

ВПЛИВ ДІАФРАГМ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТА СТІЙКІСТЬ АРКОВИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛЬНОГО ТИПУ

© Коренєв Р. В., 2019

Розглянуто поширені на території України безкаркасні покриття, а саме аркові покриття спеціального типу. Цей вид покриттів є, по суті, складеними циліндричними ребристими оболонками відкритого типу, в основу яких покладено арковий конструктивний елемент – тонкостінний профіль холодного деформування. Спираючись на прийняті гіпотези та припущення, зокрема на припущення про сумісність деформацій аркових конструктивних елементів, було побудовано скінченно-елементні моделі зазначених покриттів. Досліджено вплив наявності торцевих та проміжних діафрагм на напружено-деформований стан оболонкових моделей аркових систем спеціального типу, при цьому враховуючи різні довжини складених оболонок. У процесі дослідження було оцінено вплив наявності діафрагм жорсткості на стійкість зазначених ребристих оболонок. З цією метою визначено перші форми втрати стійкості і відповідні їм коефіцієнти запасу стійкості (критичний параметр втрати стійкості конструкції).

Ключові слова: аркові покриття спеціального типу, циліндрична ребриста оболонка відкритого типу, стійкість, складена оболонка.

R. V. Koreniev
O. M. Beketov NUUE

INFLUENCE OF DIAPHRAGM ON THE STRESS-STRAIN STATE AND BUCKLING OF SPECIAL-TYPE ARCH SYSTEMS

© Koreniev R. V., 2019

This paper is devoted to the frameless coverings – special-type arch coverings extended to territories of Ukraine. This type of coating is essentially folded open type cylindrical ribbed shells are based on an arched structural element – the thin-walled, cold-deformed profile. Based on accepted hypotheses and assumptions, in particular, on the assumption of the compatibility of deformations of arched structural elements, finite-element models of these coatings were constructed. The research of influence of existence of face and intermediate diaphragms on the stress-strain state of the shell models of special type arch systems is conducted, considering various lengths of compound covers. During the research, assessment of the impact of existence of diaphragms of rigidity on stability of the shells was also executed. The first forms of buckling and stability safety factors (critical parameter of buckling) corresponding to them were defined. The components of the stress-strain state obtained in the research are presented in the form of isofields of the main tensile stresses σ_1 and the main compressive stresses σ_3 and also in the form of isofields of vertical movements, and stability safety factor in the form of the relative chart, for each of these shells.

From the analysis, it is noted that the diaphragms of rigidity contribute significantly to the intense deformed condition of the investigated structures. The analysis of isofields of the main stresses σ_1 and σ_3 , shows redistribution of efforts. In total, the above described clearly demonstrates the necessity of installation of diaphragms for and necessitates further research in the considered direction. Also it is noted that for the investigated arch systems, the main measure of the exhaustion of bearing capacity is buckling. Taking into account the above, it is

noted that the scientific interest is attracted by rationalization of length of the block between diaphragms as prospect of further the main criterion of which should be buckling resistance of the special-type arch coverings.

Key words: special-type arch coverings, open-type cylindrical ribbed shell, buckling, compound shell.

Вступ. Поширені на території України аркові покриття спеціального типу дають змогу якісно і в найкоротші терміни зводити будівлі і споруди різного призначення. Для цих покриттів використовують аркові конструктивні елементи, що об'єднуються один з одним вальцевим з'єднанням у складову ребристу циліндричну оболонку відкритого типу. Виготовляють конструктивні елементи безпосередньо на будівельному майданчику, крім того, мобільність обладнання (пересувні стани) і транспортна компактність вихідного матеріалу конструкції (рулонної сталі) дозволяють споруджувати об'єкти різного призначення в важкодоступних регіонах країни, в найкоротші терміни, зокрема при ліквідації наслідків природних і техногенних катастроф. Незважаючи на частоту використання, напружено-деформований стан і стійкість позначених покриттів спеціального типу залишаються маловивченими.

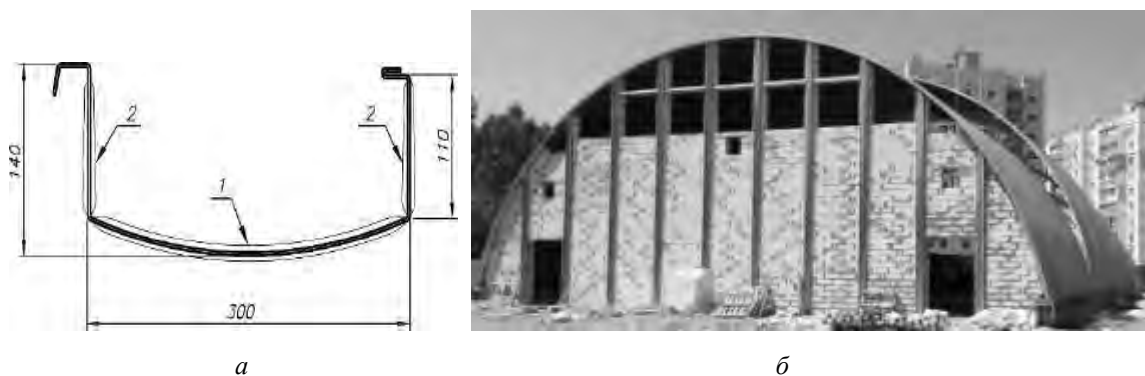


Рис. 1. Поперечний переріз аркового конструктивного елемента (а);
аркова система спеціального типу (б)

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах Зверева В. В. [1], Жидкова К.С. [2], де розглянуто аркові конструкції на основі об'ємно-формованого прокату. У розрахунку конструкцій, у яких профілі мають гофровані межі, поширення отримав метод, оснований на заміні таких граней анізотропними пластинками аналогічної товщини, жорсткісні характеристики яких знаходять за умови рівності лінійних переміщень гофрованої і плоскої анізотропної пластинок вздовж відповідних координатних осей. Такий простий і ефективний інженерний метод запропоновано в роботах Л. С. Андреевої [3, 4], де розглянуто три типи гофр: трапецієподібний, пільчатий і синусоїдальний. У роботі [5] оцінено вплив віртуальних недосконалостей на напружено-деформований стан розглянутих аркових покриттів. У статті [6] визначено особливості роботи поперечних перерізів холоднодеформованих трапецієподібних аркових профілів системи типу "МІС" в складі аркового покриття. В роботі [7] розглянуто доповнені алгоритми розрахунку аркових покриттів спеціального типу.

Метою статті є оцінювання впливу торцевих і проміжних діафрагм на напружено-деформований стан і стійкість позначених складових циліндричних оболонок.

Процедура дослідження. Якісні та кількісні результати розглянуто в середовищі ПК "Ліра" (ліц. №1/6258), фундованому методом скінченних елементів [8]

Дослідження проводили, враховуючи прийняті гіпотези і припущення: прийнято припущення про спільне деформування конструктивних елементів, враховуючи це, розрахункову модель досліджуваних аркових покриттів інтерпретовано у вигляді циліндричної ребристої оболонки відкритого типу. Товщину ребер (шпангоутів) прийнято як подвоєну товщину оболонки.

1. Прийнято принципи класичної теорії оболонок, основані на гіпотезах Кірхгофа-Лява [9].

2. Кручення і різницю переміщень бортових елементів оболонки не враховують. Відповідно до технології виготовлення, спирання вважають шарнірно-нерухомим, тобто в досліджуваних СЕ моделях заборонено лінійні переміщення в вузлах скінченних елементів, що межують з бортовим елементом.

3. Дослідження показали, що торцеві діафрагми циліндричних оболонок настільки жорсткі, що в переважній більшості випадків можуть вважатися такими, що не деформуються в своїй площині, а із своєї площини приймаються абсолютно гнучкими, тобто такими, що не сприймають перпендикулярних зусиль [10]. З метою зменшення розмірності досліджуваних скінченно-елементних моделей, конструкції діафрагм не моделювали, а згідно з позначеним вище, в вузлах скінченних елементів, що межують з діафрагмою, заборонялися лінійні переміщення в площині діафрагми, тобто по глобальних осях X і Z, системи координат використовуваного програмного комплексу.

Досліджували коротку, середню і довгу оболонки, відповідно до загальноприйнятих у теорії оболонок співвідношень розмірів [11], при цьому з урахуванням наявності торцевих і проміжних діафрагм:

- *коротка* – $L=D=2R$; (без діафрагм і з торцевими діафрагмами);
- *середня* – $L=2D=4R$; (без діафрагм, з проміжними і з торцевими діафрагмами, тільки з торцевими діафрагмами);
- *довга* – $L=3D=6R$; (без діафрагм, з проміжними і з торцевими діафрагмами, тільки з торцевими діафрагмами);

Крок діафрагм приймався рівним довжині короткої оболонки. Позначення геометрії оболонок:

- R – радіус оболонки, рівний 11,63 м;
- $H = R$ – стріла підйому;
- $L = 2R$ – довжина оболонки;
- $t = 1.2$ мм – товщина матеріалу оболонки.

Як матеріал застосовували сталь із фізико-механічними характеристиками:

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

Навантаження задавали як статичне рівномірно розподілене навантаження, еквівалентне 0,0015 МПа.

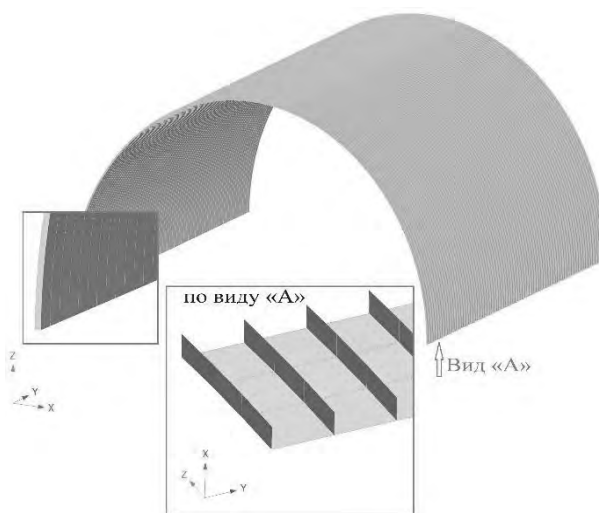


Рис. 2. Скінченно-елементна (СЕ) модель короткої в плані ребристої оболонки, що не має торцевих діафрагм

Отримані в процесі дослідження компоненти напружено-деформованого стану зображено на рис. 3–10 у вигляді ізополей головних розтягувальних напружень σ_1 і головних стискних напружень σ_3 , а також у вигляді ізополей вертикальних (по осі Z) переміщень для кожної з означених оболонок.

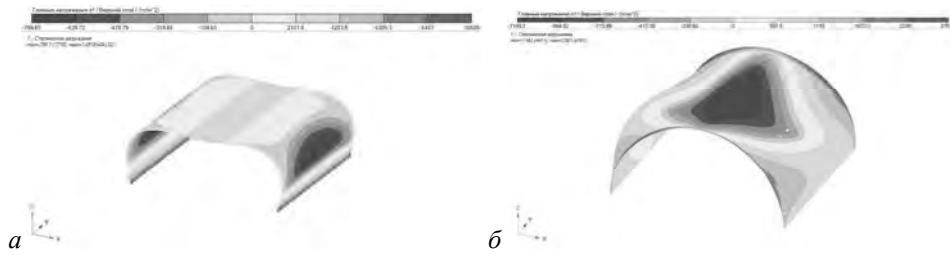


Рис. 3. Ізопля головних напружень σ_1 : а – коротка оболонка без діафрагм; б – коротка оболонка з торцевими діафрагмами

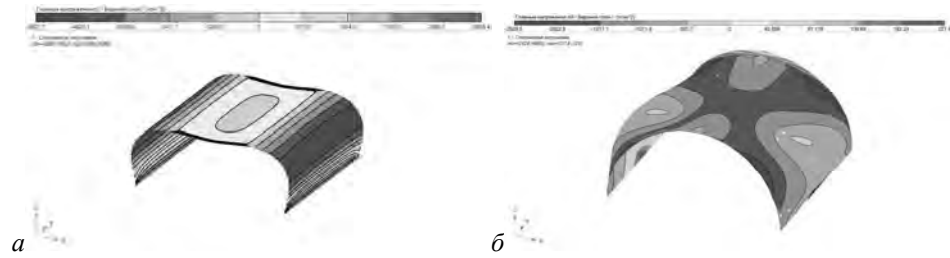


Рис. 4. Ізопля головних напружень σ_3 : а – коротка оболонка без діафрагм; б – коротка оболонка з торцевими діафрагмами

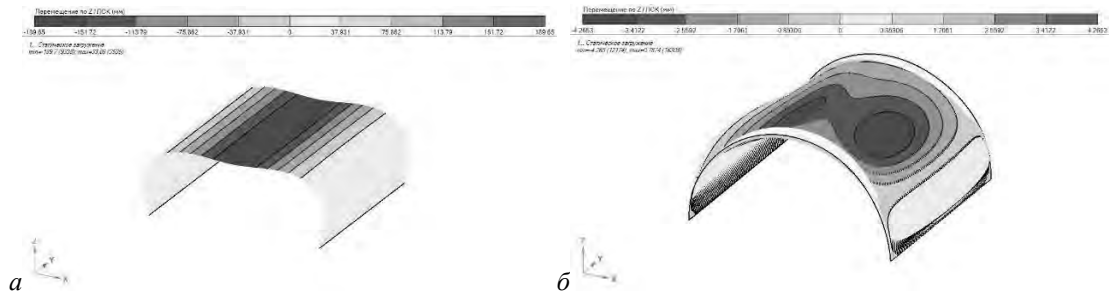


Рис. 5. Ізопля вертикальних переміщень: а – коротка оболонка без діафрагм; б – коротка оболонка з торцевими діафрагмами

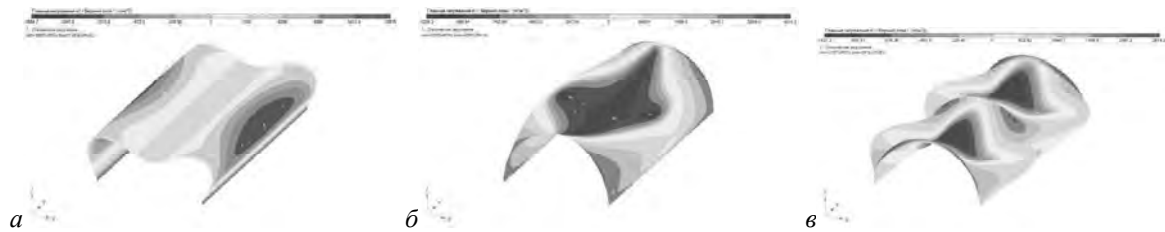


Рис. 6. Ізопля головних напружень σ_1 : а – оболонка середн. довжини без діафрагм; б – оболонка середн. довжини з торцевими діафрагмами; в – оболонка середн. довжини з торцевими діафрагмами і проміжними діафрагмами

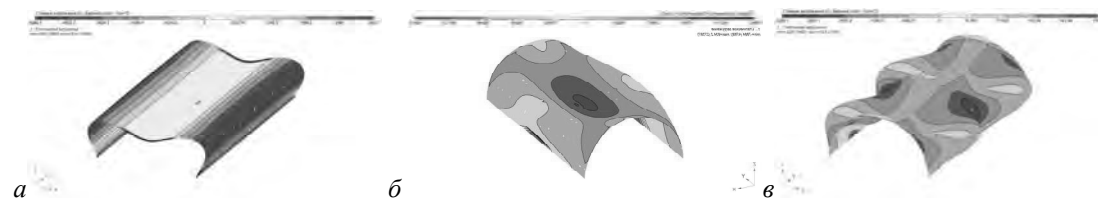


Рис. 7. Ізопля головних напружень σ_3 : а – оболонка середн. довжини без діафрагм; б – оболонка середн. довжини з торцевими діафрагмами; в – оболонка середн. довжини з торцевими діафрагмами і проміжними діафрагмами

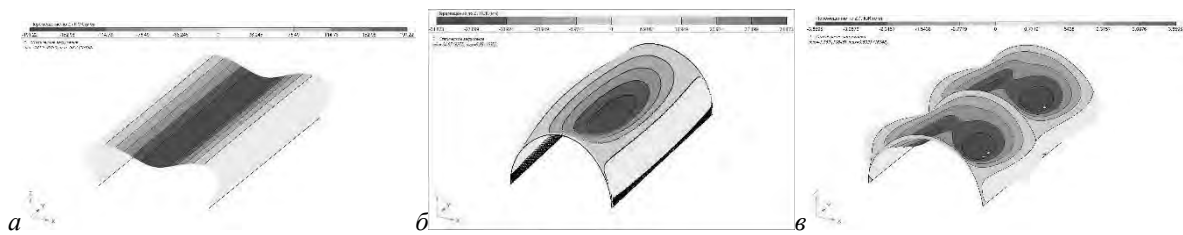


Рис. 8. Ізопля вертикальних переміщень: а – оболонка середн. довжини без діафрагм; б – оболонка середн. довжини з торцевими діафрагмами; в – оболонка середн. довжини з торцевими діафрагмами і проміжними діафрагмами

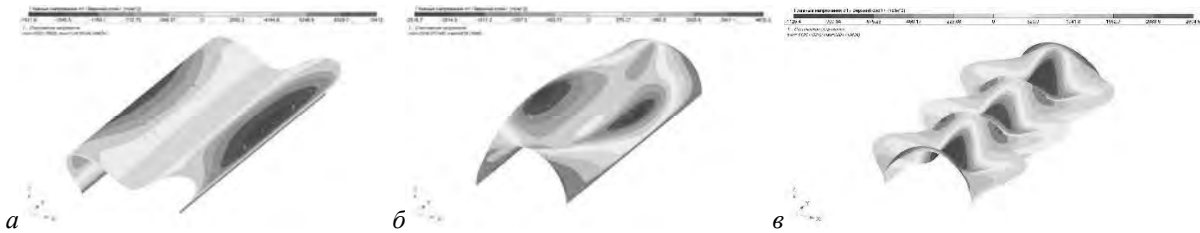


Рис. 9. Ізопля головних напружень σ_1 : а – довга оболонка без діафрагм; б – довга оболонка з торцевими діафрагмами; в – довга оболонка з торцевими діафрагмами і проміжними діафрагмами

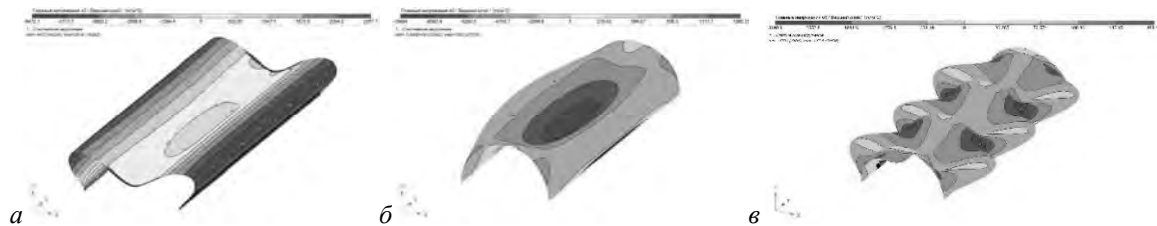


Рис. 10. Ізопля головних напружень σ_3 : а – довга оболонка без діафрагм; б – довга оболонка з торцевими діафрагмами; в – довга оболонка з торцевими діафрагмами і проміжними діафрагмами

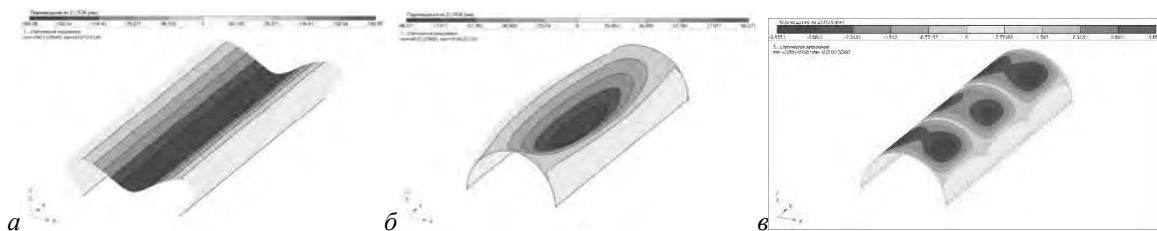


Рис. 11. Ізопля вертикальних переміщень: а – довга оболонка без діафрагм; б – довга оболонка з торцевими діафрагмами; в – довга оболонка з торцевими діафрагмами і проміжними діафрагмами

У процесі дослідження оцінено вплив наявності діафрагм жорсткості на стійкість оболонок зазначених топологій. З цією метою визначено перші форми втрати стійкості і відповідні їм коефіцієнти запасу стійкості (критичний параметр втрати стійкості конструкції). Визначені коефіцієнти запасу стійкості представлені на порівняльній діаграмі (рис. 12).

Для зручності зіставлення максимальні значення отриманих компонентів напружено-деформованого стану представлені у вигляді діаграм на рис. 13–15.

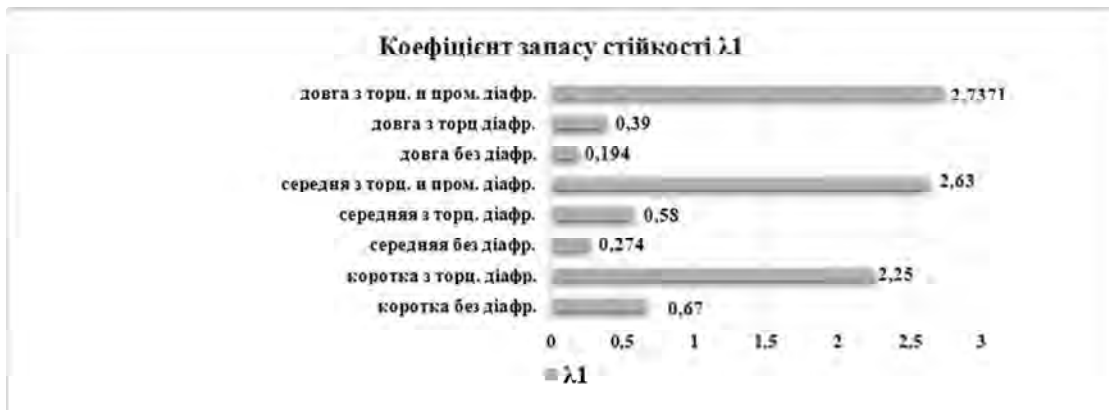


Рис. 12. Порівняльна діаграма коефіцієнтів запасу стійкості λ_1

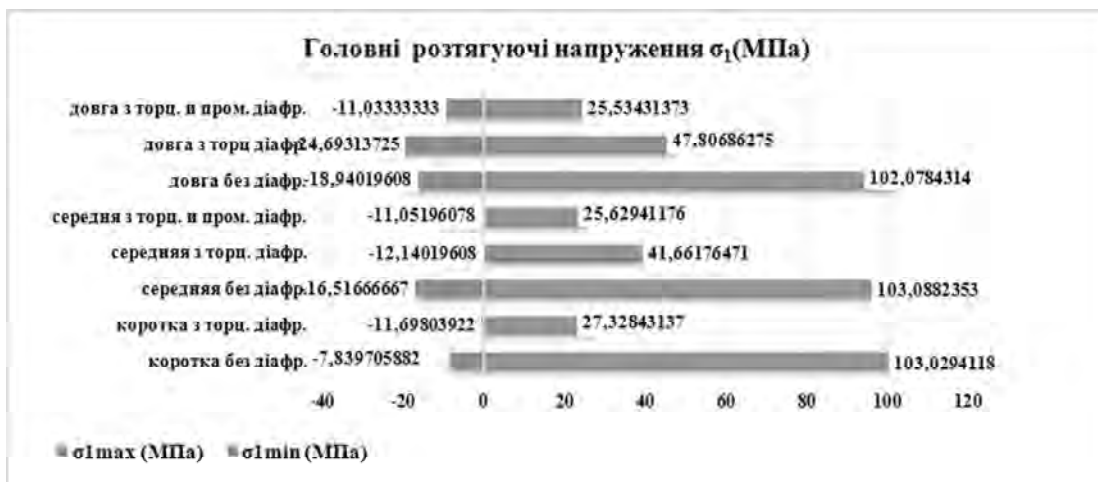


Рис. 13. Порівняльна діаграма значень максимальних головних напружень σ_1 залежно від типу оболонки

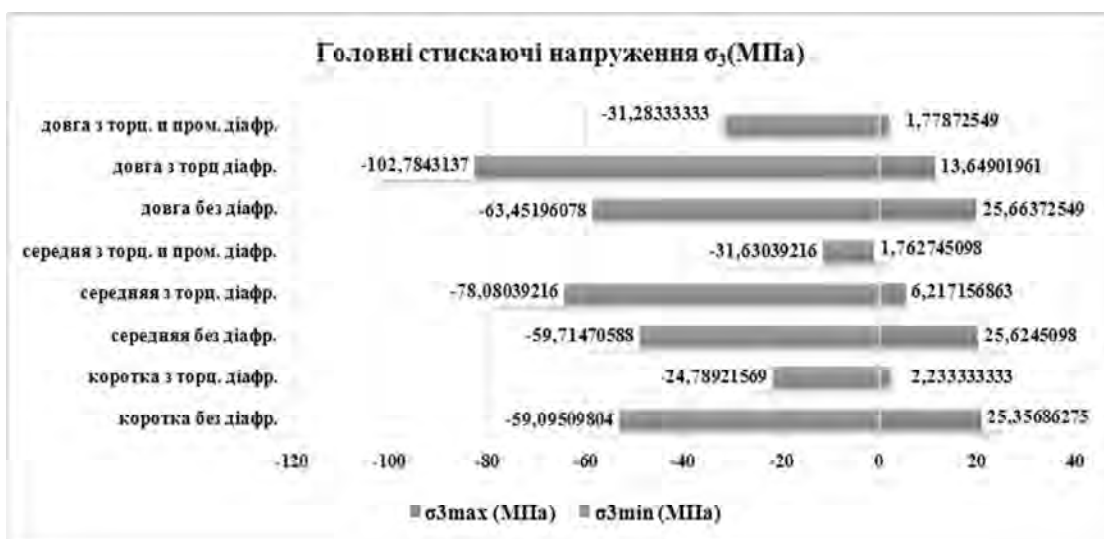


Рис. 14. Порівняльна діаграма значень максимальних головних напружень σ_3 залежно від типу оболонки



Рис. 14. Порівняльна діаграма значень максимальних вертикальних переміщень залежно від типу оболонки

Основним завданням розрахунку на стійкість [8] є визначення значення критичного параметра втрати стійкості конструкції – λ . Фізичний сенс критичного параметра втрати стійкості полягає в тому, що якщо збільшити навантаження, які діють на конструкцію в λ разів, система втратить стійкість. Основне завдання зводилося до визначення значення числового параметра λ , щоб при зовнішніх силах ($\lambda \times F_0$) сталася втрата стійкості. Розрахунок реалізували в пружній стадії, отже, значення зусиль в елементах схеми вже розраховані за допомогою лінійного процесора ПК “Ліра”. При виконанні розрахунку передбачено, що ці значення виражені через критичний параметр навантаження (1):

$$P_{crj} = \lambda_i \cdot P_i; \quad (1)$$

$$N_{cr ij} = \lambda_i \cdot N_{ij}; \quad (2)$$

де i – номер завантаження; j – номер елемента в схемі; P_i – сумарне навантаження в i -му завантаженні; P_{crj} – критичне навантаження в i -му завантаженні; N_{ij} – зусилля в j -му елементі за i -го завантаження; $N_{cr ij}$ – критичні зусилля в j -му елементі при i -му завантаженні; λ_i – параметр навантаження (коефіцієнт запасу стійкості).

Для короткої оболонки зазначаються такі зміни:

- відбувається перерозподіл напружень; за наявності діафрагм спостерігається зона стиснення у верхній зоні оболонки, на відміну від зони розтягування, яка спостерігалася за відсутності діафрагм;
- значення напружень за наявності діафрагм зменшуються в середньому на 30 % порівняно з оболонкою без діафрагм;
- значення максимальних вертикальних переміщень для оболонки без діафрагм ~ 189 мм, і ця зона розташована у верхній частині по центру оболонки, а для оболонки з торцевими діафрагмами значення максимальних вертикальних переміщень становить $\sim 4,26$ мм;
- коефіцієнт запасу стійкості за наявності торцевих діафрагм зріс в 3,4 разу.

Для оболонки середньої довжини зазначають такі зміни:

- відбувається перерозподіл зусиль, аналогічний описаному вище для короткої оболонки;
- при установці торцевих діафрагм значення напруг знижуються в середньому на 25 % порівняно із значеннями оболонки без діафрагм, а при зіставленні з оболонкою, що має, крім торцевих, ще й проміжну діафрагму, напруги падають у середньому на 37,5 % щодо значень оболонки без діафрагм;
- значення максимальних вертикальних переміщень для оболонки без діафрагм ~ 191 мм складають, і ця зона розташована у верхній частині по центру оболонки, для оболонки з торцевими діафрагмами значення максимальних вертикальних переміщень становить $\sim 34,26$ мм, а для

оболонки з торцевими і проміжною діафрагмами значення максимальних вертикальних переміщень становить ~3.86 мм;

- коефіцієнт запасу стійкості за наявності торцевих діафрагм зріс у 2,1 разу порівняно з оболонкою без діафрагм, а за наявності торцевих і проміжних – у 9,59 разу.

Для довгої оболонки відзначають такі зміни:

- відбувається перерозподіл зусиль, аналогічний до описаного вище для короткої оболонки;
- при установці торцевих діафрагм значення напруг зростають у середньому на 30 % щодо значень оболонки без діафрагм, а при зіставленні з оболонкою, що має, крім торцевих, ще й проміжну діафрагму, напруги падають у середньому на 41,5 % щодо значень оболонки без діафрагм;

- значення максимальних вертикальних переміщень для оболонки без діафрагм ~190 мм, і ця зона розташована у верхній частині по центру оболонки, для оболонки з торцевими діафрагмами значення максимальних вертикальних переміщень становить ~ 96,3 мм, а для оболонки з торцевими і проміжною діафрагмами значення максимальних вертикальних переміщень становить ~ 3,85 мм;

- коефіцієнт запасу стійкості за наявності торцевих діафрагм зріс у 2,01 разу порівняно з оболонкою без діафрагм, а за наявності торцевих і проміжних – у 14,1 разу.

Висновки. За результатами аналізу видно, що діафрагми жорсткості роблять істотний внесок у напружено-деформований стан досліджуваних конструкцій. Аналіз ізополей головних напружень σ_1 і σ_3 , демонструє перерозподіл зусиль.

Разом описане вище наочно демонструє необхідність установки діафрагм жорсткості в аркових покриттях спеціального типу і зумовлює необхідність подальших досліджень в означеному напрямку, зокрема, за результатами аналізу з'ясувалося, що незалежно від довжини самої оболонки на напружено-деформованому стані (не враховуючи температурних деформацій) позначається лише довжина блоку, укладеного між діафрагмами.

Також зазначено, що для досліджуваних аркових систем мірою вичерпання несучої здатності є втрата стійкості. Науковий інтерес викликає раціоналізація довжини блоку, укладеного між діафрагмами, як перспектива подальших досліджень, основним критерієм якої повинна бути стійкість аркової системи спеціального типу.

1. Зверев В. В. *Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Зверев Виталий Валентинович. – Л., 2000. – 396 с.* 2. Жидков К. Е. *Разработка и исследование арочных конструкций с листовой пространственной решеткой: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Жидков Константин Евгеньевич. – Липецк, 1999. – 173 с.* 3. Андреева Л. Е. *Расчет гофрированных мембран, как анизотропных пластинок / Л. Е. Андреева // АН СССР, отделение технических наук, институт механики: Инженерный сборник. – М.: АН СССР, 1955. том XXI. – С. 128–141.* 4. Андреева Л. Е. *Расчет характеристик гофрированных мембран / Л. Е. Андреева // Приборостроение. – М.: МАШГИЗ, 1956. – № 3. – С. 11–17.* 5. Коренев Р. В. *Вплив віртуальних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість спеціальних оболонкових систем / Р. В. Коренев // Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник, – Харків, 2018. – Вип. 140. – С. 109–119.* 6. Білик А. С. *Визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів / А. С. Білик, М. В. Лапонов // Зб. наук. пр. – К.: Український ін-т сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського. – 2012. – Вип. 9, – С. 193–203.* 7. Шмуклер В. С. *Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем / В. М. Бабаєв, С. О. Бугаєвський, С. М. Євель, І. Д. Євзеров, А. І. Лантух, Лященко, В. В. Шеветовський, О. В. Шимановський, В. С. Шмуклер // К.: Сталь, 2017. – 404 с.* 8. Шмуклер В. С. *Информационные технологии расчёта и проектирования строительных конструкций / А. С. Городецкий, В. С. Шмуклер, А. В. Бондарев. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – 889 с.* 9. Власов В. З. *Избранные труды. Общая теория оболочек. Т. 1 / В. З. Власов // М.: Изд-во академии наук СССР,*

1962. – 528 с. 10. Байков В. Н. Проектирование железобетонных тонкостенных пространственных конструкций / В. Н. Байков, Э. Хампе, Э. Рауэ. – М.: Стройиздат, 1990. – 232 с. 11. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х т. Т. 3; под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 567 с.

References

1. Zverev V. V. (2000), *Effektivnyie stroitelnyie metallokonstruktsii na osnove ob'emno-formovannogo tonkolistovogo prokata: dis. ...d-ra. teh. nauk: 05.23.01, [Efficient building metal structures based on volume-shaped sheet metal: dissertation]* L., 396 p. 2. Zhidkov K. E. (1999), *Razrabotka i issledovanie arochnyih konstruktsiy s listovoy prostranstvennoy reshetkoy: dis. ...kand. teh. nauk: 05.23.01, [Development and research of arched constructions with a sheet space grating: dissertation]*, Lipetsk, 173 p. [in Russian]. 3. Andreeva L. E. (1955), *Raschet gofrirovannyih membran, kak anizotropnyih plastinok. [Calculation of corrugated membranes as anisotropic plates]*, AN SSSR, otdelenie tehnikeskikh nauk, institut mehaniki: Inzhenernyiy sbornik. – M.: AN SSSR., No. 21, pp. 128–141. [in Russian] 4. Andreeva L. E. (1956), *Raschet harakteristik gofrirovannyih membran Priborostroenie. [Calculation of corrugated membrane characteristics]*, Moscow: MASHGIZ, No. 3, pp. 11–17. [in Russian]. 5. Koreniev R. V. (2018), *Vpliv virtualnih nedoskonalostey na napruzhenno-deformovaniy stan i stiykist spetsialnih obolonkovih sistem. [The impact of virtual imperfections on the stress-strain state and stability of the special shell]*. *Komunalne gospodarstvo mist: naukovno-tehnichniy zbirnik*, No. 140, pp. 109–119. [in Ukrainian]. 6. Bilik A. S., Laponov A. S., (2012), *Viznachennya geometrichnih harakteristik holodnoformovanih tonkostinnih arkovih profiliv [Determination of geometrical characteristics of cold-formed thin-walled arched profiles]*. *Zb. naukovih pr.* – Kyiv: Ukrayinskiy In-t stalevih konstruktsiy Im. V. M. Shimanovskogo, No. 9, pp. 193–203. [in Ukrainian]. 7. Babaev V. M., BugaEvskiy S. O., Evel S. M., Evzerov I. D., Lantuh-Lyaschenko A. I., Shevetovskiy V. V., Shimanovskiy O. V., Shmukler V. S., (2017), *Chiselni ta eksperimentalni metodi ratsionalnogo proektuvannya ta zvedennya konstruktivnih sistem, [Numerical and experimental methods of rational design and construction of constructive systems]*, Vidavnistvo “Stal”, Kyiv, 404 p. [in Ukrainian]. 8. Gorodetskiy A. S., Shmukler V. S., Bondarev A. V. (2003). *Informatsionnyie tehnologii raschyota i proektirovaniya stroitelnyih konstruktsiy. [Information technology calculation and design of building structures]*. NTU “HPI”, Harkov, 889 p. [in Russian]. 9. Vlasov V. Z. (1962). *Izbrannyye trudyi. Obschaya teoriya obolochek. Tom 1. [Selected Works. The general theory of shells. Volume 1.]*. Moscow: izdatelstvo akademii nauk, 528 p. [in Russian]. 10. Baykov V. N., Hampe E, Raue E. (1990). *Proektirovanie zhelezobetonnyih tonkostennyih prostranstvennyih konstruktsiy. [Design of reinforced concrete thin-walled spatial structures]*. Moscow: Stroyizdat, 232 p. 11. Birger I. A., Panovko Ya. G. (1968), *Prochnost, ustoychivost, kolebaniya. Tom 3. [Durability, stability, fluctuations. Volume 3]*, “Mashinostroenie”, Moscow, 567 p. [in Russian].