

## ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ ФАКТОРІВ І ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СІТЧАСТИХ ПОКРИТТІВ

*Виконано моделювання і розрахунок металевих циліндричних сітчастих покриттів в залежності від конструктивних, геометричних і силових факторів. Проаналізовано напружено-деформований стан невідкріплених покриттів та покриттів, підкріплених затяжками і горизонтальними фермами. Отримано закономірності і виявлено позитивний вплив елементів підкріплення на роботу покриттів.*

### Вступ

У будівництві для перекриття різноманітних об'єктів широко використовують металеві циліндричні сітчасті покриття [1–13]. Вони утворені із стержневих елементів і працюють в умовах складного напружено-деформованого стану. Для них деякі елементи майже не працюють, інші зовсім перевантажені. Як наслідок, можливе виникнення зон з великими зусиллями в елементах і значними переміщеннями вузлів. Збільшення внутрішніх силових факторів і параметрів деформування є наслідком зростання габаритних розмірів покриттів, небезпечних схем прикладання навантаження, уразливості конструктивного рішення.

Інформаційні джерела [4, 6–10, 12–21] свідчать про те, що основні заходи, які спрямовані на зменшення впливу вказаних показників, носять переважно конструктивний характер. Найчастіше перевагу віддають застосуванню додаткових елементів, які виконують функцію засобів підкріплення і підвищення несучої здатності циліндричних сітчастих поверхонь. Саме у такий спосіб можна досягти найповнішого використання міцності матеріалу, бажаного перерозподілу зусиль, прийнятної жорсткості і стійкості покриттів. Окремі пропозиції відносно схем їхнього підкріплення мають місце в літературі, але в недопрацьованому і нереалізованому вигляді. Тому в статті поставлено задачу виконати моделювання, здійснити розрахунок і проаналізувати напружено-деформований стан можливих варіантів металевих циліндричних сітчастих покриттів в залежності від конструктивних, геометричних і силових факторів.

### Параметри розрахункових схем

Ґрунтуючись на результатах робіт вітчизняних і закордонних авторів відносно меж використання геометричних параметрів [1, 3–6, 13], вирішено розглянути 18 варіантів покриття шириною  $B$  від 12 м до 42 м (крок 6 м). Топологія сітки з економічних міркувань [13, 18] утворена поздовжніми і поперечними ребрами та низхідними розкосами з фіксованим кутом описаного кола  $\alpha = 120^\circ$ . Форма чарунок задана у вигляді квадрата з діагональним елементом всередині. Кількість панелей і граней уздовж довжини покриття і за напрямком дуги кола однакова ( $n = m = 12$ ). Геометричні параметри (ширина  $B$ , довжина  $L$ , радіус кривизни  $r$ , розмір чарунки  $a$ , стріла підйому  $f$ ) розраховано в рекомендованих для проектування співвідношеннях [3, 4, 10, 13] і наведено в табл. 1 та на рис. 1. Варіанти покриття передбачали використання елементів трубчастого перерізу із сталі класу С235 (розрахунковий опір  $R_y = 230$  МПа) і марки ВСТЗПС. Сітчасті поверхні в контурних опорних вузлах закріплені шарнірно, причому в одній кутовій точці реалізована повна заборона переміщень (осі  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), в трьох інших кутових точках накладено зв'язки по осях  $X$ ,  $Z$ . Решта контурних опорних вузлів закріплено по вертикалі (ось  $Z$ ).

Підвищення несучої здатності кожного варіанта забезпечено використанням підкріплюючих елементів у вигляді п'яти сталевих затяжок (розрахунковий опір  $R_y = 690$  МПа) і двох

горизонтальних ферм з десятима підвісками із арматурної сталі (рис. 2), закріплених в опорних зонах покриття. Елементи двох горизонтальних ферм вирішено виготовляти з того ж самого профілю і матеріалу, що й стержні сітчастої поверхні покриття.

Геометричні параметри покриттів

Варіант покриття	$B$ , м	$L$ , м	$r$ , м	$a$ , м	$f$ , м
1	12	14,28	6,95	1,19	3,435
2	18	21,6	10,4	1,8	5,145
3	24	28,56	13,9	2,38	6,87
4	30	36,12	17,3	3,01	8,6
5	36	43,2	20,8	3,6	10,29
6	42	50,4	24,26	4,2	12,12

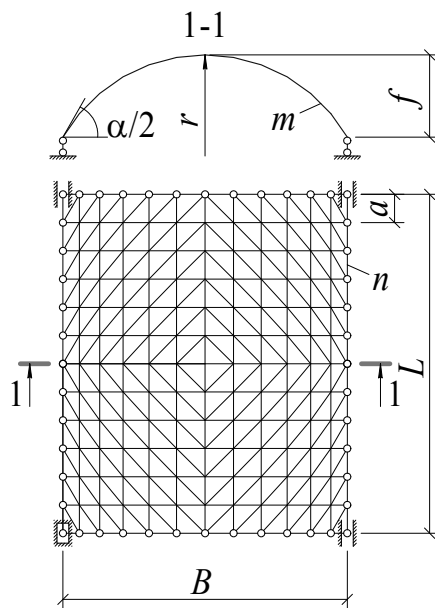


Рис. 1. План і переріз покриття з геометричними параметрами

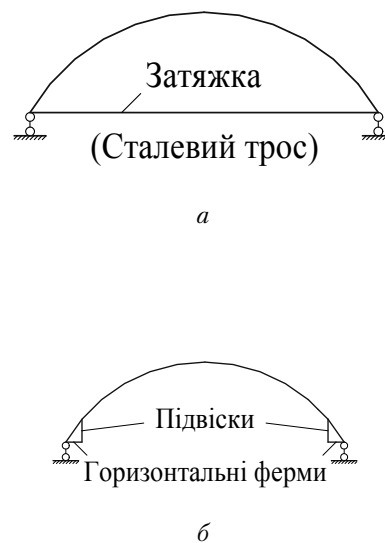


Рис. 2. Підкріплення покриття: а – затяжками; б – горизонтальними фермами

Величина прикладеного навантаження в розрахункових схемах визначена за обчисленими вантажними площами для кутових  $A_1$ , контурних  $A_2$  та серединних  $A_3$  зон покриття, відповідно,

$$A_1 = \frac{1}{4}a^2; \quad A_2 = \frac{1}{2}a^2; \quad A_3 = a^2, \quad (1)$$

де  $a$  – сторона квадратної чарунки покриття.

Власну вагу покриття знайдено із розрахунку призначення елементам однакового профілю

$$G = \gamma \sum_{i=1}^n A_i l_i, \quad (2)$$

де  $\gamma$  – питома вага сталі ( $\gamma = 78,5 \text{ кН/м}^3$ );  $A_i$  – площа поперечного перерізу,  $l_i$  – довжини елементів.

Снігове навантаження розраховане як змінне граничне на горизонтальну проекцію покриття [22]

$$S_m = \gamma_{fm} S_0 C, \quad (3)$$

де  $\gamma_{fm}$  – коефіцієнт надійності за граничним значенням снігового навантаження залежно від заданого середнього періоду повторюваності;  $S_0$  – характеристичне значення снігового навантаження на  $1 \text{ м}^2$  поверхні землі за сніговим районом України з можливим перевищенням в середньому один раз в 50 років;  $C$  – коефіцієнт урахування форми покрівлі і схеми розподілу

снігового навантаження, режиму експлуатації покрівлі, географічної висоти розміщення об'єкта над рівнем моря.

Вітрове навантаження обчислене як змінне граничне [22]

$$W_m = \gamma_{fm} W_0 C, \tag{4}$$

де  $\gamma_{fm}$  — коефіцієнт надійності за граничним значенням вітрового навантаження залежно від заданого середнього періоду повторюваності;  $W_0$  — характеристичне значення вітрового тиску за вітровим районом України з можливим перевищенням в середньому один раз в 50 років;  $C$  — коефіцієнт урахування форми і висоти споруди, типу місцевості, географічної висоти розміщення об'єкта над рівнем моря, рельєфу, напрямку, динамічності.

З урахуванням інтенсивності експлуатаційного навантаження  $q$  і значень  $A_1...A_3$ , здійснено перехід від площинних до зосереджених сил у вузлах серединної поверхні

$$F_1 = qA_1; F_2 = qA_2; F_3 = qA_3, \tag{5}$$

де  $q = 2 \text{ кН/м}^2$  — результат суми власної ваги, дії снігу і вітру.

### Моделювання і розрахунок

Циліндричні сітчасті моделі покриття створено в обчислювальному комплексі SCAD [23] з використанням поверхонь обертання, даних про елементи, форму і тип заповнення чарунок. Попередні характеристики жорсткості призначено на підставі чинного сортаменту сталевих профілів, обмежень по переміщенням вузлів і максимальному діаметру поперечного перерізу елементів. Стержні сітчастої поверхні та горизонтальних ферм задано з безшовних гарячекатаних труб. Затяжкам призначено сталеві троси, а допоміжним елементам (підвіскам) — круглу арматурну сталь. На опорні вузли контуру накладено зв'язки, які передбачали заборону переміщень для забезпечення геометричної незмінності розрахункових схем. Обчислення власної ваги елементів виконано програмними засобами за попередніми характеристиками жорсткості. Дія експлуатаційного симетричного і несиметричного навантаження (рис. 3) реалізована через вантажні площі у вигляді зосереджених сил у вузлах.

Моделювання і розрахунок здійснено для трьох конструктивних рішень покриття: невідкритих, підкритих затяжками і горизонтальними фермами, причому кожний з них передбачав шість варіантів геометричних параметрів.

У підсумку розраховано 18 схем покриття, для яких отримано внутрішні силові фактори і параметри деформування.

Враховуючи напрямки розташування елементів, утворено три типорозміри перерізів за максимальним зусиллям, визначеним в поясах, стояках і розкосах граней покриття (рис. 4) з подальшим об'єднанням їх в три групи уніфікації.

За скорегованими характеристиками жорсткості здійснено повторний розрахунок і отримано уточнені параметри напружено-деформованого стану.

### Результати розрахунку

Реакція моделей покриття на дію навантажень проаналізована за табличними даними, схемами деформування, індикацією зусиль і переміщень, епюрами внутрішніх силових факторів. Їх наочність дозволила встановити небезпечні схеми прикладання навантаження, ви-

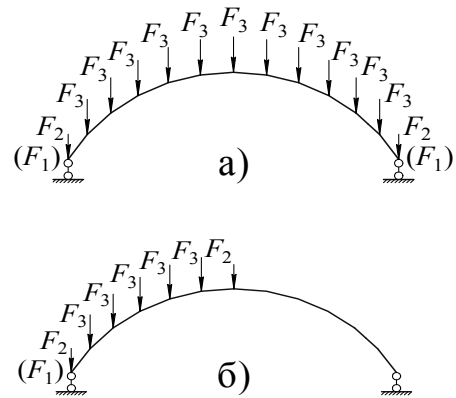


Рис. 3. Схеми прикладання: а — симетричного і б — несиметричного навантаження до покриття

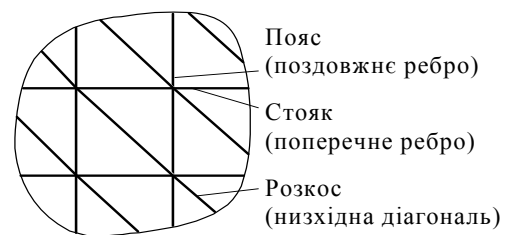


Рис. 4. Фрагмент граней покриття з типорозмірами перерізів елементів

явити зони з максимальними зусиллями в елементах і переміщеннями вузлів, оцінити вплив зтяжок і горизонтальних ферм, визначити закономірності розподілу зусиль і переміщень в сітчастих поверхнях покриття.

Кожна розрахункова схема істотно відреагувала на дію навантаження, про що засвідчили зони з максимальними внутрішніми силовими факторами і параметрами деформування.

Для трьох конструктивних рішень покриттів небезпечні показники виявлено за умови дії несиметричного навантаження.

Аналіз результатів розрахунку схем непідкріпленого покриття показав, що максимуми зусиль зафіксовано в середніх елементах нижнього пояса опорних граней, а найбільші переміщення отримав рівновіддалений від торців вузол середніх ребер.

Величини і розташування найбільших внутрішніх силових факторів та параметрів деформування, виявлених за результатами розрахунку, вказали на необхідність підвищення несучої здатності покриття.

Як наслідок, вирішено удосконалити конструктивну форму покриття за допомогою використання підкріплюючих елементів у вигляді зтяжок і горизонтальних ферм залежно від архітектурних вимог і функціонального призначення об'єкта.

Після введення заданих геометричних параметрів виконано розрахунок покриттів з зтяжками і виявлено прийнятні закономірності зміни силових факторів і параметрів деформування. Істотний вплив на зусилля в елементах і особливо нижніх граней покриттів справила жорсткість зтяжок. Завдяки такому підкріпленню забезпечено більш рівномірний розподіл зусиль по поверхні. Отримано значне зниження максимальних зусиль, які зафіксовано в тих же елементах, що і для непідкріплених покриттів. Істотно зменшено величину і трохи змінено положення максимальних переміщень. Найбільші відхилення отримав середній вузол, розташований на відстані чотирьох елементів від опори уздовж дуги кола. Значно зменшено переміщення вузлів нижніх граней покриттів.

Використання горизонтальних ферм показало менший ефект. Встановлено порівняно незначну зміну силових факторів і параметрів деформування. Отримано зменшення зусиль в елементах, але не так істотно як в покриттях з зтяжками. Максимальні зусилля виявлено в тих же елементах, що і для непідкріплених покриттів. Зменшено найбільші переміщення вузлів, однак без зміни їхнього розташування.

Оскільки кожний елемент покриттів сприймав дію навантаження через власний профіль, то вибрана площа із сортаменту визначала величину використання міцності матеріалу (напруження) в поперечному перерізі елементів.

Максимальні напруження виявлено в розтягнутих елементах, а найбільші переміщення вузлів зафіксовано у досить уразливому і небезпечному вертикальному напрямку. Їх динаміку зміни зі збільшенням геометричних параметрів покриттів наведено на рис. 5.



Рис. 5. Динаміка зміни максимальних напружень в елементах (а) і максимальних переміщень вузлів (б) зі збільшенням геометричних параметрів покриття: 1 – непідкріпленого; 2 – із зтяжками; 3 – з горизонтальними фермами

Із результатів розрахунку підкріплених моделей сітчастих поверхонь встановлено, що істотний вплив на зміну максимальних напружень в елементах і максимальних переміщень

вузлів зі збільшенням геометричних параметрів покриттів справили зтяжки.

З рис. 5а, випливає, що на лінії з короткими штрихами для більшості розрахункових схем, підкріплених зтяжками майже не помітна різниця в значеннях максимальних напружень в елементах, про що свідчить надійність запропонованого конструктивного рішення.

На графіках з найбільшими переміщеннями вузлів (рис. 5б) подібна закономірність відсутня, хоча й там, порівняно з використанням горизонтальних ферм, зафіксовано позитивний вплив зтяжок.

Розрахунки показали, що підкріплення покриттів зтяжками відчутно зменшило напруження в елементах і переміщення вузлів. Корегування поперечних перерізів елементів забезпечило раціональне використання міцності матеріалу.

Завдяки горизонтальним фермам досягнуто також зменшення напружень в елементах і переміщень вузлів, однак в меншій мірі, ніж в покриттях з зтяжками.

### Висновки

1. На основі заданих геометричних параметрів, схем прикладання навантажень і конструктивних рішень виконано моделювання та розрахунок металевих циліндричних сітчастих покриттів.

2. Проаналізовано напружено-деформований стан, характерні зони і закономірності роботи непідкріплених покриттів та покриттів, підкріплених зтяжками і горизонтальними фермами.

3. Встановлено неоднаковий вплив на роботу покриттів схем дії експлуатаційного навантаження. Виявлено істотне збільшення максимальних показників за умови прикладання несиметричного навантаження.

4. Завдяки введенню в опорних зонах підкріплюючих елементів отримано розвантаження сітчастої поверхні, зменшення внутрішніх силових факторів і параметрів деформування.

5. Кожне запропоноване підкріплення підвищило несучу здатність покриттів, однак завдяки зтяжкам забезпечено рівномірніший розподіл параметрів по поверхні та найповніше використання запасу міцності матеріалу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции : учеб. пос. для вузов / А. Г. Трущев. — М. : Стройиздат, 1983. — 215 с.
2. Пшеничнов Г. И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок / Г. И. Пшеничнов. — М. : Наука, 1982. — 352 с.
3. Рюле Г. Пространственные покрытия. Конструкции и методы возведения / Г. Рюле ; пер. с нем. — Том 2. — М. : Стройиздат, 1974. — 247 с.
4. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции / О. Патцельт ; пер. с нем. — М. : ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. — 95 с.
5. Таиров В. Д. Сетчатые пространственные конструкции / В. Д. Таиров. — К. : Будівельник, 1966. — 73 с.
6. Попов И. Г. Цилиндрические стержневые системы / И. Г. Попов. — Л.; М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. — 112 с.
7. Сіянов О. І. Доцільність застосування металевих циліндричних стержневих покриттів в конкретних об'єктах будівництва / О. І. Сіянов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : зб. наук. праць. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — С. 114—116.
8. Сіянов О. І. Металеві одношарові циліндричні стержневі покриття : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук 05.23.01 / Сіянов Олександр Ілліч. — К., 2002. — 200 с. — Бібліогр. : С. 181—194.
9. Свердлов В. Д. Одношарові циліндричні стержневі покриття (перспективи, проблеми, шляхи вирішення) / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов // Індивідуальний житловий будинок : матер. респуб. наук.-техн. конф. (Вінниця, 25—27 верес. 2001 р.). — Вінниця. — 2001. — С. 10—14.
10. Свердлов В. Д. Металеві циліндричні стержневі покриття : моног. / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 134 с.
11. Свердлов В. Д. Ефективні стержневі конструкції покриттів / В. Д. Свердлов, О. Д. Бойчук, О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1998. — № 4. — С. 20—24.
12. Свердлов В. Д. Совершенствование цилиндрических стержневых систем покрытий / В. Д. Свердлов, А. И. Сіянов // Теория и практика металлических конструкций : труды Междунар. конф., (Донецк-Макеевка, 2—4 декаб. 1997 г.). — Донецк-Макеевка, 1997. — Т. 2. — С. 37—41.
13. Свердлов В. Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий : дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук 05.23.01 / Свердлов Владимир Деонисович. — Киев, 1977. — 174 с. — Библиогр. : С. 153—161.

14. Сіянов О. І. Розрахунок одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов, Б. В. Погрішук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 1. — С. 13—15.
15. Сіянов О. І. Аналіз конструктивних рішень металевих одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. — Рівне : НУВГП, 2004. — Вип. 11. — С. 279—282.
16. Свердлов В. Д. Результати оптимізаційних розрахунків звичайних і підкріплених одношарових циліндричних стержневих покриттів / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : зб. наук. праць. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — С. 93—96.
17. Свердлов В. Д. Напрямки удосконалення металевих циліндричних стержневих покриттів / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов : збірник докладів VIII Української наук.-техн. конф. «Металлические конструкции : взгляд в прошлое и будущее», (Київ, 18—22 октяб. 2004 г.). — Київ : изд-во «Сталь», 2004. — Ч. 2. — С. 18—20.
18. Свердлов В. Д. Побудова структури визначення раціонального варіанта одношарового циліндричного стержневого покриття / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. трудов. — Одесса : ОГАСА, 2003. — С. 217—222.
19. Сіянов О. І. Дослідження впливу геометричних параметрів на розподіл маси одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2002. — № 3. — С. 10—14.
20. Сіянов О. І. Теоретичні та експериментальні дослідження одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2001. — № 3. — С. 13—18.
21. 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 : сб. науч. трудов. — Одесса : ОГАСА, 1999. — С. 169—174.
22. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи / Мінбуд України. — К. : вид-во «Сталь», 2006. — 60 с.
23. Вычислительный комплекс SCAD / [В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко та ін. ]. — М. : изд-во «СКАД СОФТ», 2009. — 656 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 8.09.11  
Рекомендована до друку 30.09.11

**Сіянов Олександр Ілліч** — доцент кафедри промислового та цивільного будівництва.  
Вінницький національний технічний університет, Вінниця