

О. І. Сіянов, к. т. н., доц.

А. И. Сиянов, к. т. н., доц.

O. Siyanov, Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof.

**ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
МОДЕЛІ МЕТАЛЕВОГО ОДНОШАРОВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО
СТЕРЖНЕВОГО ПОКРИТТЯ**

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОДНОСЛОЙНОГО
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТЕРЖНЕВОГО ПОКРЫТИЯ**

**PHYSICAL DESIGN AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE MODEL OF
METALLIC SINGLE-LAYER CYLINDER BAR COVERAGE**

На спроектованій і виготовленій безрозпірній моделі металевого одношарового циліндричного стержневого покриття за допомогою спеціально сконструйованих просторових П-подібних рам проведено серійні випробування трьох експериментальних систем на дію повного і одностороннього зовнішнього навантаження. За результатами проведених досліджень підтверджено ефективність запропонованих автором конструкцій покриттів з затяжками та з горизонтальними фермами, що проявляється у зниженні напружень в елементах і зменшенні переміщень вузлів. Встановлено закономірності напружено-деформованого стану покриття в залежності від конструктивної форми і схеми навантаження.

На спроектированной и изготовленной безраспорной модели металлического однослойного цилиндрического стержневого покрытия с помощью специально сконструированных пространственных П-подобных рам проведены серийные испытания трех экспериментальных систем на действие полной и односторонней внешней нагрузки. По результатам проведенных исследований подтверждена эффективность предложенных автором конструкций покрытий с затяжками и с горизонтальными фермами, что проявляется в снижении напряжений в элементах и уменьшении перемещений узлов. Установлены закономерности напряженно-деформированного состояния покрытия в зависимости от конструктивной формы и схемы нагрузки.

Testing of three experimental systems, intended for control of the influence of complete and unilateral external loading was performed using the designed and manufactured physical model of metal single-layer cylinder shape bar coverage using specially designed spatial П-shape frames. The results obtained proved the efficiency of coverage designs equipped with tie-bars and horizontal girders. The results allowed to determined regularities of stressed-strained state of coverage depending on design form and loading scheme.

Вступ

Експериментальні дослідження металевих одношарових циліндричних стержневих покриттів, які відзначаються складністю просторової геометрії та різноманітністю конструктивних рішень, в цілому висувають задачу визначення дійсного характеру напружено-деформованого стану системи за умови дії реального експлуатаційного навантаження. Такі дослідження можна проводити як на моделях, так і на натуральних зразках, однак експерименти, враховуючи великі розміри натурних зразків, потребують багато коштів і часу, а з урахуванням ще й недостатнього фінансування експериментального будівництва й випробування великих об'єктів, цей процес стає дуже складним. Крім того, фізичне моделювання подібних покриттів вже використовувалось в експериментальній практиці [1] і під час випробування навантаженням показало прийнятні результати.

Постійне удосконалення таких покриттів, найчастіше за рахунок використання додаткових (підкріплювальних) елементів, зумовлює необхідність проведення нових експериментів. Якщо таку конструкцію не доводить до руйнування, а обмежити дослідження лише пружною роботою пок-

риття, що є прийнятним для визначення напружень в елементах і переміщень у вузлах, то достатньо змоделювати тільки одну систему й провести експериментальні дослідження на ній для різних варіантів конструктивних форм.

У статті наведена методика фізичного моделювання металевих одношарових циліндричних стержневих покриттів, як звичайних, так і з різними конструктивними нововведеннями, послідовність проведення експериментів та основні результати, отримані в ході досліджень фізичної моделі покриття, а випробування проводилось в науково-дослідній лабораторії ефективних будівельних конструкцій (НДЛ ЕфБК) Вінницького національного технічного університету.

Введение

Экспериментальные исследования металлических однослойных цилиндрических стержневых покрытий, которые отличаются сложностью пространственной геометрии и разнообразием конструктивных решений, в целом выдвигают задачу определения действительного характера напряженно-деформированного состояния системы при условии действия реальной эксплуатационной нагрузки. Такие исследования можно проводить как на моделях, так и на натуральных образцах, однако эксперименты, учитывая большие размеры натуральных образцов, требуют много средств и времени, а с учетом еще и недостаточного финансирования экспериментального строительства и испытания больших объектов, этот процесс становится очень сложным. Кроме того, физическое моделирование подобных покрытий уже использовалось в экспериментальной практике [1] и во время испытания нагрузкой показало приемлемые результаты.

Постоянное усовершенствование таких покрытий, чаще всего за счет использования дополнительных (подкрепляющих) элементов, ведет к необходимости проведения новых экспериментов. Если такую конструкцию не доводить до разрушения, а ограничить исследование лишь упругой работой покрытия, что приемлемо для определения напряжений в элементах и перемещений в узлах, то достаточно смоделировать только одну систему и провести экспериментальные исследования на ней для разных вариантов конструктивных форм.

В статье представлена методика физического моделирования металлических однослойных цилиндрических стержневых покрытий, как обычных, так и с разными конструктивными нововведениями, последовательность проведения экспериментов и основные результаты, полученные в ходе исследований физической модели покрытия, а испытания проводилось в научно-исследовательской лаборатории эффективных строительных конструкций (НИЛ ЭФСК) Винницкого национального технического университета.

Introduction

Experimental research of metallic single-layer cylinder bar coverage, distinguished by complicated spatial geometry and variety of structural designs, put forward the problem aimed at determination of the real character of stressed-strained state of the system, influenced by real operation loading. The research can be carried out using both models and full-scale specimen, but the experiments, taking into consideration large dimensions of full-scale specimen, require important resources and time, and, taking into account lack of financial resources needed for construction of full-scale specimen and its testing, this process is rather complicated. Besides, physical modeling of similar coverage has already been applied in experimental practice, [1] and showed acceptable results during testing.

Constant improvement of such coverage, as a rule, due to application of additional (supporting) elements, leads to the necessity to carry out new experiments. If such structure is not destructed, but the research is limited by investigation of elastic work of the coverage, that is quite acceptable for determination of stresses in elements and shifts in nodes, then it would be sufficient to model only one system and carry out experimental research in the given system for different versions of constructive forms.

The given paper presents the technique intended for physical modeling of metallic single-layer cylindrical bar coverage both for conventional and of coverage containing various innovations, stages of experiment procedure and basic results, obtained at research lab of efficient building structures of Vinnytsia National Technical University.

1. Фізичне моделювання

З метою проведення експериментальних досліджень покриттів, здатних перекривати великі

площі, а саме, більші ніж досліджені в роботах [1—5], розроблена й випробувана модель металевого одношарового циліндричного стержневого покриття з поперечними і поздовжніми ребрами та низхідними розкосами, яка за геометричними параметрами у співвідношенні розмірів з натурними зразками в 1,5 рази перевищує раніше спроектовану і сконструйовану фізичну модель [6]. Габаритні розміри нової моделі в плані прийнято $B \times L = 1,8 \times 2,4$ м, стріла підйому в поперечному перерізі $f = 0,42$ м (1:20 до реальної системи) (рис. 1). Співвідношення довжини L до ширини B покриття $L/B = 1,3$; кількість граней m взято 6, а кількість панелей $n - 8$, що дозволило одержати оптимальний кут нахилу розкосів до поясів в гранях $\varphi = 47^\circ 37'$. Елементи моделі виконані зі стержнів трубчастого перерізу (зовнішній діаметр 21 мм, товщина стінки 3 мм). Ребра виконані нерозрізними, стояки і розкоси приєднані до ребер за допомогою косинок, що виконані з листового металу товщиною 4 мм. З'єднання елементів у вузлах здійснювалось зварюванням. Матеріал конструкції моделі – сталь С245. Елементи для підкріплення – затяжки та горизонтальні ферми з підвісками в приопорній зоні жорстко прикріплені до моделі покриття.

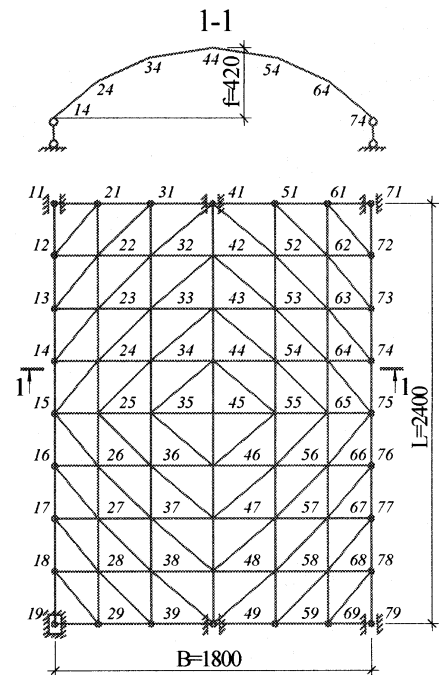


Рис. 1. Схема фізичної моделі покриття
 Рис. 1. Схема физической модели покрытия
 Fig. 1. Scheme of the physical model cover

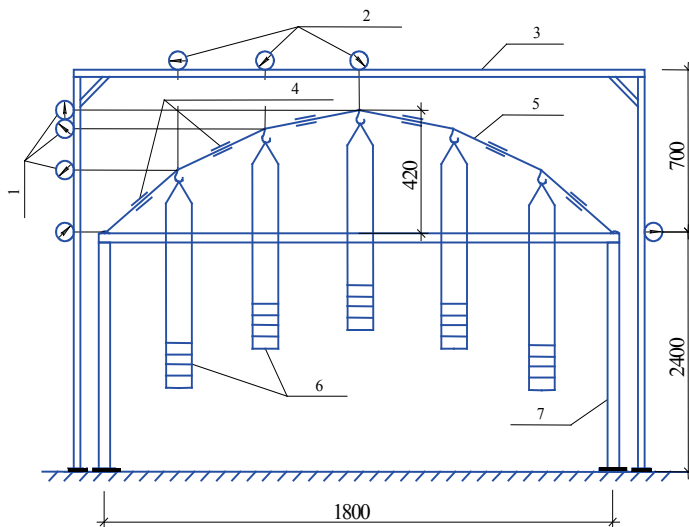


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 — індикатори ІГ-10; 2 — прогиноміри ПАО-6; 3 — верхня рама; 4 — тензодатчики ПКБ-10-200; 5 — модель покриття; 6 — підвісні кошики; 7 — нижня рама
 Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — индикаторы ИЧ-10; 2 — прогибомеры ПАО-6; 3 — верхняя рама; 4 — тензодатчики ПКБ-10-200; 5 — модель покрытия; 6 — подвесные корзинки; 7 — нижняя рама
 Fig. 2. Scheme of the experimental installation: 1 — indicators ІГ-10; 2 — deflectometers ПАО-6; 3 — upper frame, 4 — strain gauge ПКБ-10-200; 5 — model of coverage; 6 — suspended basket; 7 — lower frame

- не вимагали значних витрат часу для навантаження і розвантаження;
- під час випробувань забезпечувалась стабільність навантаження, тобто незмінність його в часі.

З'єднання елементів у вузлах здійснювалось зварюванням. Матеріал конструкції моделі – сталь С245. Елементи для підкріплення – затяжки та горизонтальні ферми з підвісками в приопорній зоні жорстко прикріплені до моделі покриття. Затяжки виготовлялись із сталевих тросів, а підвіски для утворення бортового елемента – з гладких арматурних стержнів діаметром 6 мм, причому елементи горизонтальних ферм трубчастого перерізу (зовнішній діаметр 18 мм, товщина стінки 3 мм) виконувались із того самого матеріалу, що і модель покриття. Для контурного опирання конструкції до спеціально сконструйованої опорної сталевій рами (підвалини моделі) використовувались катки із гладкої арматурної сталі діаметром 20 мм, що в процесі випробування дозволяло уникати небажаних розпирань.

Навантаження прикладалось до вузлів знизу (рис. 2) як симетрично по поверхні, так і на 1/2 покриття, причому поступово, без поштовхів і ударів з тим, щоб впливом сил інерції можна було б знехтувати.

Пристрої для навантаження задовольняли такі основні вимоги:

— давали можливість чітко визначати напруження, переміщення і деформації, які з'являлись в моделі під час випробування;

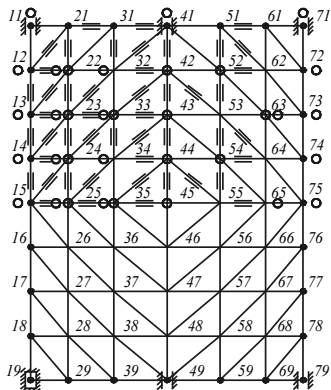


Рис. 3. Розміщення приладів: • — прогиноміри; о — індикатори; = — тензодатчики

Рис. 3. Размещение приборов: • — прогибомеры; о — индикаторы; = — тензодатчики

Fig. 3. Location of devices: • — ductilometers; о — indicators; = — tension indicators

Для спостереження за поведінкою моделі під час проведення випробувань використовувались прогиноміри ПАО-6 з ціною поділки 0,01 мм, індикатори годинникового типу ІГ-10 з точністю до 0,01 мм і тензодатчики ПКБ-10-200 з базою 10 мм. Прогиноміри і індикатори кріпились до спеціально виготовлених допоміжних сталевих рам, а тензодатчики наклеювались безпосередньо на стержні покриття. Реєстрація показань тензодатчиків здійснювалась за допомогою вимірювача деформацій цифрового (ВДЦ-1) та цифрового тензометричного мосту (ЦТМ-5). Розміщення приладів і датчиків відповідало тим місцям і точкам в конструкції, де передбачались найбільші переміщення і деформації (рис. 3). Всі вимірювальні прилади були закріплені на моделі заздалегідь для забезпечення стабільності їх показань.

2. Постановка задачі, описання програми і методики експериментальних досліджень

Перед початком випробувань ставилась задача – визначити вплив різних систем і схем навантаження на напруження в елементах і переміщення вузлів з метою порівняння закономірностей напружено-деформованого стану систем без підкріплень (див. рис. 1), із затяжками (рис. 4) та з горизонтальними фермами (рис. 5).

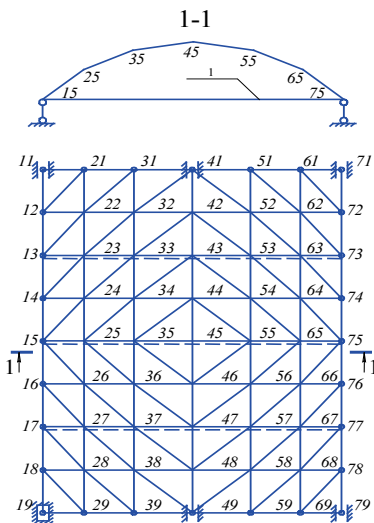


Рис. 4. Схема моделі з затяжками: 1 — затяжка (сталевий трос)

Рис. 4. Схема модели с затяжками: 1 — затяжка (стальной трос)

Fig. 4. Scheme of the model with tie-bars 1 — tie-bar (steel rope)

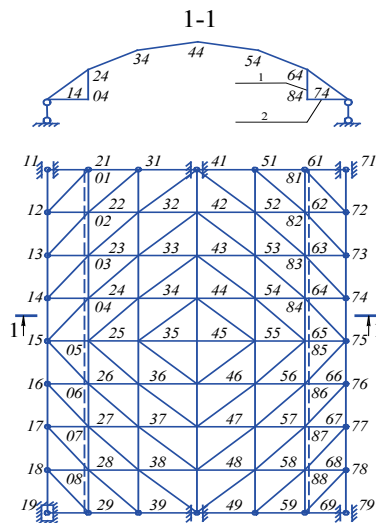


Рис. 5. Схема моделі з горизонтальними фермами: 1 — підвіска; 2 — горизонтальна ферма

Рис. 5. Схема модели с горизонтальными фермами: 1 — подвеска; 2 — горизонтальная ферма

Fig. 5. Scheme of the model with horizontal girders 1 — suspension; 2 — horizontal girder

Випробування моделі виконувалось для безрозпірної системи, яка сприяла введенню до складу покриття затяжок (рис. 6) та горизонтальних ферм (рис. 7). Експеримент проводився при температурі +20 ± 2 °С і вологості, що близька до нормальної. До початку випробувань виконувалось тарування приладів.

Процес проведення експерименту передбачав: навантаження моделі покриття; витримку

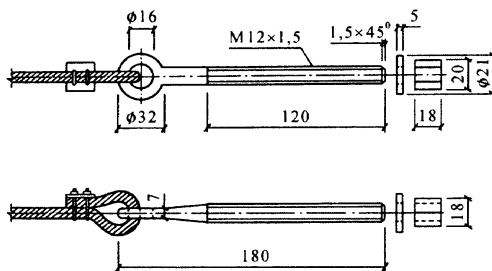


Рис. 6. Затяжка

Рис. 6. Затяжка

Fig. 6. Tightening

під навантаженням; вимірювання переміщень і деформацій; зняття навантаження.

Для визначення закономірностей зміни напружено-деформованого стану покриття приймалась спеціальна послідовність навантаження по етапах. Після завершення кожного етапу навантаження знімалися показники вертикальних і горизонтальних переміщень вузлів за допомогою прогиномірів та індикаторів, а також відносні деформації в елементах за допомогою тензодатчиків, розміщення яких показано на рис. 3.

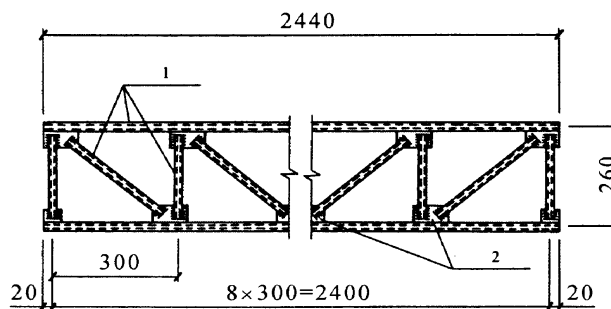


Рис. 7. Горизонтальна ферма: 1 — трубчасті елементи; 2 — фасонки

Рис. 7. Горизонтальная ферма: 1 — трубчатые элементы; 2 — фасонки

Fig. 7. Horizontal girder 1 — tubular elements; 2 — hapes

Для моделі без підкріплюючих елементів здійснювалось поетапне навантаження по 180—220 Н на вузол з витримкою для кожного етапу по 10 хвилин, після чого за допомогою приладів знімалися відносні деформації ϵ і переміщення δ . Максимальне навантаження на вузол становило 1000 Н.

Друга експериментальна система передбачала введення затяжок, процес натягу яких виконувався ступенями у кількості не менше 10. Причому зусилля натягу в кожному тросі доводили до 2000 Н. Використовувались заздалегідь відтаровані трубчасті кільця шириною 15 мм (зовнішній діаметр 51 мм, товщина стінки 6 мм), на які, для визначення відносних деформацій у тросах, були наклеєні тензометричні датчики опору. Поетапне навантаження моделі, підкріпленої затяжками, становило 180—220 Н на вузол (витримка для кожного етапу 20 хвилин) з подальшим визначенням ϵ і δ . Максимальне навантаження для такої системи становило 1000 Н на вузол.

На завершення модель покриття була підкріплена горизонтальними фермами. При цьому поетапне навантаження складало 180—220 Н на вузол з витримкою для кожного етапу по 15 хвилин, після чого за допомогою приладів знімалися показники відносних деформацій ϵ і переміщень δ . Максимальне навантаження на вузол становило 1000 Н.

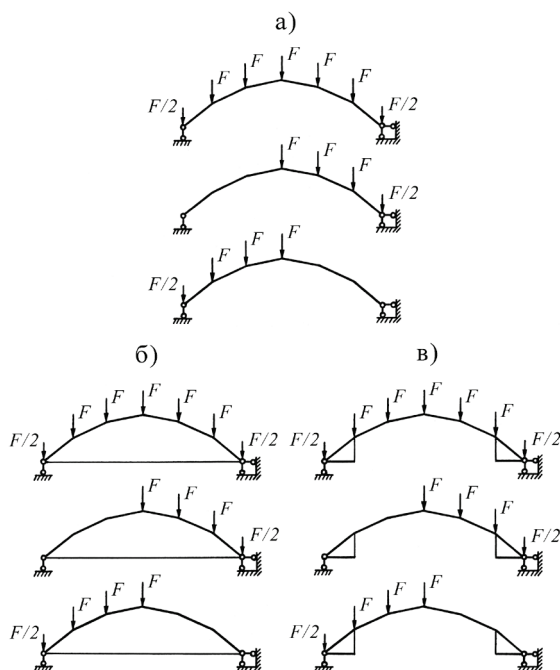


Рис. 8. Схеми навантаження моделі: а) без підкріплюючих елементів; б) з затяжками; в) з горизонтальними фермами

Рис. 8. Схемы загрузки модели: а) без подкрепляющих элементов; б) с затяжками; в) с горизонтальными фермами

Fig. 8. Scheme of model loading: а) without tightening elements; б) with tightenings; в) with horizontal frameworks

В результаті для кожної експериментальної системи виконувалось повне і однобічне навантаження моделі (рис. 8). Але, оскільки прилади були встановлені на 1/4 покриття, то однобічне навантаження виконувалось зліва і справа. Результати кожного експерименту записувались у журнали та відомості. Проводилось по 5 етапів навантаження для трьох експериментальних систем і трьох схем навантаження. Після кожного етапу навантаження робилась відповідна витримка. Під час витримок модель ретельно оглядалась і фотографувалась, фіксувались і вимірювались деформації, визначався їх характер, робились відповідні висновки.

3. Дані експериментальних досліджень

В ході експериментальних досліджень з'ясувалося, що розподіл напружень і переміщення вузлів в моделі металевого одношарового циліндричного стержневого покриття залежать від конс-

труктивної форми та схеми навантаження.

Проведений комплекс досліджень і подальша обробка показань прогиномірів, індикаторів і тензодатчиків дозволили визначити вплив різних систем і схем навантаження на напружено-деформований стан конструкції.

В результаті випробувань було встановлено, що в системі без підкріплень максимальні напруження як розтягу, так і стиску були приблизно в 1,3 рази більші, ніж в системі із зтяжками і майже в 1,2 рази більші, ніж в системі з горизонтальними фермами.

Для системи із зтяжками максимальні напруження розтягу були зафіксовані в розкосах, стискання — в стояках, що не спостерігалось для систем без підкріплень і з горизонтальними фермами, де максимальні напруження як на розтяг, так і на стиск були тільки в поясах.

В системі із зтяжками у верхній зоні було відмічено скорочення кількості стиснутих поясних елементів як у чвертях покриття, так і в середній зоні, значення напружень стиску порівняно із системою без підкріплень зменшились в 1,5—2,4 рази.

Горизонтальні ферми істотно не вплинули на зменшення кількості стиснутих елементів. Свій знак змінили тільки крайні елементи поясів у верхній зоні. Значення напружень стиску зменшились порівняно із системою без підкріплень в 1,3—1,7 рази.

Оцінюючи вплив конструктивних заходів на переміщення вузлів, треба відзначити, що всі три експериментальні системи з повним і однобічним навантаженням поведуться геометрично нелінійно. Максимальні переміщення, як горизонтальні, так і вертикальні, в системі без підкріплень в 1,9 і 1,5 рази більші, ніж в системі з зтяжками і в 1,5 і 1,6 рази більші, ніж в системі з горизонтальними фермами. В системі з зтяжками максимальні горизонтальні переміщення були зафіксовані у верхній зоні, що не спостерігалось в системах без підкріплень і з горизонтальними фермами, де максимальні переміщення були відмічені тільки в нижніх гранях покриття.

Максимальні вертикальні переміщення для всіх трьох експериментальних систем при повному навантаженні спостерігались у верхній зоні. Однак при однобічному навантаженні в системі з горизонтальними фермами максимальні переміщення були відмічені в ділянці гребеня, а в системах без підкріплень і з зтяжками — в нижніх гранях покриття.

Збільшення жорсткості системи за рахунок введення зтяжок привело до зменшення переміщень вузлів в середньому в 5,5 рази, а з введенням в систему горизонтальних ферм — в 1,6 рази.

1. Физическое моделирование

С целью проведения экспериментальных исследований покрытий, способных перекрывать большие площади, а именно, больше чем исследованные в работах [1—5], разработана и испытана модель металлического однослойного цилиндрического стержневого покрытия с поперечными и продольными ребрами и нисходящими раскосами, которая по геометрическим параметрам в соотношении размеров с натуральными образцами в 1,5 раза превышает ранее спроектированную и сконструированную физическую модель [6]. Габаритные размеры новой модели в плане приняты $B \times L = 1,8 \times 2,4$ м, стрела подъема в поперечном сечении $f = 0,42$ м (1:20 к реальной системе) (рис. 1). Соотношение длины L к ширине B покрытия $L/B = 1,3$; количество граней m принято 6, а количество панелей $n = 8$, что позволило получить оптимальный угол наклона раскосов к поясам в гранях $\varphi = 47^\circ 37'$. Элементы модели выполнены из стержней трубчатого сечения (наружный диаметр 21 мм, толщина стенки 3 мм). Ребра выполнены неразрезными, стойки и раскосы присоединены к ребрам с помощью косынок, которые изготовлены из листового металла толщиной 4 мм. Соединение элементов в узлах осуществлялось с помощью сварки. Материал конструкции модели — сталь С245. Элементы для подкрепления — зтяжки и горизонтальные фермы с подвесками в приопорной зоне жестко прикреплены к модели покрытия. Зтяжки изготавливались из стальных тросов, а подвески для образования бортового элемента — из гладких арматурных стержней диаметром 6 мм, причем элементы горизонтальных ферм трубчатого сечения (наружный диаметр 18 мм, толщина стенки 3 мм) выполнялись из того же материала, что и модель покрытия. Для контурного опирания конструкции к специально сконструированной опорной стальной раме (основанию модели) использовались катки из гладкой арматурной стали диаметром 20 мм, что в процессе испытания позволяло избежать нежелательных распоров.

Нагрузка прикладывалась к узлам снизу (рис. 2) как симметрично по поверхности, так и на 1/2 покрытия, причем постепенно, без рывков и ударов с тем, чтобы влиянием сил инерции можно было бы пренебречь.

Устройства для приложения нагрузки удовлетворяли таким основным требованиям:

- давали возможность четко определять напряжения, перемещения и деформации, которые появлялись в модели во время испытания;
- не требовали значительных затрат времени для их приложения и снятия;
- во время испытаний обеспечивалась стабильность нагрузки, то есть неизменность её во времени.

Для наблюдения за поведением модели во время проведения испытаний использовались прогибомеры ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм, индикаторы часового типа ИЧ-10 с точностью до 0,01 мм и тензодатчики ПКБ-10-200 с базой 10 мм. Прогибомеры и индикаторы крепились к специально изготовленным вспомогательным стальным рамам, а тензодатчики наклеивались непосредственно на стержни покрытия. Регистрация показаний тензодатчиков осуществлялась с помощью измерителя деформаций цифрового (ИДЦ-1) и цифрового тензометрического моста (ЦТМ-5). Размещение приборов и датчиков соответствовало тем местам и точкам в конструкции, где предусматривались наибольшие перемещения и деформации (рис. 3). Все измерительные приборы были закреплены на модели до испытания для обеспечения стабильности их показаний.

2. Постановка задачи, описание программы и методики экспериментальных исследований

Перед началом испытаний ставилась задача — определить влияние разных систем и схем приложения нагрузки на напряжения в элементах и перемещения узлов с целью сравнения закономерностей напряженно-деформированного состояния систем без подкреплений (см. рис. 1), с затяжками (рис. 4) и с горизонтальными фермами (рис. 5).

Испытание модели выполнялось для безраспорной системы, которая способствовала введению в состав покрытия затяжек (рис. 6) и горизонтальных ферм (рис. 7). Эксперимент проводился при температуре $+20 \pm 2$ °С и влажности, которая близка к нормальной. К началу испытаний выполнялось тарирование приборов.

Процесс проведения эксперимента предусматривал:

- приложения нагрузки к модели покрытия;
- выдержку под нагрузкой;
- измерение перемещений и деформаций;
- снятие нагрузки.

Для определения закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния покрытия принималась специальная последовательность приложения нагрузки по этапам. После завершения каждого этапа приложения нагрузки определялись показания вертикальных и горизонтальных перемещений узлов с помощью прогибомеров и индикаторов, а также относительные деформации в элементах с помощью тензодатчиков, размещение которых показано на рис. 3.

Для модели без подкрепляющих элементов осуществлялось поэтапное приложения нагрузки по 180–220 Н на узел с выдержкой для каждого этапа по 10 минут, после чего с помощью приборов определялись относительные деформации ε и перемещения δ . Максимальная нагрузка на узел составляла 1000 Н.

Вторая экспериментальная система предусматривала введения затяжек, процесс натяжения которых выполнялся ступенями в количестве не менее 10. Причем усилие натяжения в каждом тросе доводили до 2000 Н. Использовались предварительно оттарированные трубчатые кольца шириной 15 мм (наружный диаметр 51 мм, толщина стенки 6 мм), на которые, для определения относительных деформаций в тросах, были наклеены тензометрические датчики сопротивления. Поэтапное приложения нагрузки к модели, подкрепленной затяжками, составляла 180–220 Н на узел (выдержка для каждого этапа 20 минут) с последующим определением ε и δ . Максимальная нагрузка для такой системы составляла 1000 Н на узел.

В завершение модель покрытия была подкреплена горизонтальными фермами. При этом поэтапное приложения нагрузки составляло 180–220 Н на узел с выдержкой для каждого этапа по 15 минут, после чего с помощью приборов определялись показания относительных деформаций ε и перемещений δ . Максимальная нагрузка на узел составляла 1000 Н.

В результате для каждой экспериментальной системы выполнялось полное и одностороннее приложения нагрузки к модели (рис. 8). Но, поскольку приборы были установлены на 1/4 покры-

тия, то одностороннее приложения нагрузки выполнялось слева и справа. Результаты каждого испытания записывались в журналы и ведомости. Проводилось по 5 этапов приложения нагрузки для трех экспериментальных систем и трех схем. После каждого этапа приложения нагрузки осуществлялась соответствующая выдержка. Во время выдержек модель тщательно образом осматривалась и фотографировалась, фиксировались и измерялись деформации, определялся их характер, делались соответствующие выводы.

3. Данные экспериментальных исследований

В ходе экспериментальных исследований выяснилось, что распределение напряжений и перемещений узлов в модели металлического однослойного цилиндрического стержневого покрытия зависят от конструктивной формы и схемы приложения нагрузки.

Проведенный комплекс исследований и последующая обработка показаний прогибомеров, индикаторов и тензодатчиков позволили определить влияние разных систем и схем приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние конструкции.

В результате испытаний было установлено, что в системе без подкреплений максимальные напряжения как растягивающие, так и сжимающие были приблизительно в 1,3 раза больше, чем в системе с затяжками и почти в 1,2 раза больше, чем в системе с горизонтальными фермами.

Для системы с затяжками максимальные растягивающие напряжения были зафиксированы в раскосах, сжимающие — в стойках, что не наблюдалось для систем без подкреплений и с горизонтальными фермами, где максимальные напряжения, как на растяжение, так и на сжатие были только в поясах.

В системе с затяжками в верхней зоне было отмечено сокращение количества сжатых поясных элементов как в четвертях покрытия, так и в средней зоне, значения сжимающих напряжений по сравнению с системой без подкреплений уменьшились в 1,5—2,4 раза.

Горизонтальные фермы существенного влияния на уменьшение количества сжатых элементов не оказали. Свой знак изменили только крайние элементы поясов в верхней зоне. Значения сжимающих напряжений уменьшились по сравнению с системой без подкреплений в 1,3—1,7 раза.

Оценивая влияние конструктивных мероприятий на перемещения узлов, нужно отметить, что все три экспериментальные системы при полном и одностороннем приложениях нагрузки ведут себя геометрически нелинейно. Максимальные перемещения, как горизонтальные, так и вертикальные, в системе без подкреплений в 1,9 и 1,5 раза больше, чем в системе с затяжками и в 1,5 и 1,6 раза больше, чем в системе с горизонтальными фермами. В системе с затяжками максимальные горизонтальные перемещения были зафиксированы в верхней зоне, что не наблюдалось в системах без подкреплений и с горизонтальными фермами, где максимальные перемещения были отмечены только в нижних гранях покрытия.

Максимальные вертикальные перемещения для всех трех экспериментальных систем при полном приложении нагрузки наблюдались в верхней зоне. Однако, при одностороннем приложении нагрузки в системе с горизонтальными фермами максимальные перемещения были отмечены в зоне конька, а в системах без подкреплений и с затяжками — в нижних гранях покрытия.

Увеличение жесткости системы за счет введения затяжек привело к уменьшению перемещений узлов в среднем в 5,5 раза, а с введением в систему горизонтальных ферм — в 1,6 раза.

1. Physical modeling

In order to carry out experimental research of coverage able to cover large areas, namely, larger than areas studied in [1—5], the model of metallic single-layer cylindrical bar coverage with transversal and longitudinal ribs and descending diagonals, dimensions of which by geometric parameters, regarding dimensions of full-scale specimen 1.5 times exceed designed and constructed physical model [6] was constructed and tested.

Overall dimensions of new models in plane are taken as $B \times L = 1.8 \times 2.4$ m, rise in cross-section $f = 0.42$ m (1:20 in real system) (Fig. 1). Length L -width B ratio of the coverage $L/B = 1$; number of facets m is taken as 6, and the number of panels $n=8$, that permitted to obtain optimal angle of diagonal slope-to belts in facets $\varphi = 47^\circ 37'$. Elements of the model are made of bars of tubular section (external diameter — 21 mm, wall thickness — 3 mm). Ribs are made uncut, pillars and diagonals are connected to ribs by means of gusset plates, made of sheet metal of 4 mm of thickness. Connection of elements in nodes is performed by welding, material used for models construction — C 245 steel. Supporting elements are tie-bars and horizontal trusses with suspensions placed in support zone are rigidly fixed to coverage model. Tie-bars were made of steel

ropes and suspensions intended for formation of edge element are made of smooth reinforcement bars, 6 mm of diameter, the elements of horizontal girders of tubular section (external diameter – 18 mm, wall thickness — 3 mm) were made of the same material that was used for coverage model. For contour resting of the structure on specially designed steel supporting frame (foundation of the model) rollers made of smooth reinforcement-bar steel, 20 mm of diameter were used, this prevented the usage of thrust during the process.

The load was applied to the nodes from below (Fig. 2) both symmetrically along the surface and on 1/2 of the coverage, without jerks and shocks in order to neglect inertial forces influence-

Loading devices met the following requirements:

— enabled to determine stress, displacement and deformations, emerging in the model in the course of testing procedure.

— they did not require considerable expenditures of time for their mounting and dismounting;

— loading stability was provided during the test. i. e. its stability in time.

To control model behavior during the test deflectometer ПАО-6 with scale factor of 0.01 mm, dial indicator Н4-10, with the accuracy of 0.01 mm and strain gauges ПКБ-10-200 with the base of 10 mm were used. Deflectometers and indicators were fixed to specially designed auxiliary steel frames, and strain gauges were bonded directly on bars of coverage. Registration of strain gauges indications was performed by means of strain gauge of digital (ИДЦ-1) and digital strain measuring bridge (ЦТМ-5). Location of instruments and sensors corresponded to places and points in the structure where the most considerable displacement and deformations were likely to occur (Fig. 3). All measuring instruments were fixed on the model prior the test to provide the stability of indications.

2. Experimental setup, program description and techniques of experimental research

The problem to be solved during the test was to determine the influence of various systems and loading schemes on the stresses in elements and nodes displacement in order to compare regularities of stressed-strained state of systems without support (see Fig. 1), with tie-bars (Fig. 4), and with horizontal girders. Model testing was carried out for frameless system, which was convenient for introduction of tie-bars in the coverage (Fig. 6) and horizontal girders (Fig. 7). The experiment was carried out at the temperature of $+20 \pm 2$ °C and humidity close to normal. Calibration of devices was performed prior to the experiment. The procedure of the experiment included:

- loading of coverage model;
- holding at load;
- measurement of displacements and deformations;
- removal of loading;

In order to determine the regularities of stressed-strained state changes of the coverage, special sequence of loading by steps was used.

After the completion of each stage of loading, the indications of vertical and horizontal displacements of nodes were determined by means of indicators and deflectometers, and relative deformations in elements were determined using strain gauges, their location is shown in (Fig. 3).

For the model without supporting elements step-by-step loading was carried out by 180—220 N per node, holding for each step being 10 min, after that relative deformations ϵ and displacements δ were determined using measuring instruments, maximum loading per node was 1000 N.

The second experimental system stipulated the introduction of tie-bars, their tension was performed by stages, number of stages is at least 10.

Tension force in each cable was brought up to 2000 N. Calibrated tubular rings 15 mm of width (external diameter 51 mm, wall thickness 6 mm) were used, bonded strain gauges were located on the rings to define relative deformations.

Step-by-step loading of the model, supported by tie-bars, was 180—220 N per node (holding for each step — 20 min), with further determination of ϵ and δ .

Maximum loading for such system was 1000 N per node: at last the model of coverage was supported by horizontal girders. Step-by-step loading was 180—220 N per node, holding for each step was 15 mm; after that indications of relative deformations ϵ and displacements δ were determined, using measuring instruments. Maximum loading per node was 1000 N. As a result for each experimental system complete and unilateral loading of models was carried out (Fig. 8). But, as the devices were installed on 1/4 of coverage, then unilateral loading was carried out from the

left and from the right. The results of each loading were registered in test logs.

Five stages of loading for three experimental systems and three loading schemes were carried out, after completion of each stage of loading corresponding holding was maintained. During holding period the model was controlled and photographs were taken, deformations were registered and measured, their character was determined, conclusions were made.

3. Data of experimental research

The results of experimental research showed that distribution of stresses and displacements of nodes in the model of metallic single-layer cylinder bar coverage depend on the form of design and loading scheme.

The research carried out and further processing of data, measured by deflect meters, indicators and strain gauges enabled to determine the influence of various system and loading schemes on stressed-deformed state of the construction.

As a result of research it was found out that, in the system without support, maximum stresses both tensile stresses and compression stresses were approximately 1.3 times greater, than in the system with tie-bars and almost 1.2 times greater than in the system with horizontal girders.

For system with tie-bars maximum tensile stresses were reported in diagonals, compression stresses-in pillars, that was not observed in systems without supports and with horizontal girders, where maximum stresses, both tensile stresses and compression stresses were observed only in belts.

In the system with tie-bars, the reduction of the number of compressed belt elements was observed in upper zone both in quarters of the coverage and in the middle zone, values of compressing stresses decreased 1.5—2.4 times as compared with the system without support.

Horizontal girders did not influence greatly on the reduction of the number of compressed elements. Only boundary elements of the belts in upper zone changed their sign. The values of compressed stresses decreased as compared with the system with out supports 1.3—1.7 times.

Evaluating the influence of design on nodes displacements, it should be noted that the behavior of all three experimental system in case of complete and unilateral loading is geometrically non-linear.

Maximum displacements both horizontal and vertical, in the system with out supports are 1.9 and 1.5 times greater than in systems with tie-bars, and 1.5 and 1.6 times greater, than in system with horizontal girders. In the systems with tie-bars maximum horizontal displacements were observed in upper zone, that was not observed in systems without supports and with horizontal girders, where maximum displacements were observed only in lower facets of the coverage.

Maximum vertical displacements for all three experimental systems in case of complete loading were observed in upper zone. However, in case of unilateral loading in the system with horizontal girders maximum displacements were observed in the ridge zone, and in the system with out support and with tie-bars-in lower facets of the coverage. Increase of system rigidity at the expense of tie-bars introduction led to the decrease of nodes displacements on average 5.5 times, whereas with the introduction of horizontal girders — 1.6 times.

Висновки

1. На спроектованій і виготовленій безрозпірній фізичній моделі металевого одношарового циліндричного стержневого покриття за допомогою спеціально сконструйованих просторових П-подібних рам проведено випробування трьох експериментальних систем на дію повного і однобічного зовнішнього навантаження.

2. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованих автором конструкцій покриттів з затяжками та з горизонтальними фермами і дозволили встановити закономірності напружено-деформованого стану покриття в залежності від конструктивної форми і схеми навантаження.

3. За результатами проведених експериментальних досліджень встановлено істотний вплив елементів підкріплення у вигляді затяжок та горизонтальних ферм на напружено-деформований стан покриття, що проявилось у зниженні напружень в елементах і зменшенні переміщень вузлів, причому в системах із затяжками зафіксовано значне зменшення відхилень з'єднань елементів порівняно із системами без підкріплень та з горизонтальними фермами, до того ж, істотно знизилась напруженість в стержнях.

Выводы

1. На спроектированной и изготовленной безраспорной физической модели металлического однослойного цилиндрического стержневого покрытия с помощью специально сконструированных пространственных П-подобных рам проведены испытания трех экспериментальных систем на действие полной и односторонней внешних нагрузок.

2. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенных автором конструкций покрытий с затяжками и с горизонтальными фермами и позволили установить закономерности напряженно-деформированного состояния покрытия в зависимости от конструктивной формы и схемы нагрузки.

3. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено существенное влияние элементов подкрепления в виде затяжек и горизонтальных ферм на напряженно-деформированное состояние покрытия, что проявилось в снижении напряжений в элементах и уменьшении перемещений узлов, причем в системах с затяжками зафиксировано значительное уменьшение отклонений соединений элементов по сравнению с системами без подкреплений и с горизонтальными фермами, к тому же, напряжения в стержнях снизились существенно.

Conclusions

1. Testing of three experimental systems intended for control of the influence of complete and unilateral external loading was performed using the designed and manufactured physical model of metal single-layer cylinder-shaped bar coverage applying specially- designed spatial П-shape frames.

2. The results obtained proved the efficiency of coverage designs equipped with the tie-bars and horizontal girders, suggested by the author, and allowed to determined the regularities of stressed-strained state of coverage, depending on the form of design and loading pattern.

3. The result of the experimental research showed considerable influence of supporting elements, namely, tie-bars and horizontal girders on stressed-strained state of coverage that resulted in reduction of stresses in elements and decrease of nodes displacements, in systems with tie-bars considerable reduction of deviations of element joints as compared with systems without supports and with horizontal girders, besides tension in bars is considerably lower.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Свердлов В. Д., Сіянов О. І. Металеві циліндричні стержневі покриття. — Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. — 134 с.
2. Рюле Г. Пространственные покрытия // Конструкции и методы возведения: Пер. с нем. — Том 2. — М.: Стройиздат, 1974. — 247 с.
3. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции / Пер. с нем. — М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. — 95 с.
4. Попов И. Г. Цилиндрические стержневые системы. — Л.; М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. — 112 с.
5. Свердлов В. Д., Сіянов А. И. Совершенствование цилиндрических стержневых систем покрытий // Труды Междунар. конф. «Теория и практика металлических конструкций». — Том 2. — Донецк-Макеевка. — 1997. — С. 37—41.
6. Сіянов О. І. Теоретичні та експериментальні дослідження одношарових циліндричних стержневих покриттів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2001. — № 3. — С. 13—18.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Надійшла до редакції 01.11.05
Рекомендована до друку 04.12.05

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

Сіянов Александр Ильич — доцент кафедры промышленного и гражданского строительства.
Винницкий национальный технический университет

Olexandr Siyanov — Assistant Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering.
Vinnitsia National Technical University