

**РОБОТА МЕТАЛЕВОГО ОДНОШАРОВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО СТЕРЖНЕВОГО ПОКРИТТЯ З ЖОРСТКИМИ ПІДКРІПЛЮЮЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ**

О. І. Сіянов

*За допомогою програмного комплексу ЛИРА вперше здійснено перевірку доцільності використання одиничних та подвійних жорстких підкріплюючих елементів у складі металевого одношарового циліндричного стержневого покриття. На конкретному прикладі виконано побудову просторової скінчено-елементної моделі та розрахунок двох варіантів підкріпленого покриття. В результаті розрахунку за отриманими кольоровими схемами візуалізації виявлено схожі закономірності розподілу поздовжніх сил в елементах та майже однакові тенденції розташування переміщень вузлів по поверхні покриття з обома варіантами підкріплення.*

*При помощи программного комплекса ЛИРА впервые осуществлена проверка целесообразности использования одиночных и двойных жестких подкрепляющих элементов в составе металлического однослойного цилиндрического стержневого покрытия. На конкретном примере выполнено построение пространственной конечно-элементной модели и расчет двух вариантов подкрепленного покрытия. В результате расчета по полученным цветным схемам визуализации выявлены похожие закономерности распределения продольных сил в элементах и почти одинаковые тенденции расположения перемещений узлов по поверхности покрытия с обоими вариантами подкрепления.*

*In programmatic complex LIRA for the first time is carried out check of expediency of usage of single and double rigid stiffeners in a structure of metal one layer cylindrical core covering. On a concrete example the construction space certainly of element model and calculation of two versions of reinforced covering is executed. As a result of calculation under the obtained colour schemes of rendition are detected of regularity of distribution of longitudinal forces in members and tendency of arrangement of movements of knots on a surface of covering with both versions of reinforcement.*

**Постановка питання. Аналіз публікацій**

Сучасне використання металевих одношарових циліндричних стержневих покриттів обмежено габаритними розмірами конструкції, відсутністю замовлень проектних рішень масового виробництва, недосконалістю чинної нормативної бази. Для вирішення такого переліку задач потрібна комплексна робота із залученням широкого кола спеціалістів.

Нині певні зрушення в даному напрямку вже є, про що свідчать публікації у наукових фахових виданнях в Україні та за її межами [1–16]. Між тим велика кількість робіт присвячена розрахунку вказаних покриттів без використання підкріплюючих елементів [7–10]. Втім збільшення параметрів напружено-деформованого стану зазначених конструкцій характерне у випадку підвищення габаритних розмірів покриттів у плані, а при досягненні максимальної (з точки зору безпеки втрати несучої здатності) геометричної форми, покриття потребує прийняття конкретних заходів [3–16].

**Формулювання мети роботи**

Тому для підвищення експлуатаційних можливостей просторової конструкції в даній статті запропоновано перевірити доцільність введення в розрахункову схему покриття використання додаткових жорстких підкріплюючих елементів, розташованих за напрямком ламаної лінії покриття [4, 13, 14].

**Обґрунтування розрахункової схеми покриття**

Ґрунтуючись на досвіді дослідження конструктивних схем таких покриттів, прийнято рішення вибрати конструкцію, що утворюється з прямокутних чарунок, кожна з яких діагональним елементом поділена на два однакових трикутники.

Розмір покриття в плані вибрано  $B \times L = 24 \times 30$  м, стріла підйому  $f = 6,93$  м, кут описаного кола поперечного перерізу просторової конструкції  $\alpha = 120^\circ$  (рис. 1). Кількість чарунок уздовж довжини та ламаної лінії покриття прийнято 8 [13]. Загальне число елементів, завдяки яким сформована циліндрична просторова стержнева система, 208, вузлів разом з опорними – 81. Діагональний ( $d = 5,2$  м) і поздовжній ( $l = 3,75$  м) елементи в кожній із чарунок розташовані між собою під кутом  $\varphi = 43,97^\circ$ .

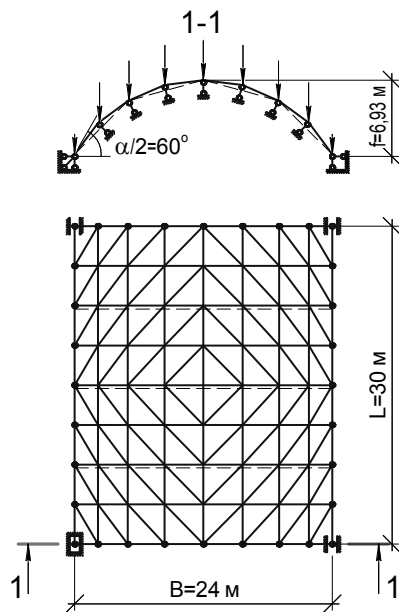


Рис. 1. Розрахункова схема підкріпленого покриття

Додаткові жорсткі підкріплюючі елементи встановлені у двох варіантах (рис. 2). Перший варіант передбачав розташування їх у кількості 12 штук за напрямком ламаної лінії покриття. Кожний з них через вузол по довжині за винятком торців об'єднував дві поздовжні грані просторової конструкції. Другий варіант відрізнявся від першого подвійною кількістю додаткових жорстких підкріплюючих елементів, які в місцях з'єднання двох поздовжніх граней просторової конструкції прикріплювались до покриття підпірками.



Рис. 2. Фрагменти поперечного перерізу покриття, підкріпленого: а – одним елементом; б – двома елементами з підпіркою

Рівномірно розподілене експлуатаційне навантаження отримано як наближене середнє значення за картами районування території України [17] та з урахуванням впливу захисних елементів, що склало  $q = 0,2$  т/м<sup>2</sup>. Вантажні площі розраховувались для кутових  $A_1$ , контурних  $A_2$ ,  $A_3$  та серединних  $A_4$  ділянок поверхні:

$$A_1 = 0,25 \cdot l \cdot h ;$$

$$A_2 = A_3 = 0,5 \cdot l \cdot h ;$$

$$A_4 = l \cdot h ,$$

де  $l = 3,75$  м,  $h = 3,6$  м – сторони чарунки уздовж довжини та ламаної лінії покриття.

Через розраховані вантажні площі  $A_1 \dots A_4$  здійснювався перехід від зазначеного рівномірно розподіленого експлуатаційного навантаження  $q$  до зосереджених сил у вузлах  $F_1 \dots F_4$ :

$$F_1 = A_1 \cdot q ;$$

$$F_2 = F_3 = A_2 \cdot q = A_3 \cdot q ;$$

$$F_4 = A_4 \cdot q .$$

Показники  $A_1 \dots A_4$  та  $F_1 \dots F_4$  наведені в таблиці 1.

Передбачено виготовлення металевого покриття зі сталі Вст3пс. Просторова конструкція закріплена по контуру в опорних вузлах. Лінійні переміщення заборонені в одному кутковому вузлі. В трьох інших куткових вузлах дозволений рух тільки у поздовжньому горизонтальному напрямку. У решти контурних вузлів закріплення від переміщень прийнято по вертикалі.

**Числові значення вантажних площ та величини вузлових навантажень підкріпленого покриття**

Вантажні площі	Числові значення, м <sup>2</sup>	Вузлові навантаження	Величини, т
$A_1$	3,38	$F_1$	0,68
$A_2=A_3$	6,75	$F_2=F_3$	1,35
$A_4$	13,5	$F_4$	2,7

**Моделювання і розрахунок покриття**

Для зручності і швидкості розрахунку просторової конструкції використано програмний комплекс ЛИРА, за допомогою якого виконано побудову скінченно-елементної моделі покриття.

Враховуючи метод геометричного формоутворення, використовувалась циліндрична поверхня обертання та задавався прямокутний тип решітки з діагональним елементом всередині. В процесі побудови за замовчуванням елементам надавався універсальний стержень (СЕ 10) (рис. 3) [18].

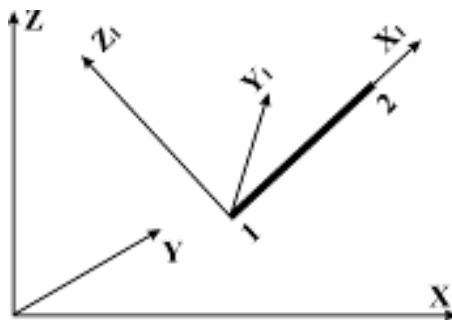


Рис. 3. Схема можливого розташування СЕ 10 у просторі з власною місцевою системою координат

На завершення, окремо, до сформованої стержневої системи додавались жорсткі підкріплюючі елементи.

Таким чином створювалась скінченно-елементна модель підкріпленого просторового циліндричного стержневого покриття із заданою геометрією (рис. 4).

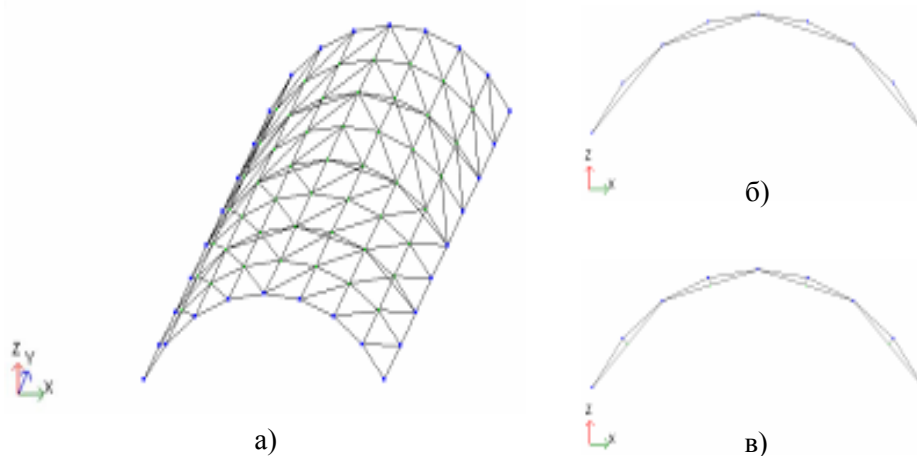


Рис. 4. Візуалізація скінченно-елементної моделі підкріпленого просторового циліндричного стержневого покриття у програмному комплексі ЛИРА: а – об’ємний вид; б – поперечний вид; в – поперечний вид із підпірками

Зв'язки в контурних (опорних) вузлах задавались так, щоб уникнути геометричної змінності конструкції згідно з прийнятою розрахунковою схемою покриття.

Характеристики жорсткості приймалися, виходячи із базових типів перерізу, які наведені у програмному комплексі ЛИРА. Елементом просторової конструкції, у тому числі додатковим для підкріплення, попередньо надавався поперечний переріз у формі прокатного трубчастого профілю, отриманого в гарячокатаному безшовному варіанті.

Навантаження від власної ваги покриття враховувалось за допомогою програмного комплексу ЛИРА після призначення кожному елементу характеристик жорсткості.

Експлуатаційне навантаження прикладалось до просторової конструкції у вигляді зосереджених сил у вузлах. Кількість отриманих значень вузлових навантажень відповідала числу розрахованих вантажних площ.

Визначення параметрів напружено-деформованого стану покриття здійснювалось шляхом виконання розрахунку у програмному комплексі ЛИРА.

Результати, отримані у вигляді кольорових схем деформування, мозаїк зусиль та переміщень, епюр внутрішніх силових факторів, таблиць стандартної та інтерактивної форм, дозволили надати повну інформацію про роботу просторової конструкції та оцінити експлуатаційні можливості підкріпленого покриття.

За допомогою ЛІРСтк програмного комплексу ЛИРА розраховувались також параметри перерізу кожного елемента просторової конструкції.

### Результати розрахунку покриття

Розрахунок покриття проводився за двома варіантами підкріплення (рис. 4, б, в). Робота покриття аналізувалась за тенденціями розподілу зусиль в елементах та закономірностями розташування лінійних за траєкторією переміщень вузлів.

Зусилля в елементах визначались у чотирьох основних напрямках: поздовжньому, поперечному, діагональному та з площини покриття для підкріплюючих елементів.

В результаті розрахунку виявилось, що, незалежно від варіанта підкріплення, в кожному елементі просторової конструкції за умови дії експлуатаційного навантаження фіксувались зусилля різних знаків. Для СЕ 10 з власною місцевою системою координат загальноприйнятій конкретні правила визначення знаку таких зусиль. Згідно з рис. 5 [18], за напрямком стрілок, зусилля в елементах вважаються зі знаком "+", а в зворотному напрямку – зі знаком "-".

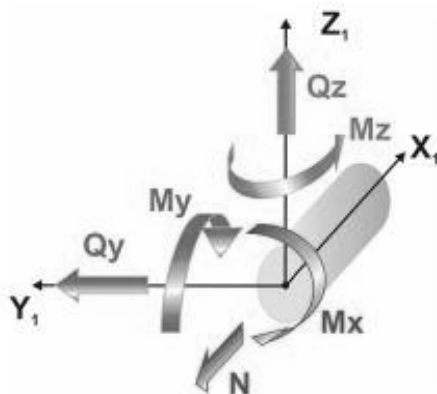


Рис. 5. Схема СЕ 10 з напрямком зусиль зі знаком "+" в кінцевому перерізі елемента

Оцінюючи за результатами розрахунку числові значення зусиль, можна відмітити, що найбільшими з них виявились поздовжні сили, які піддавались ретельному аналізу за тенденціями розподілу та концентрацією по поверхні.

Переміщення вузлів фіксувались у горизонтальному та вертикальному напрямках. Знак вузлових переміщень визначався в глобальній системі координат за конкретним правилом: знак "+" приймався тоді, коли напрямок переміщення вузла і осі X, Y або Z збігався, знак "-" – коли їх напрямки відрізнялись один від одного.

Проведений розрахунок дозволив виявити найбільш небезпечні ділянки підкріпленого покриття з точки зору концентрації зусиль та переміщень по поверхні. Проаналізовано кожний з двох варіантів підкріплення покриття.

У результаті розрахунку просторової конструкції за першим варіантом підкріплення (рис. 4, б), встановлено, що максимальні значення осьових сил (далі зусиль) виявились в розтягнутих поздовжніх опорних елементах середньої ділянки двох нижніх граней покриття. Найбільші значення зусиль розтягу і стиску зафіксовані в елементах, наближених до кутових ділянок покриття. У торцевих площинах верхні суміжні елементи розтягувались, нижні – стискались. В кутових ділянках окремі поздовжні та поперечні елементи теж працювали на стиск. В гранях наближених до середини покриття істотно стиснутими виявились поздовжні елементи, кожний ряд яких одночасно належав до верхніх поздовжніх елементів другої грані та нижніх поздовжніх елементів грані ділянки гребеня.

Зведення в таблицю 2 максимальних поздовжніх сил в елементах за наявними напрямками по контуру і в серединній поверхні дозволило виявити найбільш навантажені місця покриття.

Таблиця 2

**Максимальні поздовжні сили в елементах покриття з першим варіантом підкріплення в залежності від напрямків їх розташування у просторі**

Напрямок розташування елемента	Максимальні поздовжні сили в елементах, т			
	контурних		серединної поверхні	
	розтяг	стиск	розтяг	стиск
поперечний	+23,69	-21,63	–	-24,16
поздовжній	+40,73	–	–	-23,85
діагональний	–	–	+27,82	-1,74
з площини покриття	–	–	+5,52	-3,09

Втім отримані за результатами розрахунку зусилля в елементах не давали інформацію про характер деформування покриття. Під дією експлуатаційного навантаження просторова конструкція змінювала свою конфігурацію в різних проекціях у просторі. Основним показником у даному випадку виступали отримані переміщення вузлів, які вказували на уразливі місця в конструкції. Викривлення початкової (до дії експлуатаційного навантаження) поперечної кругової форми відбувалось шляхом розповзання та прогинання великих ділянок покриття. Ряд найбільших горизонтальних переміщень вузлів, у тому числі максимальних, виявлених в середні довжини покриття, спостерігався в опорних ребрах нижніх граней. Максимум вертикальних переміщень вузлів зафіксовано в середніх ребрах просторової конструкції в гранях, суміжних з гранями ділянки гребеня. Крім того, значно опустились вузли верхніх ребер нижніх граней та істотно змістився по вертикалі центральний верхній вузол покриття.

Максимальні переміщення вузлів наведені в таблиці 3, показали ступінь уразливості окремих ділянок покриття.

Таблиця 3

**Максимальні переміщення вузлів покриття з першим варіантом підкріплення в залежності від напрямків їх розташування у просторі**

Напрямок переміщення вузлів		Максимальні переміщення вузлів, мм		
		контурних		серединної поверхні
		на торцях	ребер	
горизонтальний	X	3,1	61,38	13,36
	Y	14,46	14,93	12,8
вертикальний	Z	–	–	70,05

Розрахунок покриття з другим варіантом підкріплення не змінив характеру розподілу зусиль в елементах. Зазнали змін лише їх числові значення. Зокрема зменшились, а в деяких місцях зросли зусилля в елементах по поверхні та збільшились зусилля в окремих підкріплюючих елементах, причому в тих з них, які від підпірок орієнтовані за напрямком до гребеня. Середні значення зусиль кожної пари підкріплюючих елементів, з'єднаних між собою з підпіркою виявились більшими (на 6...18 %) ніж єдині значення зусиль, отримані в одиничних підкріплюючих елементах. Виняток зафіксовано тільки в парах кутових ділянок покриття з відхиленням 0,2 %.

Отримані максимальні поздовжні сили (таблиця 4) вказували на найбільш навантажені елементи, що розташовувались за наявними напрямками по контуру і в серединній поверхні покриття. Поділ кожного підкріплюючого елемента на два та встановлення підпірок зменшило максимальні поздовжні сили (на 0,1...5 %) за винятком розтягу (збільшення на 0,3 %) в контурних елементах покриття. В підкріплюючих елементах збільшились максимальні поздовжні сили як розтягу (на 8 %), так і стиску (на 43 %). Таке підвищення поздовжніх сил викликано тим, що підкріплюючі елементи прийняли на себе частину експлуатаційного навантаження на покриття.

Таблиця 4

**Максимальні поздовжні сили в елементах покриття з другим варіантом підкріплення в залежності від напрямків їх розташування у просторі**

Напрямок розташування елемента	Максимальні поздовжні сили в елементах, т			
	контурних		серединної поверхні	
	розтяг	стиск	розтяг	стиск
поперечний	+23,75	-21,61	–	-24,15
поздовжній	+40,52	–	–	-23,69
діагональний	–	–	+27,78	-1,65
з площини покриття	–	–	+5,94	-4,43

Зменшення довжини підкріплюючих елементів з одночасним збільшенням їх кількості та введення додаткових елементів (підпірок) ніяк не вплинуло на закономірності розташування переміщень вузлів. Змінились лише їх числові значення. Зокрема зменшились, а в деяких місцях зросли переміщення вузлів просторової поверхні порівняно з переміщеннями, отриманими у випадку покриття з першим варіантом підкріплення.

Не винятком стала і зміна максимальних переміщень вузлів (таблиця 5), отриманих в характерних ділянках покриття. Причому відхилення контурних вузлів не перевищували 1 %. Максимальне горизонтальне розповзання та величина найбільшого прогину вузлів серединної поверхні зменшились відповідно на 6 % і 2 %.

Таблиця 5

**Максимальні переміщення вузлів покриття з другим варіантом підкріплення в залежності від напрямків їх розташування у просторі**

Напрямок переміщення вузлів		Максимальні переміщення вузлів, мм		
		контурних		серединної поверхні
		на торцях	ребер	
горизонтальний	X	3,1	60,9	12,6
	Y	14,35	14,86	12,7
вертикальний	Z	–	–	68,47

Візуально за допомогою програмного комплексу ЛИРА проілюстровано розподіл зусиль в елементах та переміщень вузлів одного з двох варіантів підкріпленого покриття шляхом наочного подання мозаїки та епюри поздовжніх сил (рис. 6, 7), а також мозаїки вертикальних і горизонтальних переміщень вузлів (рис. 8, 9).

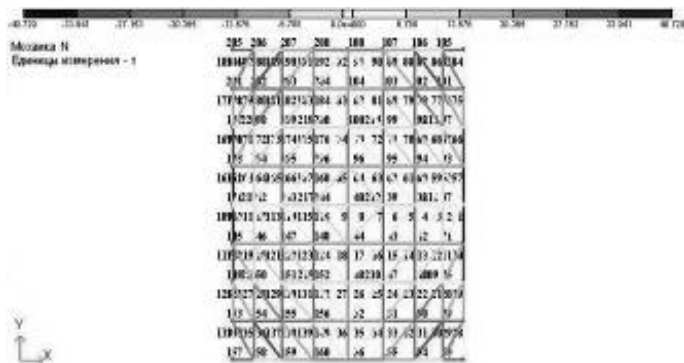


Рис. 6. Мозаїка поздовжніх сил в елементах підкріпленого покриття в плані

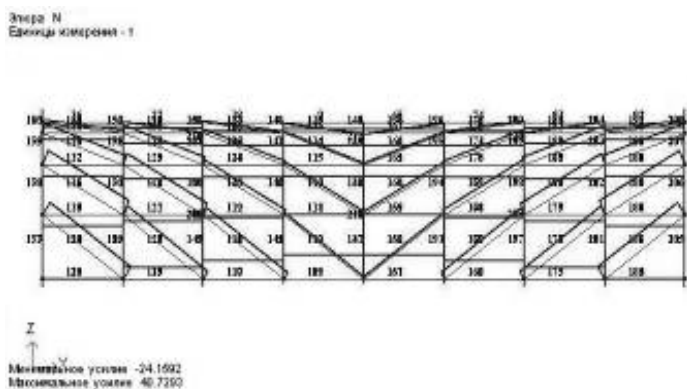


Рис. 7. Епюра поздовжніх сил в елементах підкріпленого покриття на вигляді збоку

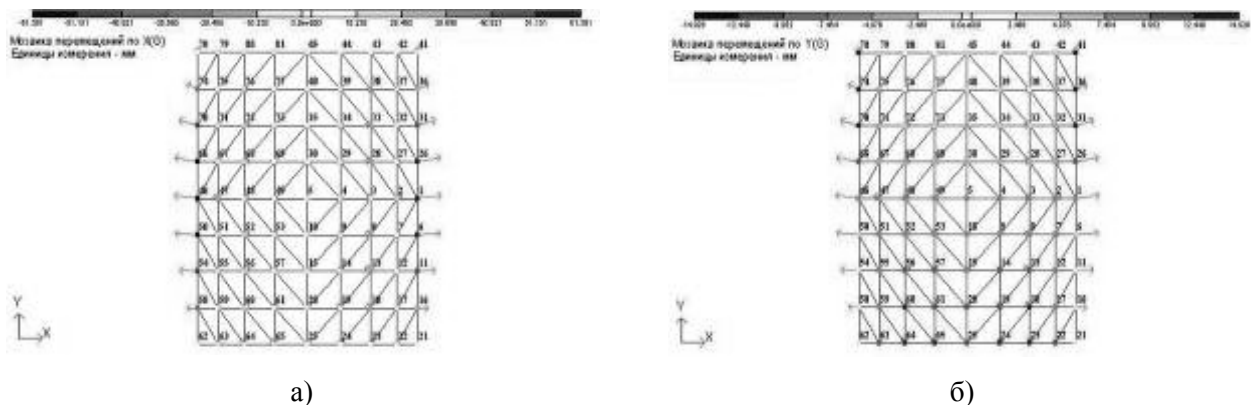


Рис. 8. Мозаїка горизонтальних з векторами переміщень вузлів підкріпленого покриття в плані за напрямками: а – X; б – Y

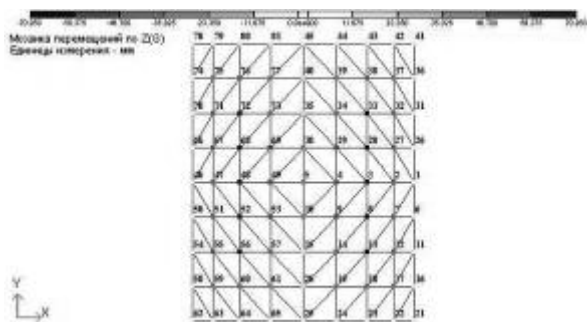


Рис. 9. Мозаїка вертикальних переміщень вузлів підкріпленого покриття в плані за напрямком Z

Кожна мозаїка містила кольори більшої та меншої насиченості, вказуючи на відповідне числове значення зусилля в елементах (рис. 6) та переміщення вузлів (рис. 8, 9).

Отримані в графічному вигляді результати розрахунку покриття, підкріпленого за обома варіантами не виявили відмінностей розподілу зусиль в елементах та переміщень вузлів. Різницю зафіксовано лише за числовими значеннями під кольоровими діаграмами.

За отриманими мозаїками оцінювався також порядок зміни зусиль в характерних ділянках підкріпленого покриття.

Найбільш показовими виявились тенденції розподілу зусиль стиску і розтягу по поверхні покриття за певними напрямками (рис. 10–15).

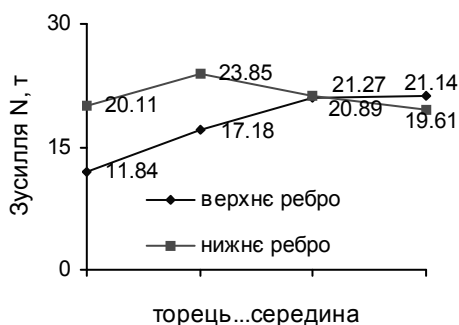


Рис. 10. Зміна зусиль N в стиснутих поздовжніх елементах в грані, суміжній з гранню гребеня на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

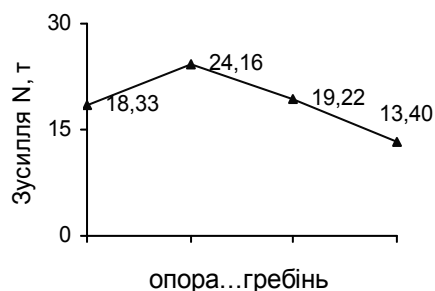


Рис. 11. Зміна зусиль N в стиснутих поперечних елементах на відстані 0,125L від торця в 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

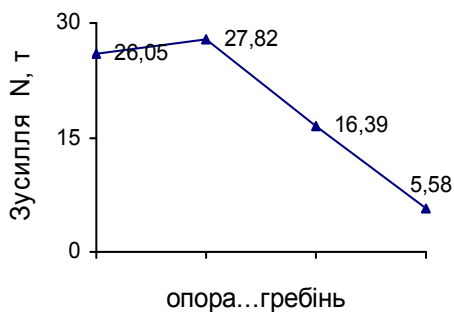


Рис. 12. Зміна зусиль N в розтягнутих діагональних елементах, які прилягають до торця на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

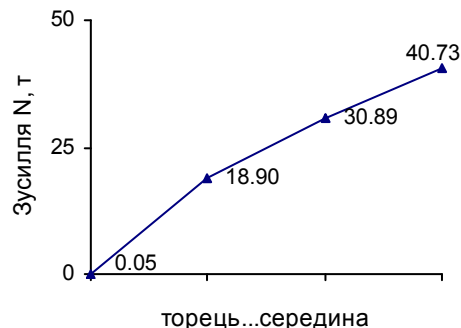


Рис. 13. Зміна зусиль N в розтягнутих поздовжніх опорних елементах на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок



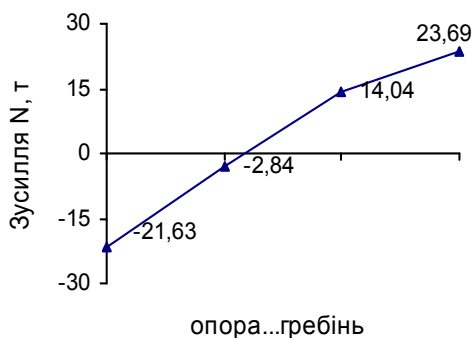


Рис. 14. Зміна зусиль N зі зміною знака в поперечних торцевих елементах на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

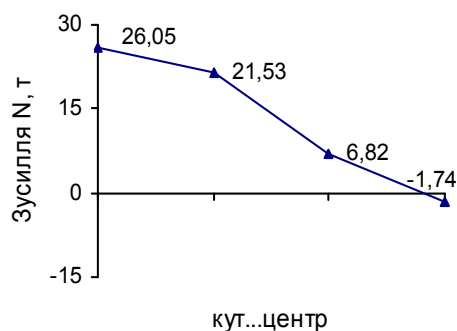


Рис. 15. Зміна зусиль N зі зміною знаку в діагональних елементах на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

Для отримання остаточної та повної інформації про роботу підкріпленого покриття виконувалась оцінка зміни горизонтальних і вертикальних переміщень вузлів у найбільш показових ділянках. Характерні тенденції в даному випадку наведено на рис. 16-21.

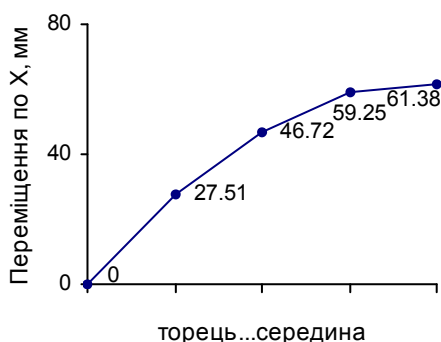


Рис. 16. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X в поздовжньому опорному ребрі на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

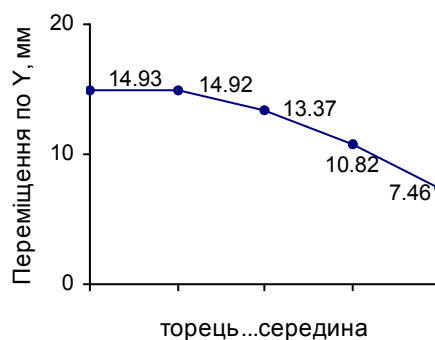


Рис. 17. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком Y в поздовжньому опорному ребрі на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

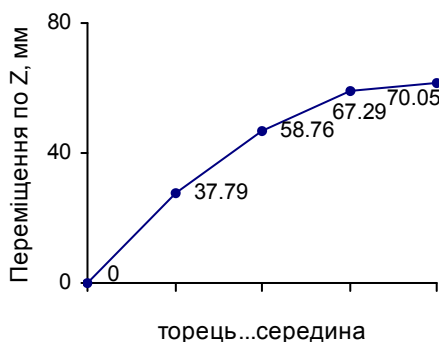


Рис. 18. Зміна вертикальних переміщень вузлів за напрямком Z в поздовжньому верхньому ребрі другої грані на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

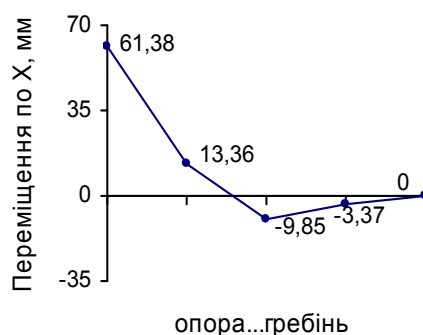


Рис. 19. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X зі зміною знака на відстані 0,5L від торця в 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

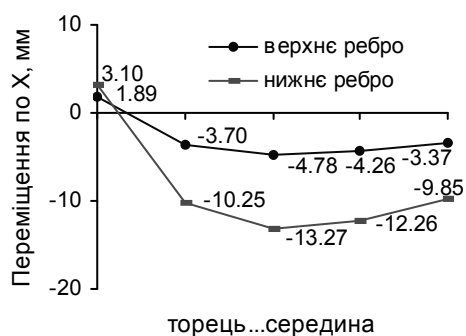


Рис. 20. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X зі зміною знака в грані, суміжній з гранню гребеня на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

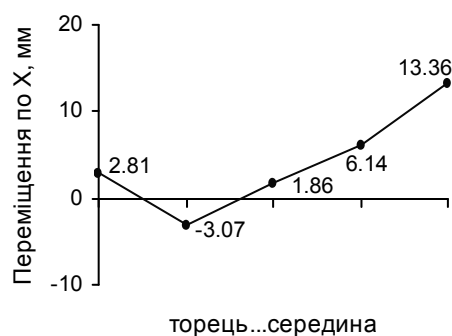


Рис. 21. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X зі зміною знака у верхньому поздовжньому ребрі нижньої опорної грані на 1/4 покриття за варіантом підкріплення без підпірок

Заміна кожного підкріплюючого елемента на два та встановлення підпірок дозволила оцінити закономірності зміни зусиль в характерних ділянках підкріпленого покриття. Тенденції розподілу стискаючих і розтягуючих зусиль по поверхні покриття визначались за певними напрямками (рис. 22–27).

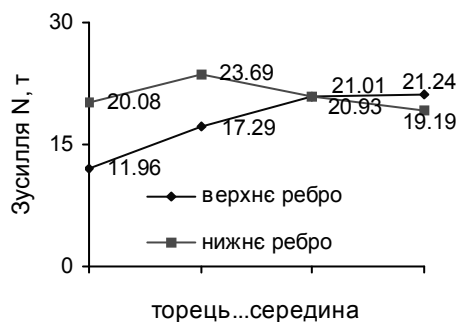


Рис. 22. Зміна зусиль N в стиснутих поздовжніх елементах в грані, суміжній з гранню гребеня на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

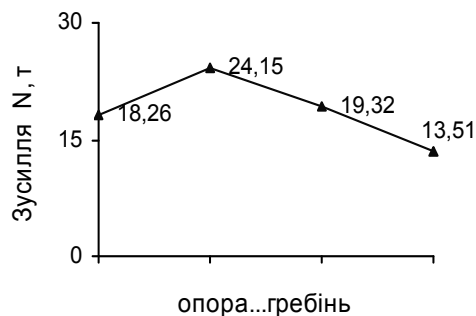


Рис. 23. Зміна зусиль N в стиснутих поперечних елементах на відстані 0,125L від торця в 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

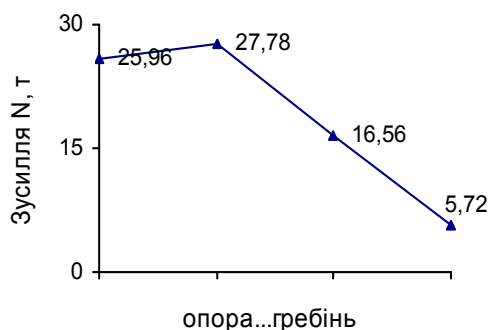


Рис. 24. Зміна зусиль N в розтягнутих діагональних елементах, які прилягають до торця на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

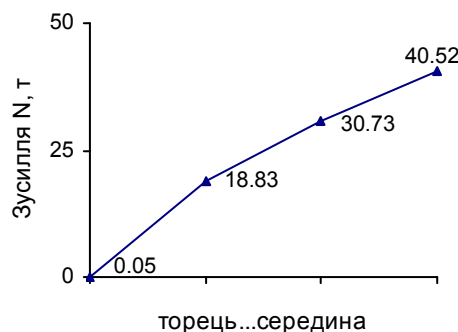


Рис. 25. Зміна зусиль N в розтягнутих поздовжніх опорних елементах на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

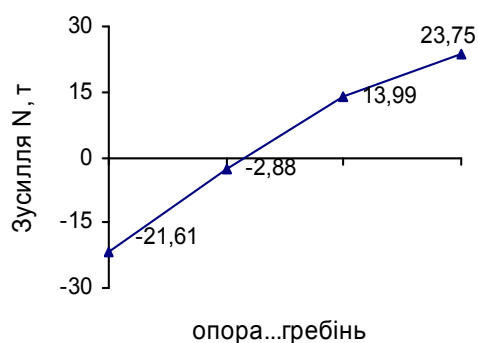


Рис. 26. Зміна зусиль N зі зміною знака в поперечних торцевих елементах на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

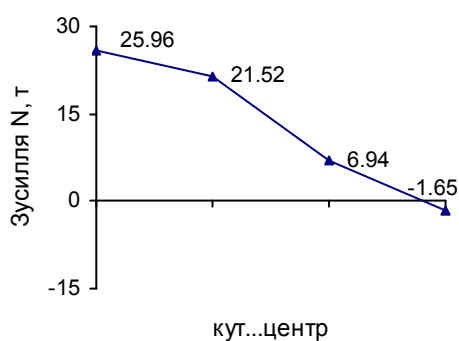


Рис. 27. Зміна зусиль N зі зміною знака в діагональних елементах на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

Закономірності деформування покриття, підкріпленого подвійною кількістю елементів з підпірками, визначались через зміну горизонтальних і вертикальних переміщень вузлів за певними напрямками. Особливості викривлення форми окремих ділянок покриття наведено на рис. 28-33.

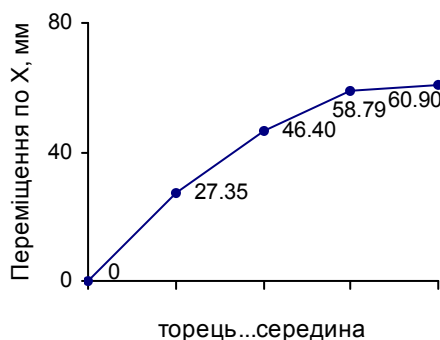


Рис. 28. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X в поздовжньому опорному ребрі на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

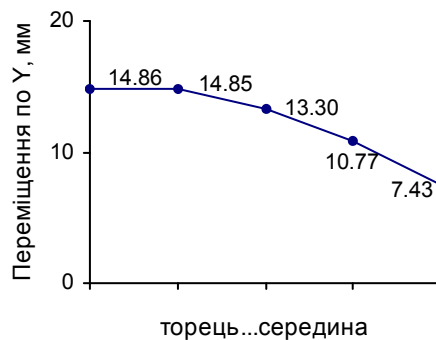


Рис. 29. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком Y в поздовжньому опорному ребрі на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

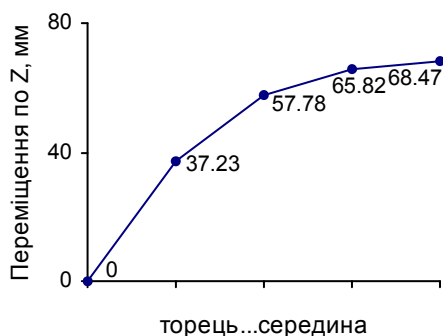


Рис. 30. Зміна вертикальних переміщень вузлів за напрямком Z в поздовжньому верхньому ребрі другої грані на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

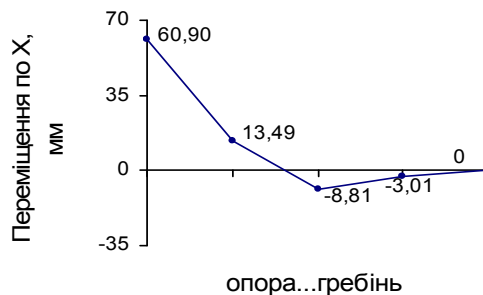


Рис. 31. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X зі зміною знака на відстані 0,5L від торця в 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

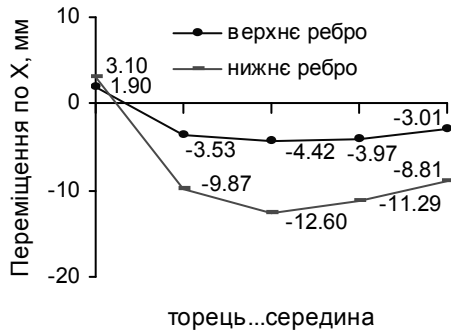


Рис. 32. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X зі зміною знака в грані, суміжній з гранню гребеня на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

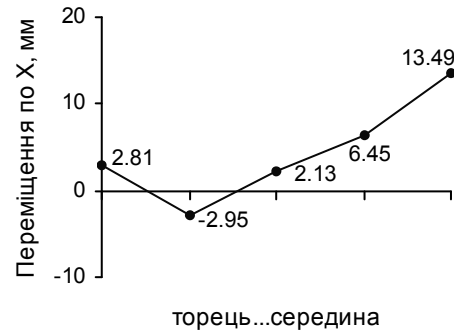


Рис. 33. Зміна горизонтальних переміщень вузлів за напрямком X зі зміною знака у верхньому поздовжньому ребрі нижньої опорної грані на 1/4 покриття за варіантом підкріплення з підпірками

Порівняння отриманих даних зміни зусиль та переміщень по поверхні покриття, підкріпленого за двома варіантами, показало неоднозначний результат. В одних ділянках введення подвійної кількості підкріплюючих елементів з підпірками справило істотний позитивний вплив на роботу покриття. Проте в інших або не дало ефекту, або навпаки збільшило, хоча і на малу величину, зусилля в елементах та переміщення вузлів.

Зіставлення даних рис. 10 і рис. 22 дозволило зафіксувати протилежну за значеннями зміну зусиль в стиснутих поздовжніх елементах обох ребер в грані, суміжній з гранню гребеня. Зокрема, підкріплення покриття більшою кількістю елементів розвантажило нижнє ребро та підвищило зусилля в елементах верхнього ребра. Причому від торця до середини покриття у нижньому ребрі різниця в значеннях зусиль зростала, а у верхньому ребрі за винятком четвертого елемента – знижувалась.

Аналогічний характер зміни зусиль при введенні подвійної кількості підкріплюючих елементів з підпірками спостерігався в стиснутих поперечних елементах на відстані 0,125L від торця, де від опори до гребеня (рис. 11 і рис. 23) перший опорний елемент отримав розвантаження, у другому величина зусиль майже не змінилась, а в двох решти – фіксувалось зростання зусиль в елементах.

Після поділу кожного з підкріплюючих елементів на два та введення підтримуючих елементів (підпірок) відмічена закономірність зміни зусиль в розтягнутих діагональних елементах (рис. 12 і рис. 24), де в тих з них, які прилягали до торця, виявлено зменшення зусиль в перших двох елементах від опори та порівняно вагоме збільшення зусиль в решти двох елементах від ділянки гребеня.

Дуже слабо, але позитивно вплинуло подвоєння кількості підкріплюючих елементів з підпірками на зміну зусиль в розтягнутих поздовжніх опорних елементах (рис. 13 і рис. 25). Причому в першому елементі від торця не встановлено різниці, а в решти трьох елементах виявлено зменшення зусиль, до того ж, в двох останніх з них, наближених до середини довжини покриття, зусилля зменшились з однаковим відхиленням.

Зовсім по-різному і насамперед негативно змінились зусилля в поперечних торцевих елементах від введення подвійних підкріплюючих елементів з підпірками (рис. 14 і рис. 26). Збільшились зусилля в другому та останньому елементах, зменшились в першому та третьому елементах від опори до гребеня. Найбільша різниця зафіксована в другому елементі, найменша в першому.

Схожий хаотичний характер демонструвала зміна зусиль в діагональних елементах від кута до центру покриття після введення подвійної кількості підкріплюючих елементів та встановлення підпірок (рис. 15 і рис. 27). Позитивно у такий спосіб зреагували перший, дещо другий та досить суттєво останній елементи, серед яких найменше відхилення зусиль встановлено для другого, а найбільше для останнього елемента. Збільшення зусиль виявлено лише в передостанньому третьому елементі.

Вплив збільшення кількості підкріплюючих елементів з підпірками на форму викривлення покриття через зміну горизонтальних переміщень вузлів за напрямком  $X$  в поздовжньому опорному ребрі (рис. 16 і рис. 28) виявився позитивним і цілком прогнозованим. Від торця до середини покриття зменшилась величина розповзання вузлів і збільшувалась її різниця з однаковим відхиленням двох останніх вузлів за винятком кутового, на який накладалась заборона горизонтального переміщення за напрямком ширини покриття.

Рівномірно малий, але позитивний порядок зміни горизонтальних переміщень вузлів за напрямком  $Y$  спостерігався від введення більшого числа підкріплюючих елементів та влаштування підпірок в поздовжньому опорному ребрі (рис. 17 і рис. 29). Переміщення вузлів зменшились за схожим відхиленням. Однакове розвантаження отримали перші два вузли, один з яких виявився торцевим, а другий знаходився на відстані  $0,125L$  від торця. Найбільша різниця встановлена в третьому вузлі, за яким з наближенням до середини довжини покриття відхилення горизонтальних переміщень вузлів мало тенденцію до зменшення.

Досить позитивно спрацювало подвоєння кількості підкріплюючих елементів з підпірками на зміну вертикальних переміщень вузлів за напрямком  $Z$  в поздовжньому верхньому ребрі другої грані (рис. 18 і рис. 30). Прогини вузлів зменшились за винятком кутового, на який накладався зв'язок за вертикаллю. Різниця прогинання вузлів збільшувалась рівномірно від торця до середини довжини покриття. Найбільше відхилення виявлено на відстані  $0,5L$  від торця.

Заміна одиночних підкріплюючих елементів на подвійні з використанням підпірок справили істотний позитивний вплив на зміну горизонтальних переміщень вузлів за напрямком  $X$  на відстані  $0,5L$  від торця (рис. 19 і рис. 31). Однак тієї рівномірності в різниці розповзання вузлів, як в попередньому випадку, не спостерігалось. В другому вузлі від опори переміщення навіть збільшилось. Але в наступних вузлах, за винятком гребеневого, який виявився центром симетрії покриття, горизонтальні переміщення суттєво зменшились з майже однаковою різницею відхилень.

Зростання кількості підкріплюючих елементів з додаванням підпірок в основному зменшило горизонтальні переміщення вузлів за напрямком  $X$  в грані, суміжній з гранню гребеня (рис. 20 і рис. 32). Проте в торцевих вузлах особливих змін не зафіксовано. Зокрема в нижньому ребрі переміщення торцевого вузла зовсім не змінилось, а у верхньому збільшилось на дуже малу величину. В решти вузлах від торця до середини довжини покриття відмічались позитивні тенденції зміни переміщень вузлів. Лише в четвертому вузлі від торця у верхньому ребрі дещо порушилась закономірність, що проявилось в різниці зміни горизонтального переміщення з попереднім вузлом. Істотно зменшились відхилення вузлів верхнього і нижнього ребра на відстані  $0,5L$  від торця.

Встановлення підпірок, які дозволили зменшити довжину підкріплюючих елементів та вдвічі збільшити їх кількість, переважно негативно відобразилось на зміні горизонтальних переміщень вузлів за напрямком  $X$  у верхньому поздовжньому ребрі нижньої опорної грані (рис. 21 і рис. 33). В торцевому вузлі змін не відбулось. Однак, починаючи з середини довжини покриття до третього вузла, в якому виявлена найбільша різниця, переміщення вузлів збільшились.

Отримане збільшення зусиль в елементах, а також зростання переміщень вузлів за результатами заміни одиночних підкріплюючих елементів на подвійні з підпірками викликано нахилом до горизонту підпірок в сторону поздовжніх контурних ліній покриття. Дія підпірок навантажувала окремі елементи та змінювала напрямок переміщень деяких вузлів. Однак негативного впливу підпірок на опорне ребро уздовж довжини покриття не відмічено.

Крім того, за поздовжнім, поперечним та діагональним напрямками визначались максимальні зусилля в елементах.

Від торця до середини довжини покриття найбільш стиснутим виявився поздовжній другий елемент у нижньому ребрі в грані, суміжній з гранню гребеня. Найбільше за величиною зусилля розтягу зафіксовано в середньому поздовжньому опорному елементі.

У напрямку ширини покриття від опори до гребеня максимальний стиск отримав другий поперечний елемент, розташований на відстані  $0,125L$  від торця. Найбільший розтяг за ходом ламаної лінії покриття зафіксовано у другому діагональному елементі, який прилягав до торця.

На інших ділянках, де зусилля в елементах змінювали знак, не виявлено максимальних значень.

Найбільші переміщення вузлів визначались за координатними осями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Максимальні горизонтальні переміщення вузлів за напрямками  $X$  і  $Y$  встановлені в поздовжньому опорному ребрі відповідно на відстані  $0,5L$  від торця та в місці, протилежному повній забороні лінійних переміщень. Таке місце визначалось перетином контурних ламаної і твірної ліній покриття.

Найбільше вертикальне переміщення вузла за напрямком  $Z$  виявлено в поздовжньому верхньому ребрі другої грані в середині довжини покриття.

### Висновки

- За допомогою програмному комплексу ЛИРА вперше здійснено перевірку доцільності використання одиничних та подвійних жорстких підкріплюючих елементів у складі металевого одношарового циліндричного стержневого покриття.
- На конкретному прикладі виконано побудову просторової скінченно-елементної моделі та розрахунок двох варіантів підкріпленого покриття.
- В результаті розрахунку за отриманими кольоровими схемами візуалізації виявлено схожі закономірності розподілу поздовжніх сил в елементах та майже однакові тенденції розташування переміщень вузлів по поверхні покриття з обома варіантами підкріплення.
- Отримані результати показали неоднозначний вплив на роботу покриття заміни одиничних підкріплюючих елементів на подвійні. В одних ділянках фіксувалось зменшення параметрів загального стану покриття. Проте в інших або не спостерігалось змін, або навпаки відмічалось збільшення зусиль в елементах та переміщень вузлів. За двома варіантами підкріплення покриття найбільший розтяг отримали поздовжні опорні елементи в місцях максимального горизонтального переміщення вузлів, найбільший стиск – поперечні елементи на відстані  $0,125L$  від торця в гранях з найбільшим прогином вузлів.
- Суттєве значення на характер змін силових показників та факторів викривлення форми покриття справили підпірки, дія яких навантажувала окремі елементи та змінювала напрямки переміщень деяких вузлів. Однак негативного впливу підпірок на опорне ребро уздовж довжини покриття не відмічено.

### Використана література

1. Свердлов В. Д. Цилиндрическое пространственное стержневое покрытие (теоретическое и экспериментальное исследование) / В. Д. Свердлов. – В сб. науч. трудов [“Строительные конструкции”]. – Киев: Будівельник. – 1978. – Вып. 31. – С. 124-130.
2. Свердлов В. Д. Эффективные стержневые конструкции покрытий / В. Д. Свердлов, О. Д. Бойчук, О. І. Сіянов // Вісник ВПІ, 1998. – № 4. – С. 20-24.
3. Лебедев В. А. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере / В. А. Лебедев, Л. Н. Лубо. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 136 с.
4. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции / О. Патцельт / Пер. с немецк. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. – 95 с.
5. Попов И. Г. Цилиндрические стержневые системы / И. Г. Попов. – Л., М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. – 112 с.
6. Рюле Г. Пространственные покрытия / Г. Рюле // Конструкции и методы возведения / Пер. с немецк. – Том 2. – М.: Стройиздат, 1974. – 247 с.
7. Пшеничнов Г. И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок / Г. И. Пшеничнов. – М.: Наука, 1982. – 352 с.
8. Райт Д. Т. Большие сетчатые оболочки / Д. Т. Райт. – Л.: Стройиздат, 1966. – 11 с.
9. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек / ЛенЗНИИЭП. – Л., 1971. – 63 с.
10. Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции / А. Г. Трущев: Учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1983. – 215 с.
11. Свердлов В. Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий: дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01 “Строительные конструкции, здания и сооружения” / В. Д. Свердлов. – Киев, 1977. – 174 с.
12. Свердлов В. Д. Проблема стійкості одношарових циліндричних стержневих покриттів /

- В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов, О. Д. Бойчук // Современные строительные конструкции из металла и древесины. [“Сборник научных трудов”]. – Одесса: ОГАСА, 1999. – С. 169-174.
13. Свердлов В. Д. Металеві циліндричні стержневі покриття: [Монографія] / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. – 134 с.
14. Сіянов О. І. Аналіз конструктивних рішень металевих одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. [“Збірник наукових праць”]. – Рівне: НУВГП, 2004. – Вип. 11. – С. 279-282.
15. Сіянов О. І. Металеві одношарові циліндричні стержневі покриття: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 “Будівельні конструкції, будівлі та споруди” / О. І. Сіянов. – Київ, 2002. – 19 с.
16. Сіянов О. І. Теоретичні та експериментальні дослідження одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Вісник ВПІ, 2001. – № 3. – С. 13-18.
17. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – К.: Минстрой Украины, 2006. – 78 с.
18. Городецкий А. С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учеб. пособие / А. С. Городецкий, В. С. Шмуклер, А. В. Бондарев. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – 889 с.

**Сіянов Олександр Ілліч** – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету