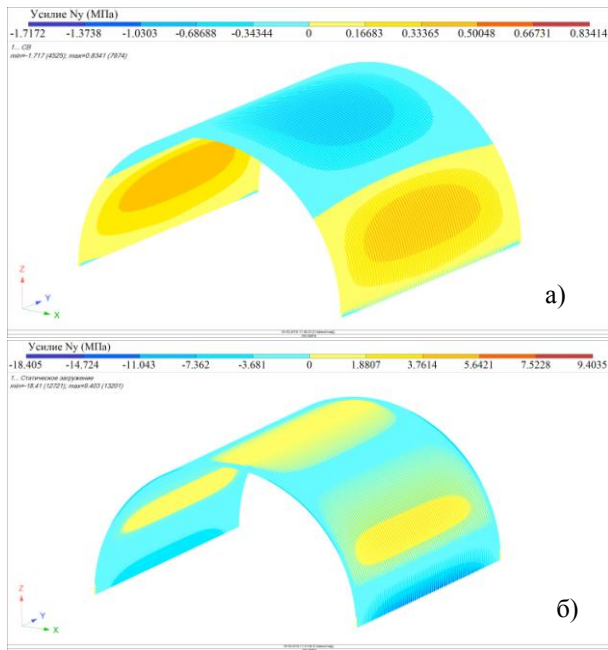


Рис. 11. Ізополя зусиль N_y для:
а) FEM-1; б) FEM-2

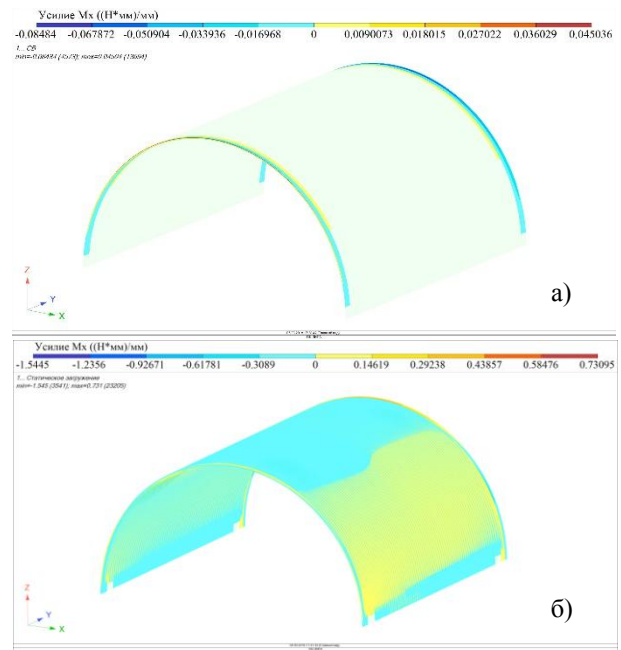


Рис. 13. Ізополя зусиль M_x для:
а) FEM-1; б) FEM-2

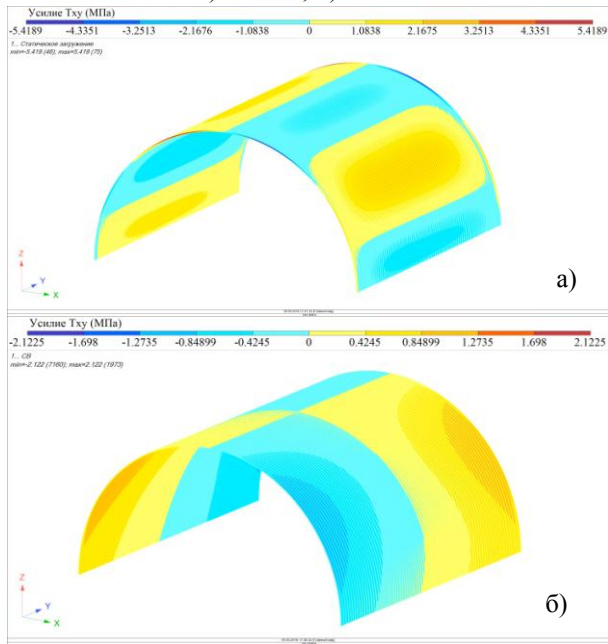


Рис. 12. Ізополя дотичних напружень t_{xy} для:
а) FEM-1; б) FEM-2

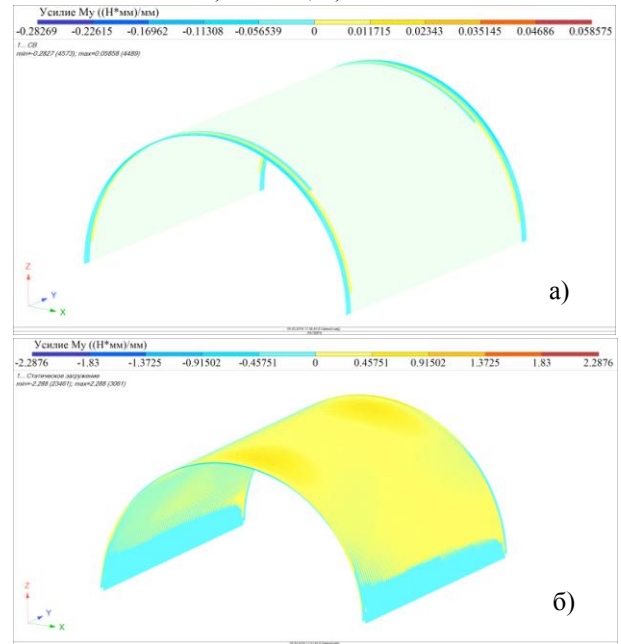


Рис. 14. Ізополя зусиль M_y для:
а) FEM-1; б) FEM-2

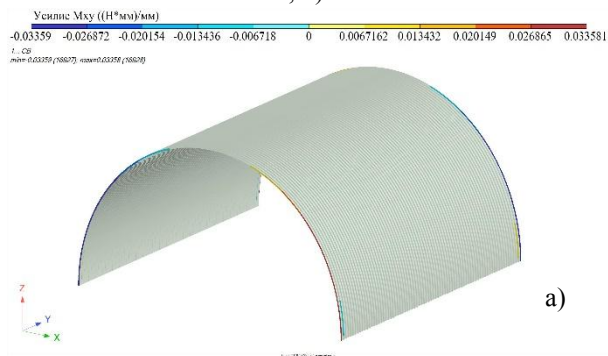


Рис. 15. Ізополя зусиль M_{xy} для: а) FEM-1; б) FEM-2

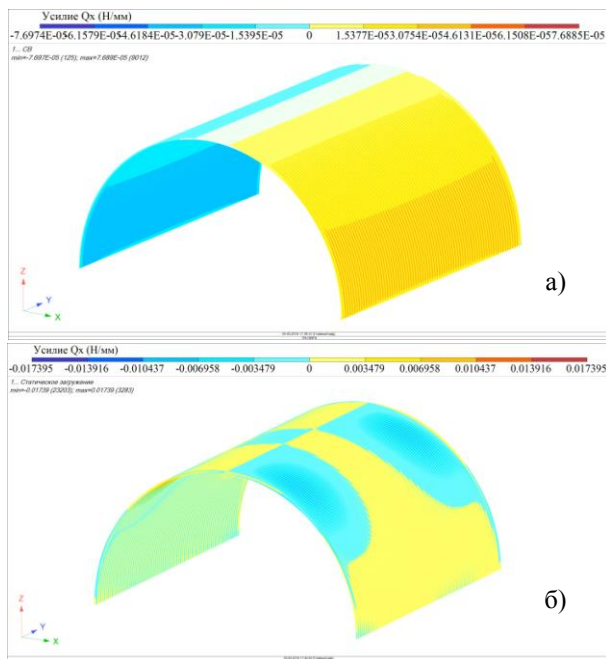


Рис. 16. Ізополя зусиль Q_x для:
а) FEM-1; б) FEM-2

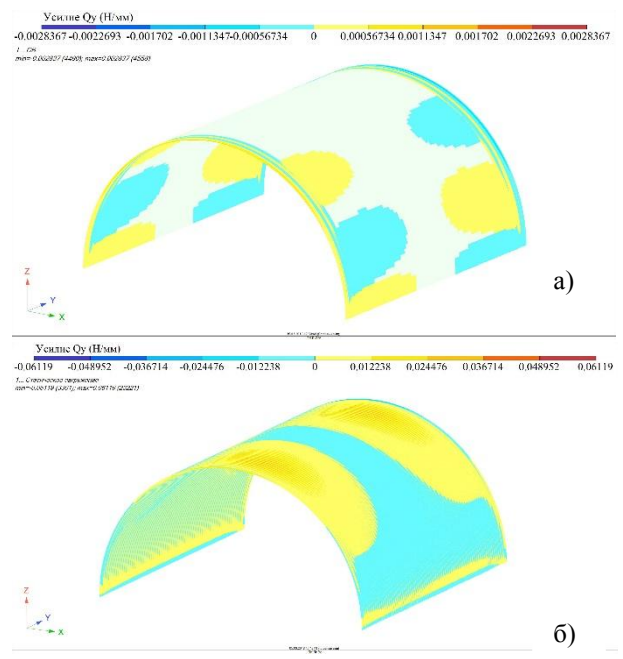


Рис. 17. Ізополя зусиль Q_y для:
а) FEM-1; б) FEM-2

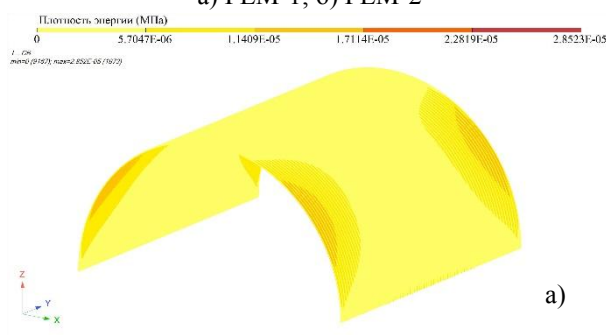


Рис. 18. Щільність енергії: а) FEM-1; б) FEM-2

Також для даних систем була вирішена задача стійкості та визначено перші 10 форм втрати стійкості та відповідні їм коефіцієнти запасу стійкості λ .

Завдачі стійкості тісно пов'язані з геометрично нелінійними задачами.

При застосуванні крокового методу розрахунку стійкість конструкції позначає позитивну визначеність матриці лінеаризованої системи рівнянь. Умовою позитивної визначеності симетричної матриці, згідно з критерієм Сильвестра, є позитивність всіх її головних мінорів, що перевіряється в ході виключення невідомих методом Гауса [15]. Такий підхід дозволяє досліджувати стійкість при одночасному врахуванні як геометричній, так і фізичній нелінійностей. Даний метод дослідження стійкості називають стійкістю деформованої схеми.

У зв'язку з вищевикладеним, скінчено-елементні моделі FEM 1 і FEM 2 були трансформовані, шляхом зміни типу скінченного елемента на тип, що відображає геометричну нелінійність.

Після проведення тестових розрахунків і отримання перших форм втрати стійкості, результати розрахунку за деформованою схемою зіставляли з результатами, отриманими із застосуванням скінченних елементів не відображають геометричну нелінійність. З причини того, що різниця склала менше 2% було прийнято рішення досліджувати стійкість недеформованої схеми, з метою мінімізації часу розрахунку.

Основним завданням розрахунку на стійкість є визначення значення критичного параметра втрати стійкості конструкції - λ .

Фізичний сенс критичного параметра втрати стійкості полягає в тому, що якщо збільшити навантаження, що діють на конструкцію в λ раз - система втратить стійкість. Даний варіант оцінки стійкості конструкції передбачає, що розподіл зусиль / напружень відомо з рішення лінійної статичної задачі і всі докладені до системи зовнішні сили (та як наслідок внутрішні зусилля / напруги) ростуть пропорційно одному параметру λ .

Основне завдання зводиться до визначення значення числового параметра λ , щоб при зовнішніх силах ($\lambda \times F_0$) сталася втрата стійкості.

Як згадувалося, розрахунок реалізувався в пружній стадії, отже значення зусиль в елементах схеми вже розраховані за допомогою лінійного процесора ПК «Ліра 10.6», при виконанні розрахунку передбачається, що ці значення виражені через критичний параметр навантаження (2):

$$P_{crj} = \lambda_j \cdot P_j; \quad (2)$$

$$N_{cr ij} = \lambda_j \cdot N_{ij}; \quad (3)$$

де:

i - номер завантаження;

j - номер елемента в схемі;

P_i - сумарне навантаження в i -тому завантаженні;

P_{crj} - критичне навантаження в i -тому завантаженні;

N_{ij} - зусилля в j -тому елементі при i -тому завантаженні;

$N_{cr ij}$ - критичні зусилля в j -тому елементі при i -тому завантаженні;

λ_i - параметр навантаження (коефіцієнт запасу стійкості).

У процесі розрахунку для зазначеного завантаження, в системах, що зазначалися, були визначені перші 10 форм втрати стійкості (на рис. 19-24, проілюстровані перші п'ять форм), а також відповідні їм коефіцієнти запасу стійкості, представлені в табл. 1.

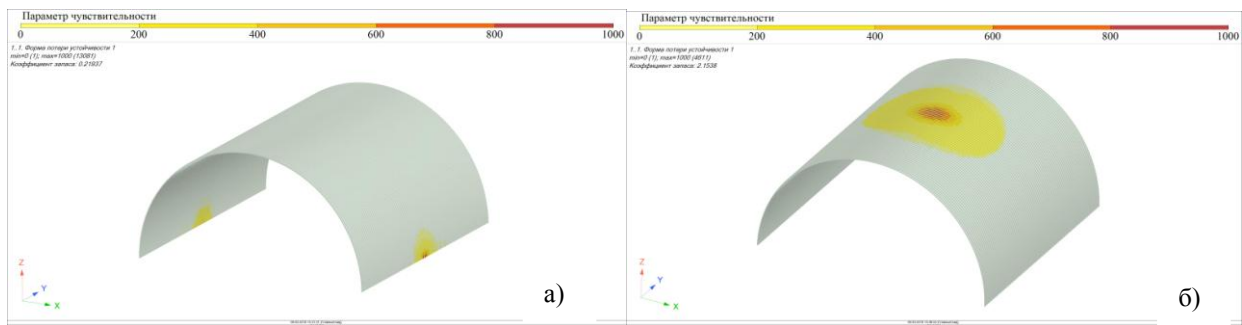


Рис. 19. Чутливість для 1-ї форми втрати стійкості для: а) FEM-1; б) FEM-2

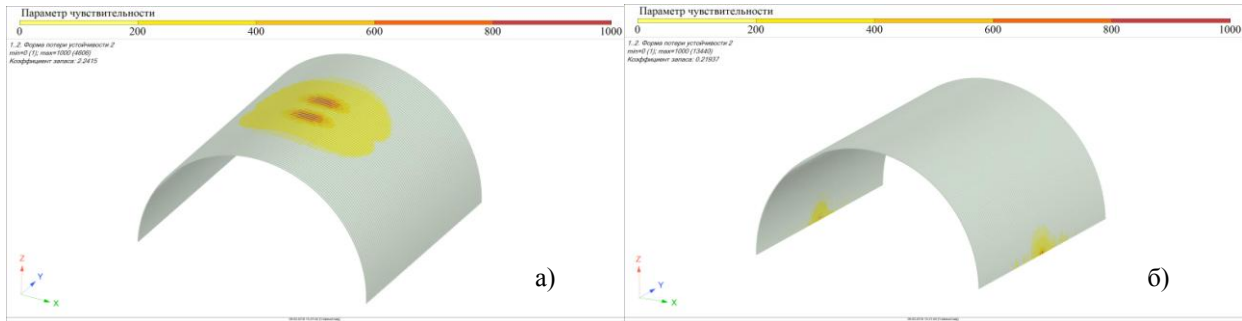


Рис. 20. Чутливість для 2-ї форми втрати стійкості для: а) FEM-1; б) FEM-2

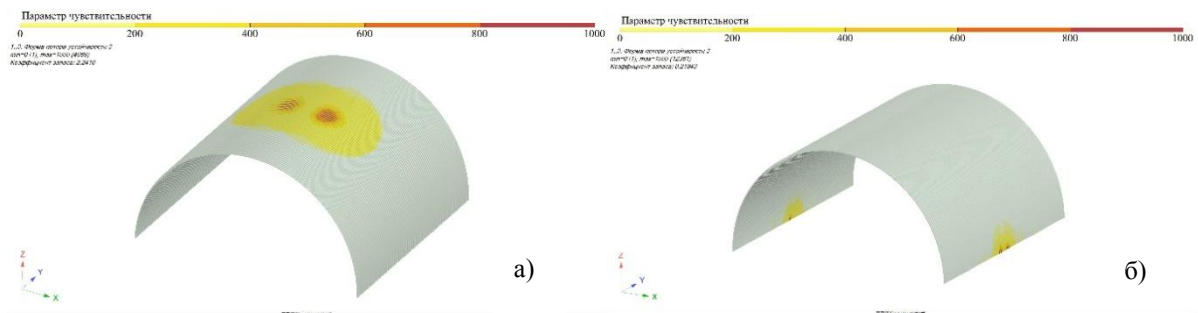


Рис. 21. Чутливість для 3-ї форми втрати стійкості для: а) FEM-1; б) FEM-2

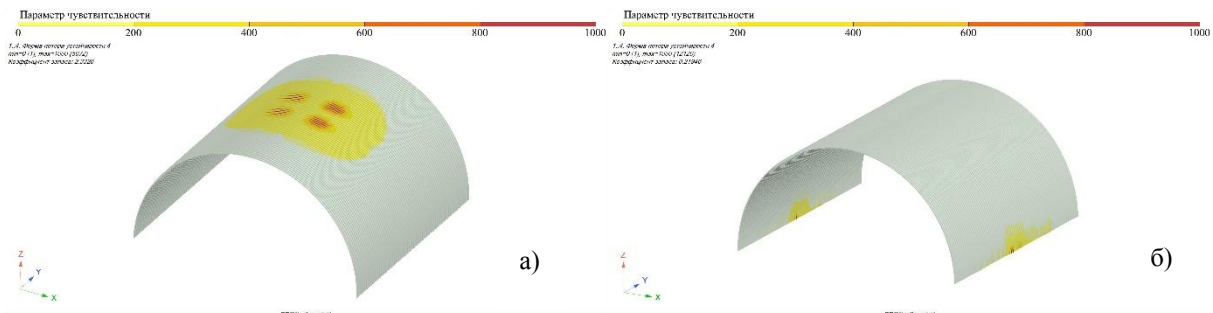


Рис. 22. Чутливість для 4-й форми втрати стійкості для: а) FEM-1; б) FEM-2

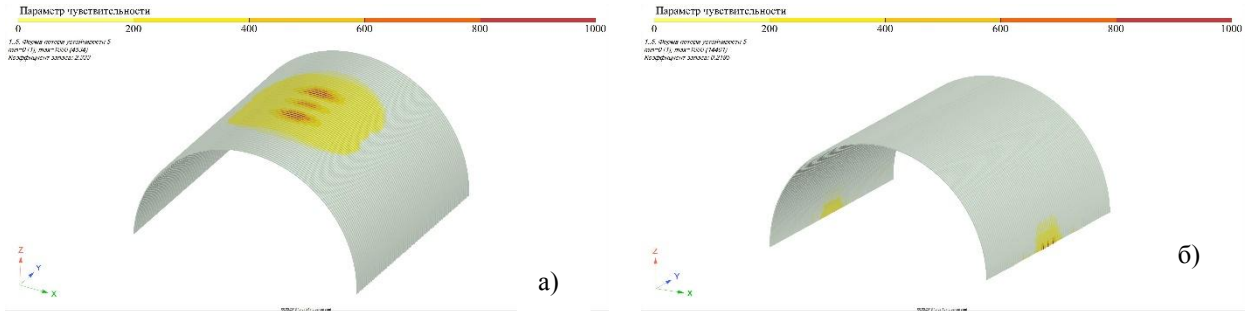


Рис. 23. Чутливість для 5-ї форми втрати стійкості для: а) FEM-1; б) FEM-2

Таблиця 1

Коефіцієнти запасу стійкості λ , для відповідних форм для FEM-1 і FEM-2

форма	К-т запасу стійкості λ для FEM-1	К-т запасу стійкості λ для FEM-2
1	2.15378	0.21937
2	2.24152 б)	0.219374
3	2.24155	0.219432
4	2.33263	0.219459
5	2.33296	0.219499
6	2.34749	0.219504
7	2.42746	0.219568
8	2.42827	0.219588
9	2.44209	0.219636
10	2.46818	0.219639

Також для розглянутих моделей FEM-1 і FEM-2 була визначена потенційна енергія деформації (ПЕД). Співвідношення ПЕД для розглянутих систем представлені на рис. 24.

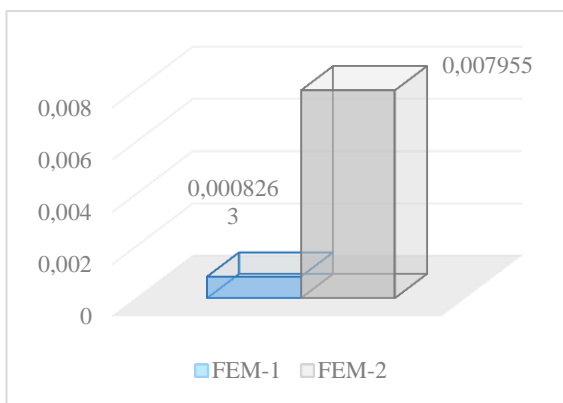


Рис. 24. Співвідношення ПЕД для FEM-1 і FEM-2

Висновки та перспективи подальших досліджень

Зроблені розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану досліджуваних кінцево-елементних моделей FEM-1, яка відобразить ідеалізовану роботу складеної оболонкової системи та FEM-2, що відображає зазначені віртуальні недосконалості, наочно демонструють зростання напружень і деформацій в системі FEM-2.

Також з проведеного дослідження випливає, що трансформована, зважаючи на віртуальних недосконалості, система FEM-2 має менше (приблизно в 10 разів) стійкість в порівнянні з оригінальною системою FEM-1.

У свою чергу, зіставлення значень потенціальної енергії деформації зазначених систем

повністю підтверджують наслідок з теореми, зазначеної в [16], а саме: «Потенційна енергія деформації споруди після усунення зв'язків більше або дорівнює енергії вихідної системи».

Варто зазначити, що, на відміну від методик розрахунку, що використовували автори в [6], [7], [8]

підхід, що застосовували при проведенні даного дослідження відображає просторову роботу конструкцій, що розглядаються.

Надалі, планується оцінити вплив торцевих і проміжних діафрагм на оболонкові системи вказаного типу, а саме на напружено-деформований стан та стійкість.

Література

1. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст]: ДБН В.2.6-198 діє до: 2014 [Чинний від 01.01.2015]. - Київ: ДП "Укрархбудінформ" „, 2014. - 205 с. (Державні будівельні норми)
2. Настанова з проектування конструкцій будинків із застосуванням сталевих тонкостінних профілів [Текст]: ДСТУ-Н Б В.2.6-87: 2009 [Чинний від 01.08.2010]. - Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2010. - 55 с. (Державні будівельні норми)
3. ТКП EN 1993-1-3. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів та профільованих листів [Текст]. - Мінськ: Мінбудархітектури Республіки Білорусь, 2010 – 114 с.
4. Eurocode 3 : Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2006. (2006) Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Stage 34. CEN. European Committee for Standardisation, 2006, 133.
5. Зільберберг, С.Д. Ефективні сховища з легких аркових металевих конструкцій [Текст] / С.Д. Зільберберг, К.А. Огайка, В.П. Федорова // Пром. Буд-во: Щомісячний наук.-технічний і проиств. Журн. - Москва, 1988. - Вип. 11. - С. 21-23
6. Білик, А.С. Визначення геометричності характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів [Текст] / А.С. Білик, М.В. Лапонов // Зб. наукових пр. - Київ: Український ін-т Стальова конструкцій ім. В.М. Шимановського, 2012. - Вип. 9, - С. 193-203.
7. Жабинського, А.Н. Моделювання аркових покриттів з тонкостінних холодногнутих профілів [Текст] / О.М. Жабинського, А.Ф. Старовойтов // Зб. наукових пр. - Мінськ: Технічне нормування, стандартизація та сертифікація в будівництві, 2012. - Вип. 5, - С. 20-28.
8. Кузнєцов, І.Л. Причини обвалення бескаркасного аркового споруди прольотом 30 м. [Текст] / І.Л. Кузнєцов, А.В. Ісаєв, Л.Р. Гімранов // Известия КГАСУ: Щомісячний наук.-технічний журн. - Казань: ФГОУВО КГАСУ, 2011. - Вип. 4, - С. 166-171.
9. Армєнській, М. Ю. Ефективні сховища з легких аркових металевих конструкцій [Текст] / М. Ю. Армєнській, І. І. Ведяков, П. Г. Єремєєв // Пром. і громадянське буд-во: Щомісячний наук.-технічний і проиств. журн. - Москва, 2007. - Вип. 3, - С. 16-18.
10. ТУ 527200-028-87168171-2012 «Безкаркасні арокні споруди (конструкції) з прямих і аркових гнутих профілів

305а; 305П вироблених на устаткуванні «Радуга-Покрівля» вище позначки 0.000 » [Текст]. - р Тамбов: ТОВ «Стальпроект», 2012. - 39 с.

11. Власов, В.З. Вибрані тр. Загальна теорія оболонок. Том 1. [Текст] / В.З. Власов. - Москва: изд-во акад. наук СРСР, 1962 г. - 528 с.

12. Городецький, А.С. Інформаційні технології розрахунку і проектування будув. конструкцій [Текст]/ А.С. Городецький, В.С. Шмуклер, А.В. Бондарев. - Харків: НТУ «ХПИ», 2003. - 248 с.

13. Моссаковський, В. І. Контактні задачі теорії оболонок і стрижнів [Текст]/ В. І. Моссаковський, В. С. Гудрамович, Е.М. Макєєв. - Москва: изд-во «Машинобудування», 1978 г. – 507 с.

14. Schafer, B.W. (1997) Cold-formed stell behavior and design: Analytical and numerical medeling of elements and members with longitudinal stiffeners. Ph. D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New York.

15. Дарков, А. В. Будівельна механіка [Текст]: учеб. для будув. спец. вузів. - 8-е изд., Перераб. і доп. / А. В. Дарков, М.М. Шапошников. - Москва: Вища. шк., 1986. - 607 с.

16. Шмуклер, В.С. Каркасні з-ми полегшеного типу [Текст] / В.С. Шмуклер, Ю.А. Клімов, Н.П. Буряк - Харків: Золоті сторінки, 2008. - 336 с.

References

1. Stalevi konstrukcii. Normi projektuvannja (2014) DBN V.2.6-198 die do: 2014 [Chinnij vid 01.01.2015]. - Kyiv: DP "Ukrarhbudinform", 205. (Derzhavni budivel'ni normi)
2. Nastanova z projektuvannja konstrukcij budinkiv iz zastosuvannjam stalevih tonkostinnih profiliv (2010) DSTU-N B V.2.6-87: 2009 [Chinnij vid 01.08.2010]. - Kiiv: DP "Ukrarhbudinform", 55. (Derzhavni budivel'ni normi)
3. TKP EN 1993-1-3. Eurokod 3 (2010). Proektuvannja stal'nih konstrukcij. Chastina 1-3. Zagal'ni pravila. Dodatkovi pravila dlja holodnoformovanih elementiv ta profil'ovanih listiv. - Mins'k: Minbudarhitekturi Respubliki Bilorus', 114.
4. Eurocode 3 : Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2006. (2006) Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Stage 34. CEN. European Committee for Standardisation, 2006, 133.
5. Zil'berberg, S.D., Ogajka, K.A. & Fedorova, V.P. (1988) Efektivni shovishha z legkih arkovih metallevih konstrukcij. Prom. Bud-vo: Shhomisjachnij nauk.-tehnicnij i proizv. Zhurn, 11, 21-23.
6. Bilik, A.S., Laponov, M.V. (2012) Vznachennja geometrichnist' harakteristik holodnoformovani tonkostinnih arkovih profiliv. Zb. naukovih pr. - Kiiiv: Ukrain's'kij in-t Stal'ova konstrukcij im. V.M. Shimanov's'kogo, 9, 193-203.
7. Zhabins'kogo, A.N., Starovojtov, A.F. (2012) Modeljvannja arkovih pokrittiv z tonkostinnih holodnognutih profiliv. Zb. naukovih pr. - Mins'k: Tehnicne normuvannja, standartizacija ta sertifikacija v budivnictvi, 5, 20-28.
8. Kuznecov, I.L., Isaev, A.V., Gimranov, L.R. (2011) Prichini obvalennja beskarkasnogo arkovogo sporudi prol'otom 30 m. Izvestija KGASU: Shhomisjachnij nauk.-tehnicnij zhurn, 4, 166-171.
9. Armenskij, M. Ju., Vedjakov, I. I., Eremeev, P. G. (2007) Efektivni shovishha z legkih arkovih metallevih konstrukcij. Prom. i gromadjans'ke bud-vo: Shhomisjachnij nauk.-tehnicnij i proizv. Zhurn, 3, 16-18.
10. TU 527200-028-87168171-2012 «Bezkarakasni arochni sporudi (konstrukcii) z prjamih i arkovih gnutih profiliv 305a; 305P viroblenih na ustatkuvanni «Raduga-Pokrivlja» vishhe poznachki 0.000 » (2012), 39.

11. Vlasov, V.Z. (1962) Vibrani tr. Zagal'na teorija obolonok. Tom 1. Moskva: izd-vo akad. nauk SRSR, 528.
12. Gorodec'kij, A.S., Shmukler, V.S. & Bondarev, A.V. (2003) Informacijni tehnologii rozrahunku i proektuvannja budue. Konstrukcij. Harkiv: NTU «HPI», 248.
13. Mossakovskij, V. I., Gudramovich, V. S. & Makeev, E.M. (1978) Kontaktni zadachi teorii obolonok i strizhniv. Moskva: izd-vo «Mashinobuduvannja», 507.
14. Schafer, B.W. (1997) Cold-formed steel behavior and design: Analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners. Ph. D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New York.
15. Darkov, A. V. & Shaposhnikov, M.M. (1986) Budivel'na mehanika: Ucheb. dlja budue. spec. vuziv. - 8-e izd., Pererab. i dop. Moskva: Vishha. shk., 607.
16. Shmukler, V.S., Klimov, Ju.A., Burjak, N.P. (2008) Karkasni z-mi polegshenogo tipu. Harkiv: Zoloti storinki, 336.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Україна.

Автор: КОРЕНСВ Роман Валерійович
аспірант, Харківський національний університет
міського господарства ім. О.М. Бекетова
E-mail – r.v.korr@gmail.com

THE INFLUENCE OF VIRTUAL IMPERFECTIONS ON THE STRESS-STRAIN STATE AND THE STABILITY OF SPECIAL SHELL-TYPE SYSTEMS

R. Koreniev

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article is devoted to the roofing and structures, in the form of special shelltype systems made of thin-walled cold-deformed profiles.

Finite-element models of the ribbed shell that implements the idealized shell system made of thin-walled cold-deformed elements was created as well as a finite-element model of the shell system that demonstrates the influence of virtual imperfections.

The stress-strain state of these systems is analyzed.

The problem of stability is solved, including the stability of the deformed scheme.

The enumerated in the aggregate predetermined the implementation of the system through the design of a number of erected objects.

Keywords: shell systems, thin-walled large-span structures, stability, unclosed cylindrical ribbed shell.