

УДК 624.074.5

Про доцільність використання нового положення структурного модуля в металевому просторовому стрижневому покритті

Сіянов О.І., к.т.н.

Вінницький національний технічний університет, Україна

Анотація. Програмними засобами ЛИРА вперше перевірена доцільність використання в роботі зміни положення структурного модуля для конструкції металевого просторового стрижневого покриття. Згідно з заданою геометрією та двома випадками розташування розкосів у площині граней виконано побудову та здійснено розрахунок скінченноелементних моделей покриття. Шляхом аналізу кольорових мозаїк поздовжніх сил в елементах, а також лінійних і кутових переміщень вузлів виявлений негативний вплив зміненого положення структурного модуля та визначені небезпечні ділянки покриття.

Аннотация. Программными средствами ЛИРА впервые проверена целесообразность использования в работе изменения положения структурного модуля для конструкции металлического пространственного стержневого покрытия. Согласно заданной геометрии и двух случаев расположения раскосов в плоскости граней выполнено построение и осуществлен расчет конечноэлементных моделей покрытия. Путем анализа цветных мозаик продольных сил в элементах, а также линейных и угловых перемещений узлов выявлено отрицательное влияние измененного положения структурного модуля и определены опасные участки покрытия.

Abstract. By software LIRA for the first time is checked expediency of usage in activity of a repositioning of a structural module for a design of metal spatial core covering. According to given geometry and two cases of arrangement of drag struts in a plane of edges the construction is made and the calculation of certainly - element models of covering are carried out. By the analysis of the colour mosaics of longitudinal forces in members, and also linear and angular travels of clusters the negative influencing of a changed rule position of a structural module is detected and the dangerous sectors of covering are determined.

Ключові слова: металеві просторові стрижневі покриття, структурний модуль, комп'ютерна модель, розрахунок, параметри напружено-деформованого стану.

Вступ. Постановка задачі. Металеві просторові стрижневі покриття складаються як правило із багатьох елементів і мають регулярну повторювану стрижневу структуру. Елементи в таких конструкціях уніфіковані і розташовуються за однаковими напрямками у просторі. Завдяки своїй структурній формі дані покриття представляють собою систему об'ємних модулів повної заводської готовності або так званих структурних блоків. Кожний елемент несе свій вклад у роботу покриття. Одні елементи сприймають більші навантаження, інші працюють не в повну силу. Тому важливо підібрати раціональне конструктивне рішення окремого багато разів пов-

торюваного модуля, в кожному елементі якого максимально б використовувались властивості матеріалу.

Аналіз останніх робіт. Порівняно нещодавно одним із авторів опублікованої статті [1] запропонований структурний модуль (рис. 1), який захищений патентом України [2] та на даний момент вже перевірений в роботі просторової конструкції на залізничних шляхах. Крім того, з використанням цього модуля виконані розрахунки покриття автозаправної станції [3], криї стоянки автотранспорту, торговельного ринку та двоповерхового ангара в м. Вінниці. Причому для кожного із зазначених об'єктів розрахунки покриттів проводились з модулем, розташованим в одному положенні.

Виділення невирішених раніше питань та очікувані результати. Однак, існує думка про те, що робота покриття може змінитись у випадку встановлення такого модуля в іншому положенні. Як передбачається, дзеркальне відображення зверху вниз розкосів у площині граней (рис. 2) призведе до варіації параметрів напружено-деформованого стану покриття та справить вплив на експлуатаційні можливості об'єктів. Між тим положення діагонального елемента із площини граней слід залишити незмінним.

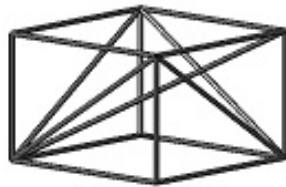


Рис. 1. Апробований структурний модуль

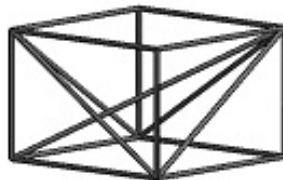


Рис. 2. Змінений структурний модуль

Мета роботи. Спробуємо на конкретному прикладі перевірити розрахункову схему металевих просторового стрижневого покриття зі зміненим положенням розкосів у площині граней та виконати порівняння її зі схемою з попередньою конфігурацією структурного модуля.

Геометричні параметри покриття. Розглянемо просторову стрижневу конструкцію з розмірами в плані $B \times L = 12 \times 24$ м (рис. 3). На основі рекомендованого співвідношення геометричних параметрів [4–6], прийнемо висоту структурного модуля та всієї конструкції покриття $f = 1$ м. Кількість модулів уздовж довжини і за напрямком меншої сторони покриття прийнято відповідно 16 та 8. Число елементів, з яких складається покриття, становить 1121. Вузлів виявлено 306, серед них опорними є 6. Кут нахилу розкосів до поясів граней, які утворюють покриття, $\varphi = 33,41^\circ$. Діагональні елементи із площини граней до горизонту розташовані під кутом $\varphi_1 = 25,14^\circ$. Довжина поздовжніх та поперечних елементів 1,5 м, розкосів 1,8 м, діагональних елементів 2,35 м.

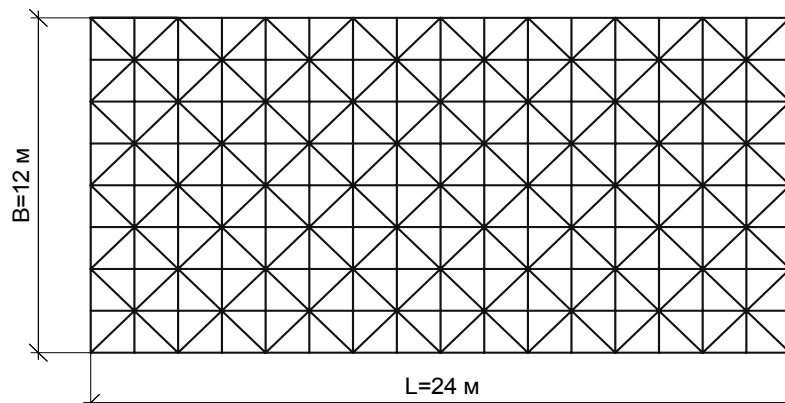


Рис. 3. Схема просторової стрижневої конструкції в плані

Розрахунок навантажень на покриття. Навантаження $q = 0,2$ т/м², яке прикладалось до поверхні покриття розраховувалось як експлуатаційне рівномірно розподілене з урахуванням рекомендацій нового нормативного документа [7] та шарів, що слугували захисними елементами.

Величини A і кількість n вантажних площ визначались на підставі числа і розмірів елементів, з'єднаних у вузлах. Кожна ділянка покриття характеризувалась своїм показником A_n . Кутовим вузлам відповідала вантажна площа A_1 , контурним A_2 , вузлам серединної поверхні A_3 :

$$A_1 = 0,25 \cdot l^2; \quad A_2 = 0,5 \cdot l^2; \quad A_3 = l^2,$$

де $l = 1,5$ м – довжина поздовжніх та поперечних елементів покриття.

Розрахунок вантажних площ A_n став основою для визначення зосереджених сил у вузлах $F_1 \dots F_3$:

$$F_1 = A_1 \cdot q; \quad F_2 = A_2 \cdot q; \quad F_3 = A_3 \cdot q.$$

Показники A_n і F_n наведені на рис. 4.

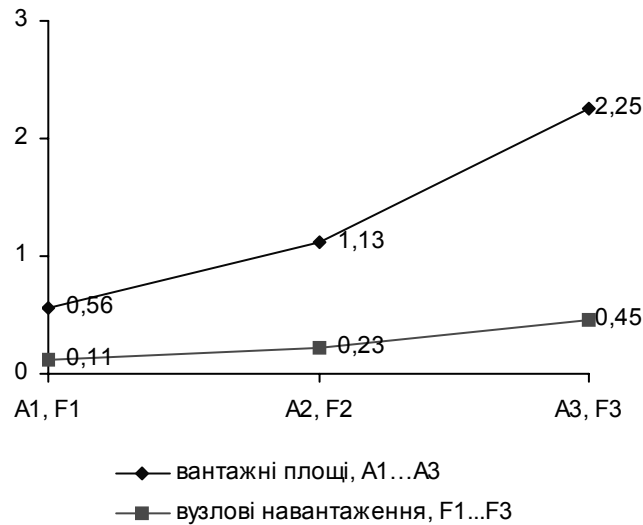


Рис. 4. Числові значення вантажних площ A_n , [м²] та величини вузлових навантажень F_n , [т] конструкції покриття

Згідно з отриманими результатами максимальне навантаження сприймали вузли серединної поверхні, мінімальне ті, що знаходились в кутах покриття.

Побудова комп'ютерної моделі і розрахунок покриття. Подальша робота виконувалась з використанням програмного комплексу ЛІРА [8–10], який дозволив виконати побудову комп'ютерної моделі та здійснити розрахунок металевого просторового стрижневого покриття.

Визначивши координати лише вісьмох вузлів та з'єднавши їх елементами у напрямку від меншого до більшого, виконувалось копіювання отриманого структурного модуля за віссю X та Y згідно з заданою геометрією та габаритними розмірами покриття.

Елементом за замовчуванням надавався універсальний просторовий стрижневий скінчений елемент (CE 10) (рис. 5) [10].

У результаті засобами програмного комплексу ЛІРА створювалась скінченноелементна комп'ютерна модель просторового стрижневого покриття (рис. 6).

Геометрична незмінність такої моделі забезпечувалась введенням зв'язків у кутових вузлах та розташуванням двох протилежних один одному верти-

кальних контурних зв'язків на середині довжини покриття. Повна заборона накладалась на лінійні переміщення в одному кутовому вузлі. Іншим кутовим вузлам дозволявся рух у напрямку більшої сторони покриття.

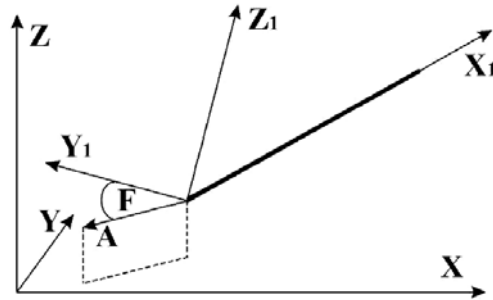


Рис. 5. Схема розташування СЕ 10 у просторі з власною місцевою системою координат

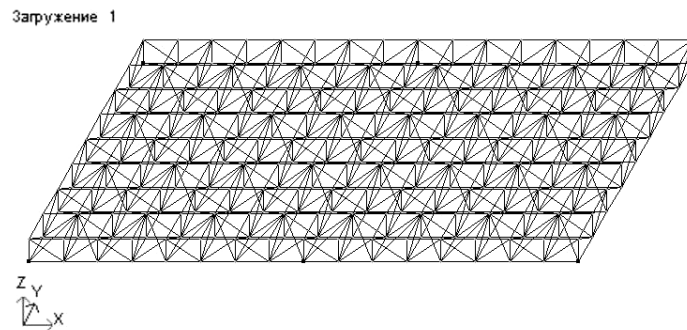


Рис. 6. Об'ємний вид конструкції покриття зі змінним положенням розкосів у площині граней

Кожному елементу попередньо призначалась жорсткість шляхом надання поперечному перерізу безшовного варіанта трубчастого профілю, отриманого гарячим прокатуванням через форму.

Після призначення елементам характеристик жорсткості використовувалась можливість автоматичного розрахунку навантаження від власної ваги просторової конструкції.

Отримані величини зосереджених сил прикладались до вузлів покриття у відповідності з розрахованими числовими значеннями вантажних площ.

Скінченноелементна модель просторової стрижневої конструкції розраховувалась за допомогою програмного комплексу ЛИРА.

Розрахункові результати, отримані у вигляді кольорових схем та інформативних таблиць, дозволили визначити параметри напружено-деформованого стану покриття. Заданий матеріал (сталь ВстЗпс) сприяв підбору перерізу трубчастого профілю для кожного елемента.

Результати роботи покриття. Результати роботи просторової стрижневої конструкції встановлювались за схемами візуалізації шляхом аналізу розподілу силових факторів та параметрів деформування по поверхні покриття.

Для порівняння наводились також результати роботи просторової конструкції з попереднім положенням структурного модуля.

Зусилля в елементах визначались за чотирма напрямками: поздовжнім, поперечним, похилим (в площині граней) та діагональним (з площини граней).

Як виявилось силові фактори відрізнялись за величиною та знаком. Положення згаданої раніше схеми універсального просторового стрижневого скінченного елемента (СЕ 10) визначалось власною місцевою системою координат та напрямками дії зусиль [10]. За даною схемою знак «+» приймався для зусилля, напрямок якого співпадав з напрямком стрілки, знак «-» – якщо не співпадав.

Із числових значень силових факторів найбільшими виявились поздовжні сили, характер концентрації яких по поверхні покриття визначався за певними закономірностями розподілу зусиль між елементами.

Зміна параметрів деформування просторової конструкції спостерігалась у вертикальному і горизонтальному напрямках. Правило знаків приймалось в глобальній системі координат, за яким вважалось, якщо переміщення і напрямок осі X, Y або Z співпадають, то біля числового значення параметра деформування ставиться знак «+», якщо не співпадають – знак «-».

Шляхом аналізу кольорових мозаїк зусиль в елементах та переміщень вузлів визначались найбільш небезпечні ділянки покриття.

Максимальні значення осьових сил (далі зусиль) в покритті зі змінним положенням структурного модуля зафіксовані в контурних стиснутих опорних стояках у середині довжини покриття. На центральній ділянці просторової конструкції виявлені елементи з найбільшими значеннями зусиль розтягу і стиску. Серединна поверхня, окрім наближення до місць впливу накладених зв'язків, характеризувалась рівномірним розподілом зусиль. У контурних гранях переважна більшість верхніх елементів стискалась, нижніх – розтягувалась, за винятком наближення до середини довжини покриття.

У покритті з початковим положенням структурного модуля максимальні значення зусиль зафіксовані в контурних розтягнутих верхніх елементах в середині довжини покриття. Найбільш навантаженими виявились елементи центральної ділянки просторової конструкції. В гранях серединної поверхні, за винятком наближення до місць впливу накладених зв'язків, особливостей не спостерігалось. Верхні елементи контурних граней в основному працювали на стиск, нижні – на розтяг. Однак з наближенням до середини довжини покриття така закономірність порушувалась.

В значеннях зусиль, розподілених по поверхні просторової конструкції з початковим та зміненим положенням структурного модуля, за винятком окремих ділянок покриття, істотної різниці не зафіксовано. Між тим, дзеркальне відображення зверху вниз розкосів у площині граней змінило знак та збільшило зусилля в багатьох елементах.

Величини максимальних поздовжніх сил в елементах покриття за наявними напрямками по контуру і в серединній поверхні у випадку обох положень структурного модуля наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Максимальні поздовжні сили в елементах покриття за обома положеннями структурного модуля в залежності від напрямків розташування їх у просторі

Напрямок розташування елемента	Максимальні поздовжні сили в елементах, т							
	контурних в покритті				серединної поверхні в покритті			
	з модулем (рис. 1)		з модулем (рис. 2)		з модулем (рис. 1)		з модулем (рис. 2)	
	розтяг	стиск	розтяг	стиск	розтяг	стиск	розтяг	стиск
Поздовжній по X	+13,13	-5,73	+8,37	-13,06	+5,87	-5,58	+7,24	-5,35
Поперечний по Y	+2,75	-8,67	+3,78	-7,96	+11,83	-9,32	+12,48	-9,78
Вертикальний по X	+0,01	-0,37	–	-15,61	+0,48	-0,48	+0,27	-1,03
Вертикальний по Y	+0,03	-0,22	+0,16	-4,88	+0,48	-0,48	+0,27	-1,03
Похилий по X	+6,48	-11,14	+10,61	-6,61	+2,53	-2,91	+3,29	-2,24
Похилий по Y	+2,79	-5,90	+5,00	-3,46	+4,23	-6,89	+6,18	-3,63
Діагональний	–	–	–	–	+1,86	-3,79	+3,29	-4,86

На підставі отриманих значень встановлені найбільш небезпечні ділянки покриття.

За результатами розрахунків виявилось, що зміна положення структурного модуля має переважно негативний вплив на поздовжні сили в елементах. Так за максимальними показниками в одних елементах зусилля зросли, в інших – зменшились. По контуру найбільш уразливими виявились поздовжні та похилі елементи. Зміна попереднього положення структурного модуля спричинила в поздовжніх елементах негативний (більше ніж в 2 рази) вплив на максимальні зусилля стиску та позитивний (більше ніж в

1,5 раза) вплив на максимальні зусилля розтягу. Після дзеркального відображення зверху вниз розкосів у площині граней в похилих елементах на 64 і 79 % зросли найбільші розтягувальні зусилля та на 41 % зменшилися найбільші стискувальні зусилля. В серединній поверхні істотно навантаженими виявились поперечні елементи, в яких у випадку зміни попереднього положення структурного модуля збільшилися максимальні зусилля розтягу та стиску лише на 5 %.

Однак зазначені закономірності розподілу зусиль по поверхні просторової конструкції не вказували на загальний стан покриття. Від дії прикладеного експлуатаційного навантаження конструкція зі зміненим положенням структурного модуля викривлювалось за різними напрямками у просторі. Істотний вплив на зміну форми покриття справляли переміщення вузлів, концентрація яких дозволяла виявляти небезпечні ділянки просторової конструкції. Зміна геометрії відбувалась у горизонтальному і вертикальному напрямках. Причому покриття більше прогиналась ніж розповзалась, про що свідчать скупчення в серединній поверхні значної кількості великих вертикальних переміщень вузлів. Максимальний прогин отримав на перетині осей симетрії центральний верхній вузол покриття. Найбільші горизонтальні переміщення вузлів виявились на нижніх контурних ребрах в кутах та в середині довжини покриття.

Аналогічні закономірності деформування зафіксовані в конструкції з попереднім положенням структурного модуля. Майже відсутня різниця в значеннях переміщень вузлів. Порівняння обох схем показало, що в покритті зі зміненим розташуванням розкосів у гранях несуттєво зменшились лінійні та трохи зросли кутові горизонтальні переміщення вузлів. Зміна форми покриття у вертикальному напрямку у випадку попереднього положення структурного модуля виявилась більш прийнятною.

Введені в табл. 2 максимальні переміщення вузлів дозволили оцінити небезпечні ділянки покриття.

Порівняння переміщень вузлів, отриманих у випадку покриття з попереднім та зміненим положенням структурного модуля, показало очевидний результат. Від дзеркального відображення зверху вниз розкосів у площині граней переважно збільшилися параметри деформування. Одні вузли отримали більший максимум переміщень, інші – менший. Зміна апробованого структурного модуля негативно вплинула на максимальні горизонтальні кутові переміщення вузлів, які у напрямку осі X зросли на 2 % в контурних найбільш деформованих поздовжніх гранях та на 5 % – в гранях серединної поверхні покриття. Найбільші значення показали лінійні прогини вузлів, які зросли на 6 % по контуру та збільшилися на 4 % в серединній поверхні покриття.

Таблиця 2

Максимальні переміщення вузлів покриття за обома положеннями структурного модуля в залежності від напрямків розташування їх у просторі

Напрямок переміщення вузлів		Максимальні переміщення вузлів, мм			
		контурних у покритті		серединної поверхні у покритті	
		з модулем (рис. 1)	з модулем (рис. 2)	з модулем (рис. 1)	з модулем (рис. 2)
Горизонтальний	X	5,58* 5,58**	5,21* 5,21**	4,20	4,26
	UX	7,65* 3,14**	7,77* 3,21**	6,06	6,36
	Y	4,52* 2,36**	4,30* 2,47**	3,46	3,67
	UY	4,23* 4,23**	4,40* 4,40**	2,99	2,98
Вертикальний	Z	14,94* 13,68**	15,85* 14,30**	25,40	26,36
	UZ	0,74* 0,71**	0,83* 0,83**	0,26	0,22

Примітка. *, ** – контурні більша та менша грані покриття

На рис. 7 – 18 наочно продемонстрований позитивний та негативний вплив зміни положення структурного модуля на максимальні зусилля в елементах та переміщення вузлів.

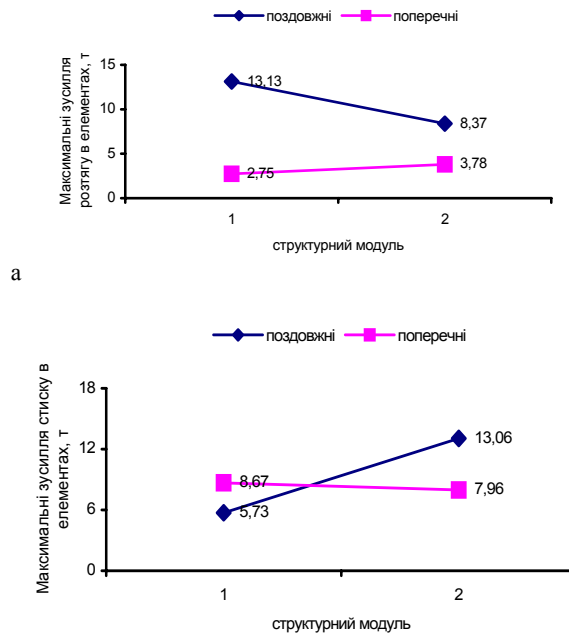


Рис. 7. Максимальні зусилля розтягу (а) та стиску (б) в контурних поздовжніх та поперечних елементах покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

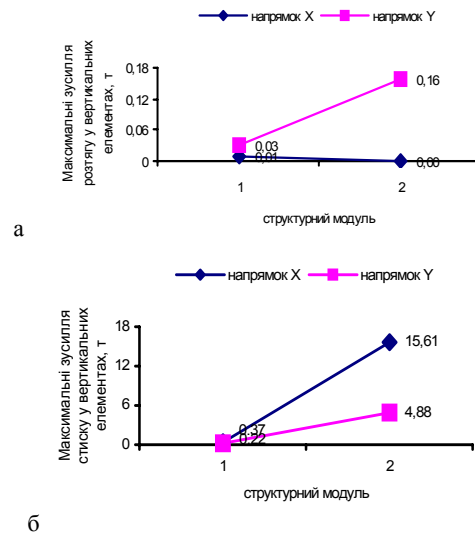


Рис. 8. Максимальні зусилля розтягу (а) та стиску (б) в контурних вертикальних елементах покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

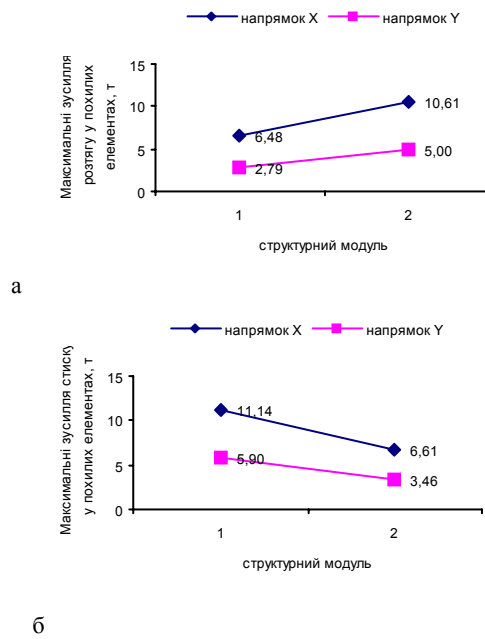


Рис. 9. Максимальні зусилля розтягу (а) та стиску (б) в контурних похилих елементах покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

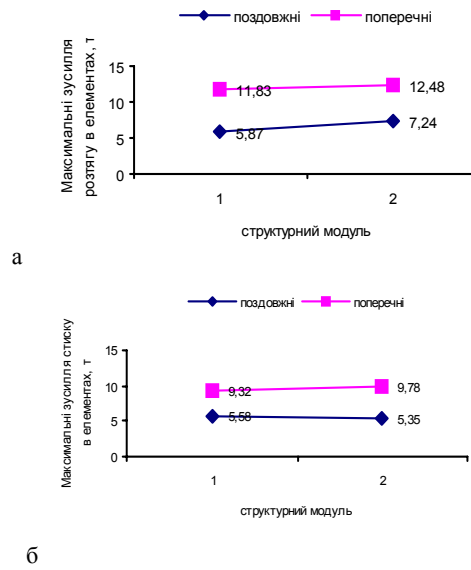


Рис. 10. Максимальні зусилля розтягу (а) та стиску (б) в поздовжніх та поперечних елементах серединної поверхні покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

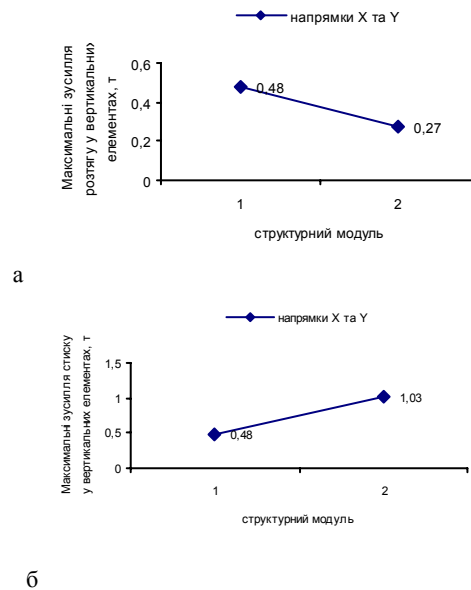


Рис. 11. Максимальні зусилля розтягу (а) та стиску (б) у вертикальних елементах серединної поверхні покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

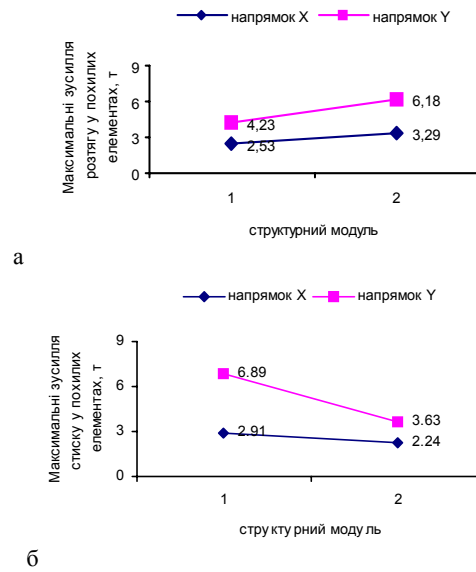


Рис. 12. Максимальні зусилля розтягу (а) та стиску (б) у похилих елементах серединної поверхні покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

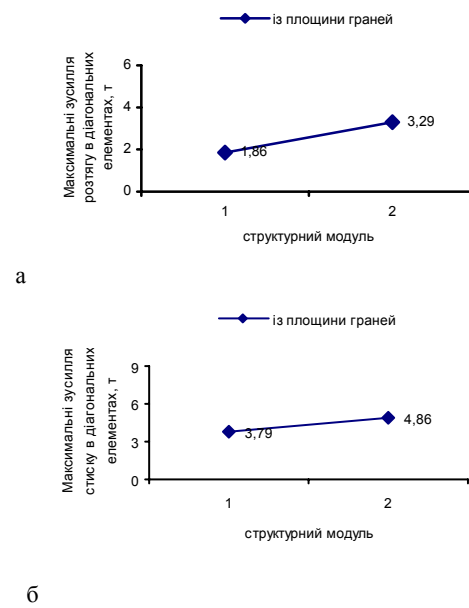


Рис. 13. Максимальні зусилля розтягу (а) та стиску (б) в діагональних елементах серединної поверхні покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

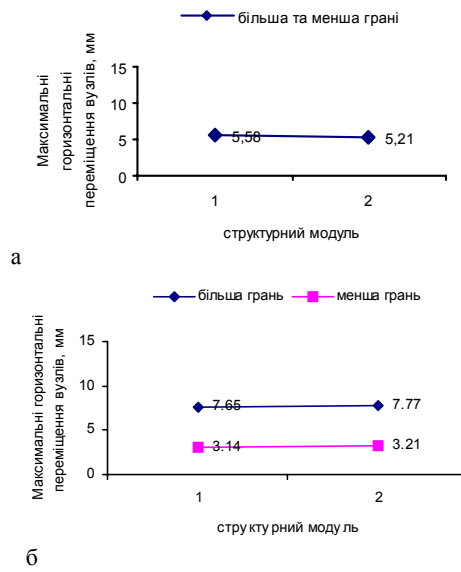


Рис. 14. Максимальні горизонтальні за напрямком Х лінійні (а) та кутові (б) переміщення контурних вузлів у гранях покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

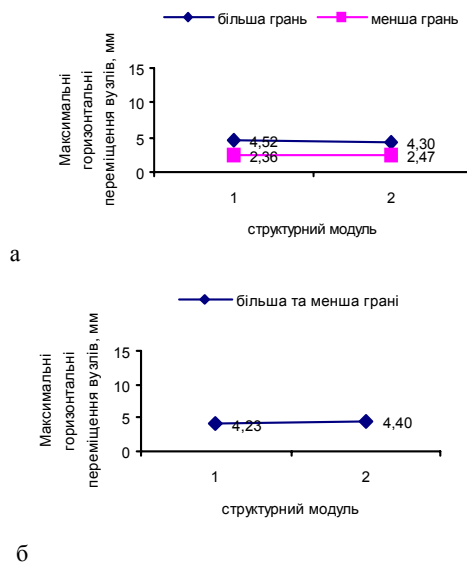


Рис. 15. Максимальні горизонтальні за напрямком Y лінійні (а) та кутові (б) переміщення контурних вузлів у гранях покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

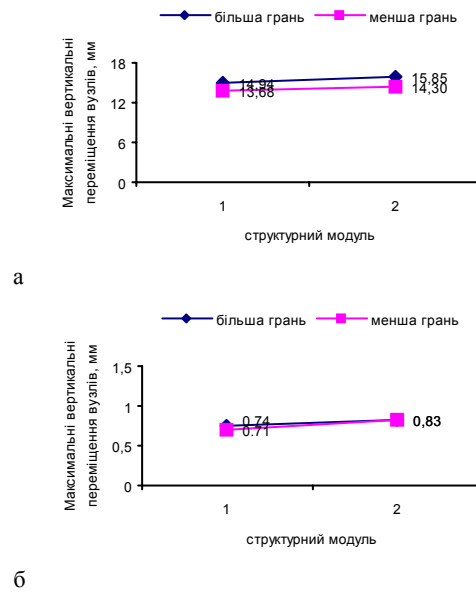


Рис. 16. Максимальні вертикальні за напрямком Z лінійні (а) та кутові (б) переміщення контурних вузлів у гранях покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

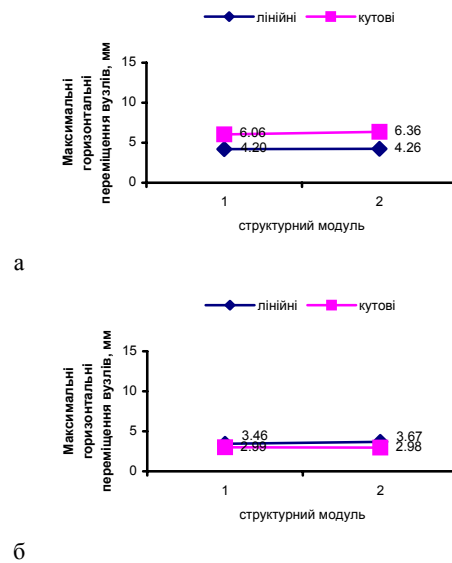


Рис. 17. Максимальні горизонтальні за напрямком X (а) та Y (б) лінійні та кутові переміщення вузлів серединної поверхні в гранях покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

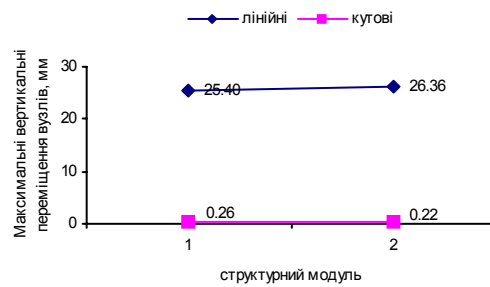


Рис. 18. Максимальні вертикальні за напрямком Z лінійні та кутові переміщення вузлів середньої поверхні в гранях покриття з модулем 1 (рис. 1) та модулем 2 (рис. 2)

Зазначені результати дозволили порівняти найбільші силові фактори та параметри деформування покриття за обома положеннями структурного модуля.

Наведені графіки показали різницю в значеннях та знаках максимальних поздовжніх сил в елементах просторової конструкції. З переходом від апробованого до зміненого положення структурного модуля в більшості випадків спостерігалось зростання максимальних розтягувальних та стискальних зусиль в елементах. Особливо показовим виявилось різке підвищення найбільших зусиль стиску в контурних поздовжніх та вертикальних елементах. Втім в окремих місцях спостерігалось зменшення максимальних поздовжніх силових факторів. Найбільш характерний приклад такого зменшення виявлений в максимально розтягнутих контурних поздовжніх елементах. Інша закономірність проявилась у збільшенні та зменшенні різних за знаком максимальних поздовжніх сил в похилих контурних елементах. Решта змін вбік зменшення та збільшення виявились мало відчутними. Лише за напрямком Y порівняно з іншими зросли максимальні зусилля розтягу та знизилась максимальні зусилля стиску у похилих елементах середньої поверхні.

Втім розглянуті закономірності зміни найбільших розтягувальних та стискальних зусиль в елементах не дали остаточної інформації про роботу покриття за обома положеннями структурного модуля.

Повністю оцінити загальний стан покриття дозволили отримані максимальні переміщення вузлів. За ними обидва випадки структурного модуля не виявили особливих тенденцій до викривлення форми, але зафіксували переважно зріст найбільших параметрів деформування.

Висновки

Програмними засобами ЛИРА вперше перевірена доцільність використання в роботі зміни положення структурного модуля для конструкції металевого просторового стрижневого покриття.

Згідно з заданою геометрією та двома випадками розташування розкосів у площині граней побудовані та розраховані скінченноелементні моделі покриття.

Шляхом аналізу кольорових мозаїк поздовжніх сил в елементах та лінійних і кутових переміщень вузлів визначені найбільш небезпечні ділянки покриття з обома положеннями структурного модуля.

За результатами розрахунків встановлено, що зміна розташування розкосів у площині граней неоднозначно вплинула на силові фактори та параметри деформування покриття. З одного боку істотно змінились поздовжні сили в елементах, а з другого – майже без змін залишились лінійні і кутові переміщення вузлів.

Перебудова багатоелементної конструкції викликала зростання силових показників більшості ділянок покриття. Основну роботу взяли на себе контурні поздовжні та вертикальні елементи, в яких зафіксований максимальний стиск, а також контурні похилі елементи, в яких зафіксований максимальний розтяг. Середина поверхня з позицій змін найбільших поздовжніх сил в елементах виявилась менш уразливою. Лише помітно підсилилась робота максимальних розтягувальних зусиль у похилих елементах. Решта ділянок покриття характеризувалась або незначним підвищенням, або зменшенням відповідних показників.

Зовсім інші зміни виявлені в параметрах деформування покриття. Вони не справили істотного впливу на тенденції до викривлення форми покриття. Кожна ділянка демонструвала деяке зростання або зниження лінійних та кутових переміщень контурних вузлів та вузлів серединної поверхні.

Література

- [1] Риндюк В.І. Використання металевих просторових конструкцій для запобігання руйнівних процесів в передмостових спорудах / В.І. Риндюк, О.І. Сіанов, С.Й. Шаманський, Т.Ю. Романець // Будівельні конструкції. [“Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць”]. – Київ: ДНДІБК, 2008. – Вип. 70. – С. 211 – 215.
- [2] Патент 58064С2 України, МПК 7 Е04С3/08, Е04В1/343, 1/344. Просторовий блок покриття / Сорочан В.Л. (Україна). – № 2002097186; Заявл. 04.09.02; Опубл. 15.02.05. Бюл. № 2. – 4 с.

- [3] Сіянов О.І. Структурна металева конструкція покриття з новою формою просторової чарунки / О.І. Сіянов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. [«Збірник наукових праць»]. – Рівне: НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 296 – 303.
- [4] Шимановский В.Н. Оптимальное проектирование пространственных *решетчатых покрытий* / В.Н. Шимановский, В.Н. Гордеев, М.Л. Гринберг. – К.: Будівельник, 1987. – 224 с.
- [5] Лубо Л.Н., Миронков Б.А. Плиты регулярной пространственной структуры / Л.Н. Лубо, Б.А. Миронков. – Л.: Стройиздат, 1976. – 105 с.
- [6] Трушев А.Г. Пространственные металлические конструкции / А.Г. Трушев: Учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1983. – 215 с.
- [7] ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – К.: Минстрой Украины, 2006. – 78 с.
- [8] Лантух-Лященко А.И. ЛИРА. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Учеб. пособие / А.И. Лантух-Лященко. – К.-М.: ФАКТ, 2001. – 312 с.
- [9] 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.
- [10] Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. ЛИРА: <http://www.lira.com.ua>

Надійшла до редколегії 10.06.2010 р.