

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УЖЕГОВ СЕРГІЙ ОЛЕГОВИЧ

УДК 692.45

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ, ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ
ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНОК ТИПУ «ГІПЕРБОЛІЧНИЙ ПАРАБОЛОЇД»
З ВИКОРИСТАННЯМ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Рівне – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,
АНДРІЙЧУК Олександр Валентинович,
Луцький національний технічний університет,
доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КЛИМЕНКО Євген Володимирович
Одеська академія будівництва та архітектури,
завідувач кафедри залізобетонних конструкцій та
транспортних споруд;

кандидат технічних наук, доцент,
БЛОЗІР Віталій Володимирович
Львівський національний аграрний університет,
доцент кафедри будівельних конструкцій.

Захист відбудеться « 21 » травня 2019 р. о 14:00 год на засіданні спеціалізованої вченої ради К 47.104.06 в Національному університеті водного господарства та природокористування за адресою: 33028, м. Рівне, вул. Чорновола, 49, ауд. 673.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33028, м. Рівне, вул. О. Новака, 75 та на сайті університету www.nuwm.edu.ua

Автореферат розісланий « 13 » квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради К 47.104.067
к.т.н., доцент



О.М. Бордюженко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В багатьох країнах світу за останні роки під час будівництва промислових і громадських будівель та спеціальних споруд спостерігається тенденція до застосування нових конструктивних рішень елементів покриттів – тонкостінних оболонок. Варто відмітити, що конструктивні переваги оболонок, підвищена технологічність, простота їх виготовлення та монтажу привертають до себе увагу науково-дослідних та проектних установ і виробників. Особливе місце серед оболонок покриттів займають оболонки від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда (гіпар). Завдяки архітектурній виразності та можливості зведення з них різноманітних комбінацій конструктивних систем, гіпари найчастіше можна зустріти у вигляді покриттів ангарів, спортивних залів, виставкових павільйонів та інших великопролітних споруд. Використання таких оболонок дозволяє знизити витрати матеріалів, порівняно з традиційними видами покриття, створити об'єкти поліпшеної архітектурної виразності, комфортності тощо. Оболонки у формі гіперболічного параболоїда знайшли практичне застосування в будівництві пізніше, ніж оболонки інших типів, тому їх статичні та жорсткісні характеристики виявились недостатньо дослідженими та вивченими.

Сучасні тенденції вдосконалення будівель та споруд направлені на заміну конструкцій із традиційних матеріалів композитними матеріалами, для яких характерними є ряд специфічних особливостей – серед яких, перш за все, підвищена тріщиностійкість і несуча здатність. Вітчизняні та іноземні науковці, досліджуючи залізобетонні конструкції з дисперсним армуванням отримують затребувані результати. Проте, огляд і аналіз літератури показує, що дослідженню несучої здатності тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону надавалася недостатня увага.

У зв'язку з актуальністю дослідження тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону під час статичних навантажень, у даній роботі представлено аналіз напружено-деформованого стану, оцінки надійності та розрахунок тонкостінних оболонок за одноразових та повторних навантажень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках держбюджетної теми Луцького національного технічного університету «Дослідження напружено-деформованого стану сталевібробетонних конструкцій, удосконалення методики оцінки надійності та технології їх виготовлення» (державний реєстраційний номер 0115U002205) і науково-дослідної теми «Деформативність та тріщиностійкість тонкостінних оболонок покриття» (державний реєстраційний номер 0117U004769), а також відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри промислового та цивільного будівництва Луцького національного технічного університету.

Мета дослідження. Метою є встановлення особливостей напружено-деформованого стану тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного

параболоїда зі сталевібробетону (СФБ) під час дії одноразових і повторних навантажень, його оцінка та удосконалення методики розрахунку.

Досягнення мети передбачає розв'язання таких завдань:

- на основі аналізу літературних джерел обґрунтувати можливість та доцільність використання сталевібробетону для тонкостінних оболонок покриття від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда при дії одноразових і повторних навантажень;

- розробити ефективну модель конструкції тонкостінної оболонки покриття зі сталевібробетону у формі гіперболічного параболоїда та виконати її порівняння з традиційними оболонками зі звичайного залізобетону або армоцементу;

- розробити методику та програму експериментальних досліджень напружено-деформованого стану та тріщиностійкості тонкостінних оболонок покриття зі СФБ під час дії одноразових та повторних (малоциклових) навантажень;

- експериментально встановити вплив жорсткого та вільного типів закріплення контура оболонки на напруження в сталевібробетоні від дії навантажень;

- удосконалити визначення напруженого стану та прогинів в оболонках двоякої кривини з ненульовою кривиною кручення із застосуванням методу подвійних рядів Фур'є;

- на основі експериментальних даних удосконалити методику розрахунку несучої здатності тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону.

Об'єктом дослідження є робота тонкостінних оболонок від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда, що виготовлені зі сталевібробетону.

Предметом дослідження є напружено-деформований стан, тріщиностійкість, несуча здатність і розрахунок оболонок від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону під дією одноразових та повторних навантажень.

Методи досліджень: аналіз опублікованих наукових праць; експериментальні дослідження роботи тонкостінних оболонок від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону за розробленою програмою; статистичний аналіз результатів досліджень; теоретичні дослідження; порівняння та верифікація теоретичних і дослідних даних.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна виконаної дисертаційної роботи полягає в наступному:

- вперше отримані нові експериментальні дані (несуча здатність, тріщиностійкість та деформативність) тонкостінних оболонок від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону під час дії одноразових та повторних навантажень;

- вперше доведено, що тонкостінні оболонки від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда, що виготовлені зі СФБ з відсотком армування 1,5 %, за показниками несучої здатності та тріщиностійкості перевищують відповідні показники тонкостінних оболонок зі звичайного залізобетону;

- отримано подальший розвиток моментної теорії пологих оболонок шляхом узагальнення методу подвійних рядів Фур'є, що дозволяє враховувати кривину кручення гіперболічного параболоїда;

- встановлено, що у разі жорсткого закріплення контуру оболонки у формі гіперболічного параболоїда відбувається зменшення значення виникаючих напружень більш ніж в два рази в порівнянні з вільним її обпиранням.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- запропонована та запатентована конструкція тонкостінної оболонки від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда, що виготовлена зі СФБ і може використовуватися в будівельній практиці;

- методику розрахунку тонкостінної оболонки від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону рекомендується використовувати у проектній практиці;

- розроблені комп'ютерні програми «Розрахунок оболонок» і «Розрахунок оболонок двоякої кривини», що призначені для обчислення деформацій та дослідження стійкості оболонок обертання з від'ємною гаусовою кривиною у формі гіперболічного параболоїда. Програми захищені авторськими свідоцтвами;

- результати дослідження тонкостінних оболонок у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону використані в навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи були одержані самостійно. У публікаціях у співавторстві здобувачеві належать: розроблення методики дослідження гіпарів, безпосередня участь у проведенні експериментальних досліджень, обробленні й аналізі їх результатів, а також теоретичні розрахунки елементів зі СФБ.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались і були схвалені на:

1. XXVI Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу «Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва» (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, 2012);
2. Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопільський національний технічний університет, м. Тернопіль, 2012);
3. XXXVI Університетській студентській науково-технічній конференції «Україна сьогодні: інтеграція освіти та науки» (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, 2013);
4. I Міжнародній науково-практичній виставці-конференції молодих учених та студентів «Інновації у будівництві» (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, 2014);
5. II Міжнародній науково-практичній виставці-конференції молодих учених та студентів «Інновації у будівництві» (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, 2016);
6. VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті Трансбуд–2017» (Український державний університет залізничного

- транспорту, м. Харків, 19–21 квітня 2017 року);
7. VII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті Трансбуд–2018» (Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, 14–16 листопада 2018 року).

Публікації. Матеріали дисертації викладені в 11 статтях, що надруковані у збірниках наукових праць, які визнані фаховими виданнями, в тому числі чотири статті опубліковані одноосібно та одна стаття у виданні, що індексується науковою базою Scopus.

Отриманий патент на корисну модель UA 127805 U, МПК E04B 1/04 (2006.01) «Сталефібробетонна тонкостінна оболонка покриття у формі гіперболічного параболоїда» № 71894 від 27.08.2018 року та свідоцтва про реєстрацію авторських прав на твори № 59810 «Комп'ютерна програма «Розрахунок оболонок» від 22.05.2015 року та № 81301 «Комп'ютерна програма «Розрахунок оболонок двоякої кривини» від 07.09.2018 року.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 186 сторінках (основна частина – 135 ст.). Дисертація містить 19 таблиць і 95 рисунків, 127 найменувань використаних джерел, а також 6 додатків на 20 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика та зв'язок із науковими програмами.

У **першому розділі** проаналізовано область застосування та наукові досягнення в галузі проектування та експлуатації пологих тонкостінних оболонок, зокрема, оболонок від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда під час дії, як одноразових, так і повторних малоциклових навантажень. Проведено огляд і аналіз праць, що присвячені загальній теорії оболонок, що належать вченим: Т.Н. Азізову, В.А. Баженову, В.І. Гуляєву, П.М. Варваку, В.З. Власову, А.С. Вольміру, К.З. Галімову, А.Л. Гольденвейзеру, Я.М. Григоренку, П.А. Жилину, Н.А. Кільчевському, Р. Куранту, К. Ланцошу, Л. Лейбензону, А.І. Лур'є, Х.М. Муштарі, К.З. Галімову, А.А. Назарову, В.М. Нікірєву, В.В. Новожилову, П.М. Огибалову, А.В. Рябову, А.О. Сяському, С.П. Тимошенко, А.П. Філіну, К.Ф. Черних.

Здійснено порівняння матеріалів для тонкостінних оболонок покриття, серед яких армоцемент та сталефібробетон. Проведено аналіз досліджень особливостей роботи СФБ конструкцій при впливі різних видів навантажень.

У **другому розділі** розроблено схему стендових випробувань тонкостінних оболонок від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда з армоцементу та сталефібробетону під час дії одноразових та повторних малоциклових навантажень. Детально описано програму та обсяг експериментальних досліджень.

Відповідно до сформульованої у роботі мети, проведено дві комплексні серії експериментальних досліджень. Усього випробувано, згідно з планом дослідження: 2 армоцементні (АЦ) оболонки, 2 сталевіфібробетонні (СФБ) оболонки, 24 бетонних та сталевіфібробетонних призм, 24 бетонних та сталевіфібробетонних кубів. Визначено вплив призмової міцності бетону матриці, відсотка фібрового армування та діаметра фібр на міцність сталевіфібробетону методом математичного планування експерименту – представлено на рис. 1.

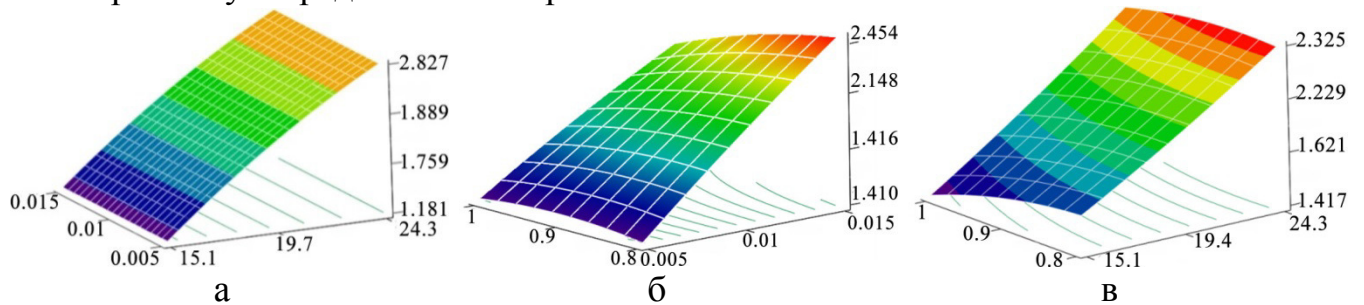


Рисунок 1 – Залежності міцності сталевіфібробетону при розтягу:
 а – від міцності бетону матриці та коефіцієнта фібрового армування
 б – від діаметра фібр та коефіцієнта фібрового армування
 в – від міцності бетону матриці та діаметра фібр

Схему дослідних тонкостінні оболонок покриття від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда з армоцементу та сталевіфібробетону з розмірами в плані: $a \times b = 2250 \text{ мм} \times 3500 \text{ мм}$, товщиною: $t = 30 \text{ мм}$ і стрілами підйому $f_1 = f_2 = 500 \text{ мм}$ наведено на рис. 2.

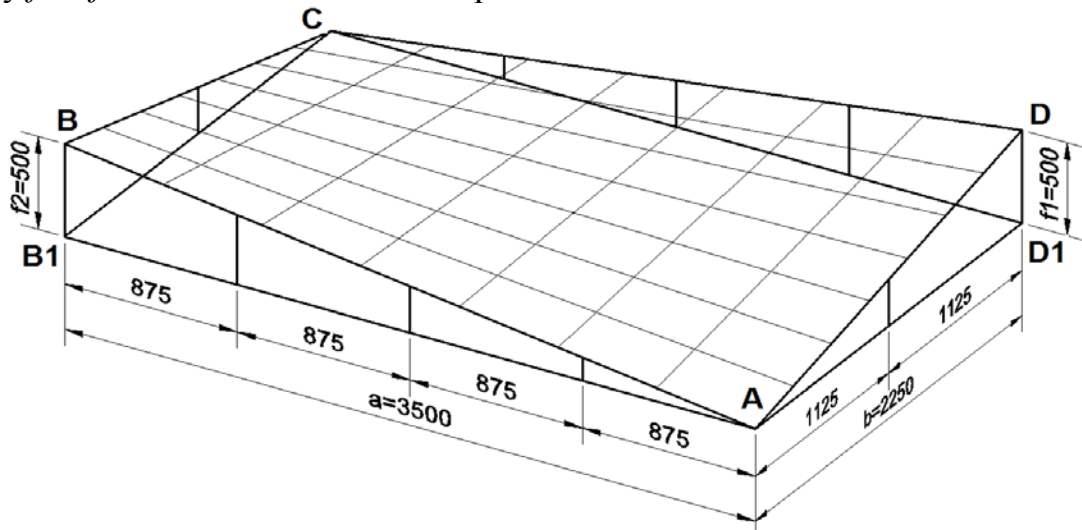


Рисунок 2 – Схема оболонки покриття

Дослідні тонкостінні гіпарні оболонки виготовлялися із дрібнозернистого бетону класу С16/20. Відсоток вмісту фібр у СФБ оболонці становив $\mu = 1,5\%$ (застосовувалася сталеві хвиляста фібра $\varnothing 1 \text{ мм}$ і довжиною 50 мм). А для армування армоцементної оболонки застосовано зварні сітки із діаметром дроту сітки – 0,5 мм і розміром сторін чарунок – 12,5 мм.

Повну характеристику, кількість дослідних бетонних та сталевіфібробетонних зразків і досліджувані фактори подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристика та кількість (n) дослідних зразків

№	Характеристика та розміри зразків, мм	Маркування зразків	n	Досліджувані фактори
1	Армоцементна оболонка у формі гіпара	Г-А-1	1	Несуча здатність, тріщиностійкість, деформативність АЦ за одноразових навантажень
2	Сталефібробетонна оболонка у формі гіпара	Г-СФБ-1	1	Несуча здатність, тріщиностійкість, деформативність СФБ за одноразових навантажень
3	Армоцементна оболонка у формі гіпара	2Г-А-1	1	Несуча здатність, тріщиностійкість, деформативність АЦ за повторних короточасних навантажень
4	Сталефібробетонна оболонка у формі гіпара	2Г-СФБ-1	1	Несуча здатність, тріщиностійкість, деформативність СФБ за повторних короточасних навантажень
5	Бетонні куби, 100×100×100	КБ-1...12	12	Кубикова міцність бетону. Визначення класу бетону
6	Сталефібробетонні куби, 100×100×100	КСФБ-1...12	12	Міцність сталефібробетону під час стискання
7	Бетонні призми, 150×150×600	ПБ-1...6	6	Призмova міцність бетону
8	Сталефібробетонні призми, 150×150×600	ПСФБ-1...6	6	Призмova міцність сталефібробетону
9	Бетонні призми, 100×100×600	2ПБ-1...6	6	Міцність бетону під час розтягу
10	Сталефібробетонні призми, 100×100×600	2ПСФБ-2...6	6	Міцність сталефібробетону під час розтягу

Відповідно до мети дослідження, проведено прикладання зовнішнього рівномірно розподіленого навантаження по всій площі оболонки, як аналог снігового. Прикладання змінного зовнішнього рівномірно розподіленого навантаження до дослідних зразків тонкостінних оболонок у формі гіперболічного параболоїда Г-А-1, Г-СФБ-1, 2Г-А-1 та 2Г-СФБ-1 здійснювали сухим річковим піском. Пісок зважували на електронних терезах, розфасовували по 1 кг у подвійні поліетиленові пакети типу «Майка» і поетапно підвішували на гаки, попередньо встановлені рівномірно по всій площі оболонок за допомогою металевих закладних деталей. Всього на поверхні оболонок закріплено по 126 металевих пластин, відповідно – 126 гаків, до яких у 126 точках відбувалось поетапне підвішування вантажу у відповідності до розробленого режиму навантаження, що представлено на рис. 3.

Для експериментального визначення напружень, що виникають в тонкостінній конструкції покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталефібробетону були опрацьовані дані деформацій в оболонці, що фіксувалися тензOMETричними датчиками опору (тензорезисторами) з базою 50 мм (з розрахунковим опором $R = 406,3 \text{ Ом}$). Тензорезистори були розміщені згідно з схемою, що подана на рис. 4.

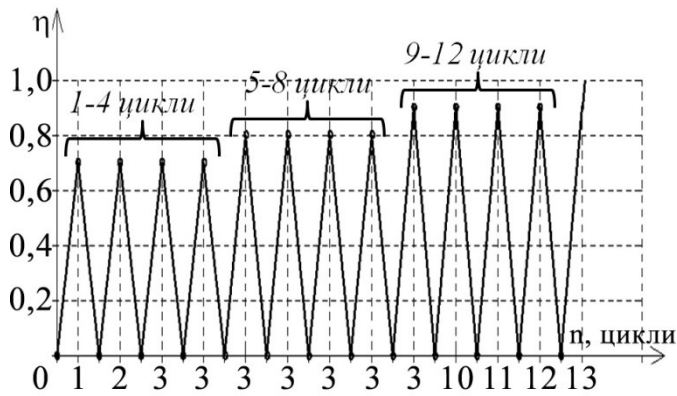


Рисунок 3 – Режим повторних навантажень дослідних оболонок

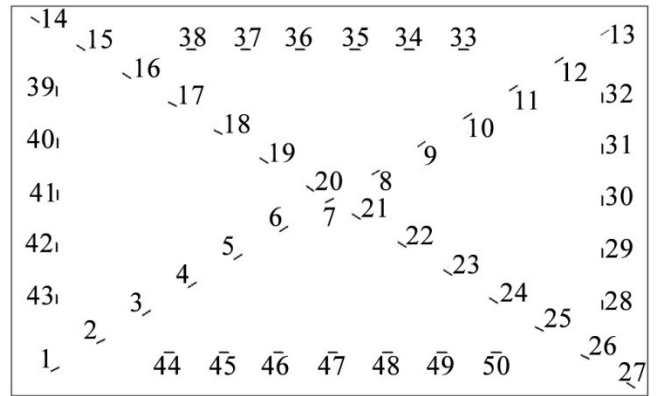


Рисунок 4 – Розміщення тензодатчиків на поверхні оболонки у формі гіпара

Загальний вигляд випробовування армоцементних та сталевібробетонних оболонок у формі гіперболічного параболоїда наведено на рис. 5.



Рисунок 5 – Загальний вигляд випробування оболонки у формі гіпара

У третьому розділі представлено отримані результати проведених досліджень – експериментальні дані щодо несучої здатності та деформаційних характеристик, напружено-деформованого стану тонкостінних оболонок покриттів у формі гіперболічного параболоїда під час дії короточасних одноразових і повторних навантажень. Описано розвиток процесу тріщиноутворення в армоцементних та сталевібробетонних тонкостінних оболонках у формі гіперболічного параболоїда

за умов дії експлуатаційного навантаження. Досліджено розподіл напружень в тонкостінних конструкціях покриття з сталевібробетону.

Дослідні тонкостінні оболонки від'ємної гаусової кривини, що були виготовлені з армоцементу маркувалися літерою «А», а зі сталевібробетону – «СФБ». Буква «Г» перед позначенням матеріалу, з якого виготовлений даний зразок, означає форму оболонки – гіпар. Цифра «2» перед «Г» вказує на серію зразків (літера «Г» без цифри – перша серія, «2Г» – друга серія). Зразки оболонок Г–А–1 та Г–СФБ–1 були доведені експериментально до руйнування за одноразового навантаження. Критерієм руйнування прийнято, коли прогин оболонки більший за 1/400 від довжини меншої сторони конструкції, а ширина розкриття тріщини більша 0,05 мм. Зразки 2Г–А–1 та 2Г–СФБ–1 досліджувались для вивчення несучої здатності, тріщиностійкості та деформативності за повторного короткочасного навантаження.

Змінне навантаження у кожній точці прикладалось поетапно по 10 Н. На всю площу оболонки $7,875 \text{ м}^2$ було прикладене зовнішнє навантаження $10 \text{ Н} \times 126 = 1,26 \text{ кН}$, яке відповідало рівномірно розподіленому по площі $1,26 \text{ кН} / 7,875 \text{ м}^2 = 160 \text{ Па}$.

Для дослідження оболонок у формі гіперболічного параболоїда з армоцементу та СФБ за одноразового навантаження були дотримані наступні умови:

- на кожному етапі змінне навантаження прикладалося частками, величина яких становила близько 10 % від руйнівного: 2 кг (20 Н) до кожного гака – 320 Па; 3 кг (30 Н) до кожного гака – 480 Па; 4 кг (40 Н) до кожного гака – 640 Па; 5 кг (50 Н) до кожного гака – 800 Па; 6 кг (60 Н) до кожного гака – 960 Па; 7 кг (70 Н) до кожного гака – 1120 Па; 8 кг (80 Н) до кожного гака – 1280 Па; 9 кг (90 Н) до кожного гака – 1440 Па.

- на кожному етапі робилася витримка протягом 15 хвилин для стабілізації напружено-деформованого стану, зняття показів тензометричної станції, прогиноміра, візуального огляду дослідного зразка, виявлення та фіксації тріщин і вимірювання ширини їх розкриття.

Прогини армоцементної оболонки Г–А–1 та сталевібробетонної оболонки Г–СФБ–1, що були зафіксовані за допомогою прогиноміра Аістова (тип 6–ПАО–0,01) на всіх етапах прикладання навантаження представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Прогини тонкостінних оболонок покриття Г–А–1 та Г–СФБ–1

Етап завантаження	Навантаження, Па			Прогин, мм	
	постійне (власна вага)	змінне	всього	Г–А–1	Г–СФБ– 1
1	705	0	705	0	0
2	705	160	865	0,32	0,14
3	705	320	1025	0,57	0,27
4	705	480	1185	0,96	0,46
5	705	640	1345	1,49	0,71
6	705	800	1505	2,14	1,02
7	705	960	1665	4,35	1,89
8	705	1120	1825	6,6	3,11
9	705	1280	1985	11,71	5,83
10	705	1440	2145	20,4	9,90

Рівень прикладання повторних навантажень до оболонок 2Г–А–1 і 2Г–СФБ–1 становив: $\eta_{\text{сyc}} = 0,7$ руйнівних значень (1...4 цикли), $\eta_{\text{сyc}}=0,8$ (5...8 цикли) і $\eta_{\text{сyc}}=0,9$ (9...12 цикли) – згідно рис. 3. Зняття навантаження з оболонок на циклах виконували поетапно, аналогічно до завантаження. Прогини оболонок 2Г–А–1 і 2Г–СФБ–1, що були зафіксовані на 1...12 циклах прикладання повторного навантаження представлено на рис. 6, а та рис. 6, б.

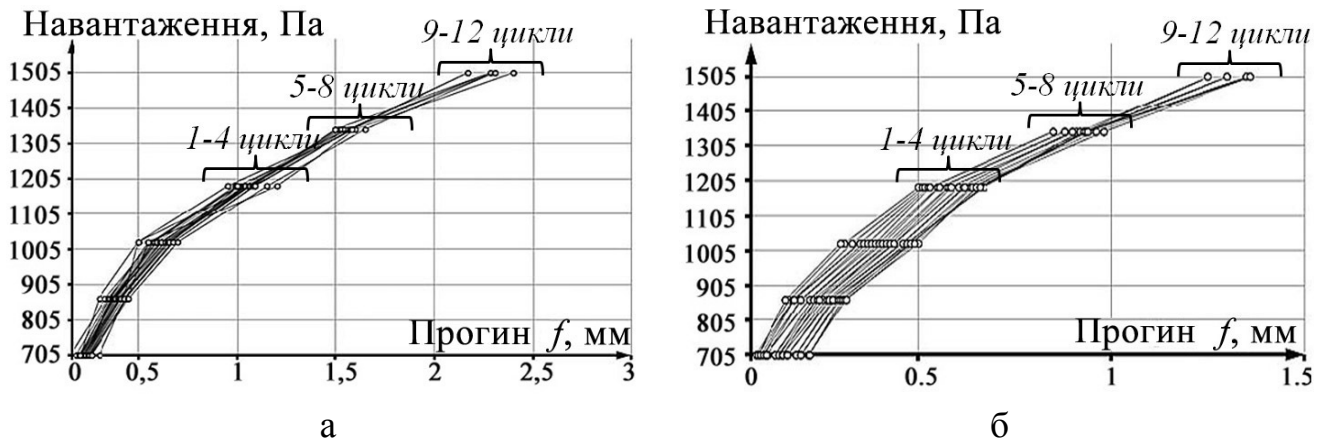


Рисунок 6 – Значення прогинів тонкостінних оболонок при різних рівнях повторних навантажень:

а – прогини оболонки 2Г–А–1, б – прогини оболонки 2Г–СФБ–1

Дослідження процесу тріщиноутворення у моделях тонкостінних конструкцій покриття у формі гіперболічного параболоїда проводилися на зразках Г–А–1 та Г–СФБ–1 під час прикладання одноразових навантажень.

Під час прикладання рівномірно розподіленого навантаження до армоцементної оболонки Г–А–1, тріщини у розтягнутій зоні почали виникати уже на 5 етапі завантаження (згідно табл. 2), коли загальне розподілене навантаження на оболонку досягло $F_T = 1,345$ кПа. На шостому етапі завантаження під час прикладання зусилля $F_T = 1,505$ кПа кількість тріщин збільшилась. Також спостерігався приріст ширини їх розкриття на 0,01–0,02 мм, що було зафіксовано мікроскопом МПБ–3. На наступних етапах завантаження (7–10) фіксувалася поява нових тріщин та подальше розкриття існуючих.

Під час прикладання рівномірно розподіленого навантаження до оболонки Г–СФБ–1 було зафіксовано виникнення перших тріщин у розтягнутій зоні оболонки на 7 етапі (при $F_T=1,665$ кПа), що свідчить про підвищену стійкість оболонки до утворення тріщин у порівнянні з армоцементною оболонкою Г–А–1. Процес тріщиноутворення в оболонках Г–А–1 та Г–СФБ–1 представлено на рис. 7.

В ході експерименту встановлено, що під час прикладання до оболонки зі сталевібробетону 2Г–СФБ–1 повторних навантажень експлуатаційного рівня появи процесу тріщиноутворення не було зафіксовано. А в тонкостінному покритті з армоцементу 2Г–А–1 від дії аналогічних повторних навантажень вздовж увігнутої твірної спостерігалася поява тріщин та їх розкриття.

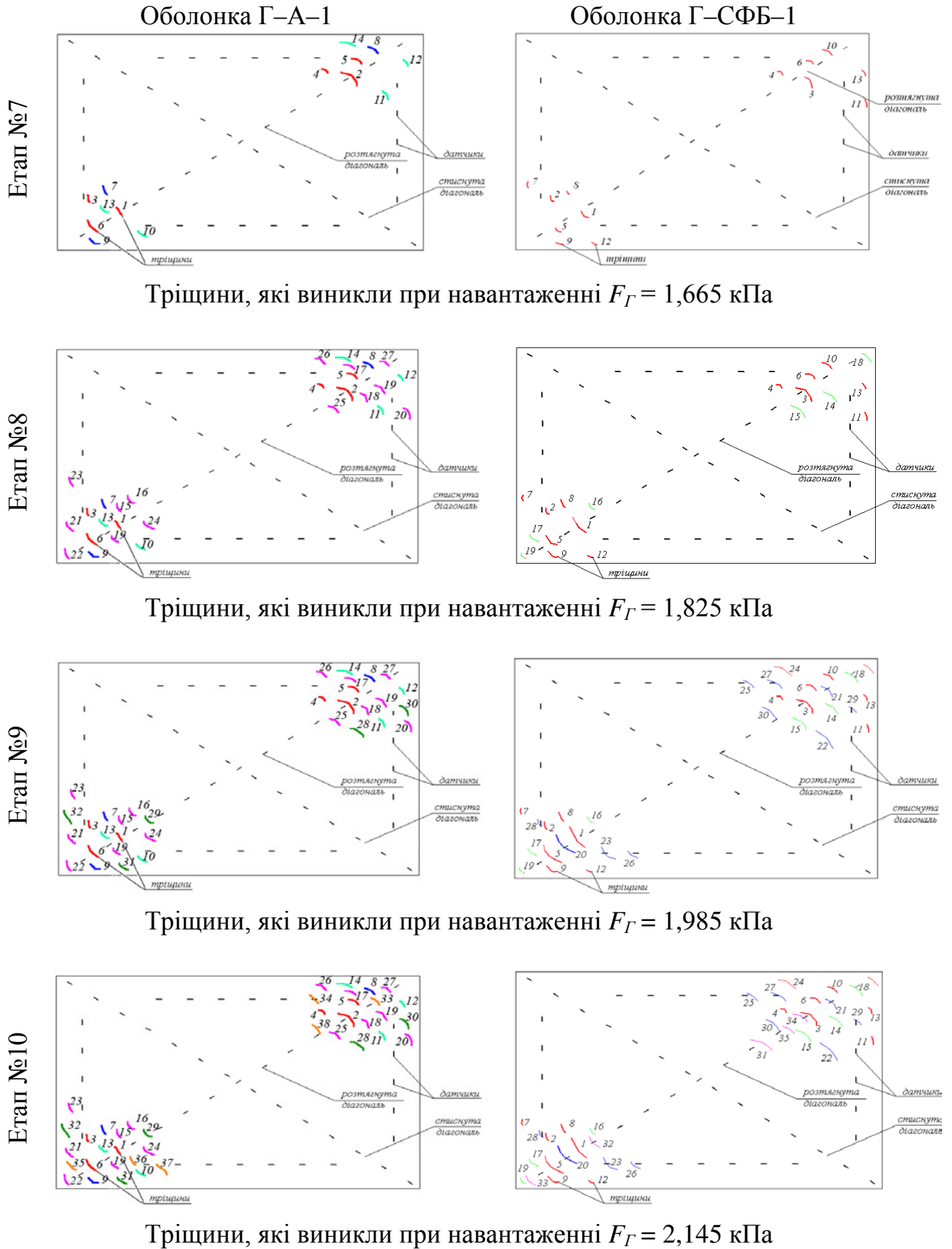


Рисунок 7 – Процес тріщиноутворення в оболонках Г–А–1 та Г–СФБ–1

Отримані дані деформацій АЦ і СФБ в оболонках за допомогою тензометричного комплексу ВНП-8 представлено на рис. 8, а та рис. 8, б відповідно.

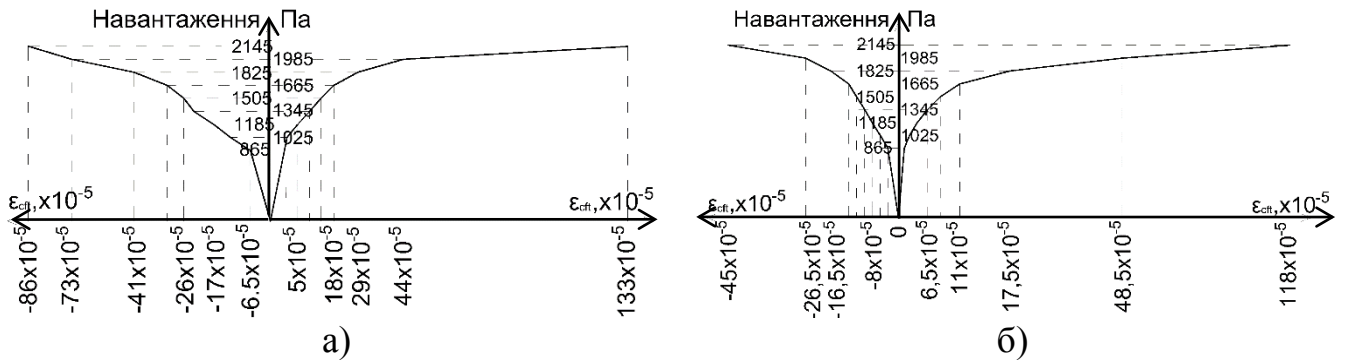


Рисунок 8 – Деформації в оболонках Г-А-1 (а) та Г-СФБ-1 (б)

Напруження вздовж діагоналей з тензодатчиками №1...№13 та №14...№27 (згідно рис. 4) під час дев'яти етапів прикладання навантаження встановлювалися з використанням визначених деформацій сталевібробетону за допомогою тензорезисторів та експериментально отриманої діаграми напруження-деформації (σ - ϵ) для сталевібробетонних призм. Опрацьовані напруження вздовж діагоналі з тензодатчиками №1 ... №13 представлені на рис. 9, а вздовж діагоналі з тензодатчиками №14 ... №27 представлені на рис. 10.

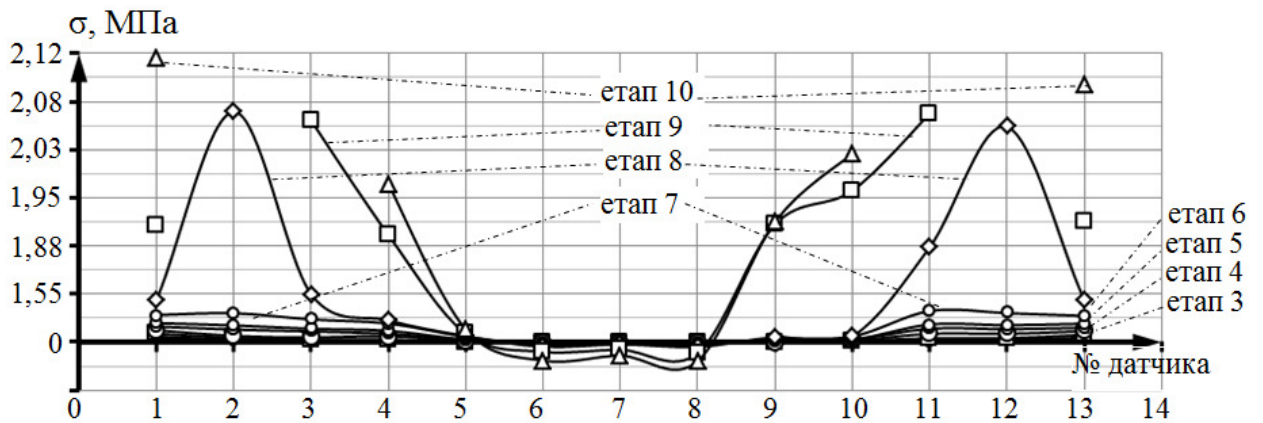


Рисунок 9 – Експериментально встановленні напруження в гіпарі Г-СФБ-1 вздовж діагоналі з тензодатчиками №1 ... №13

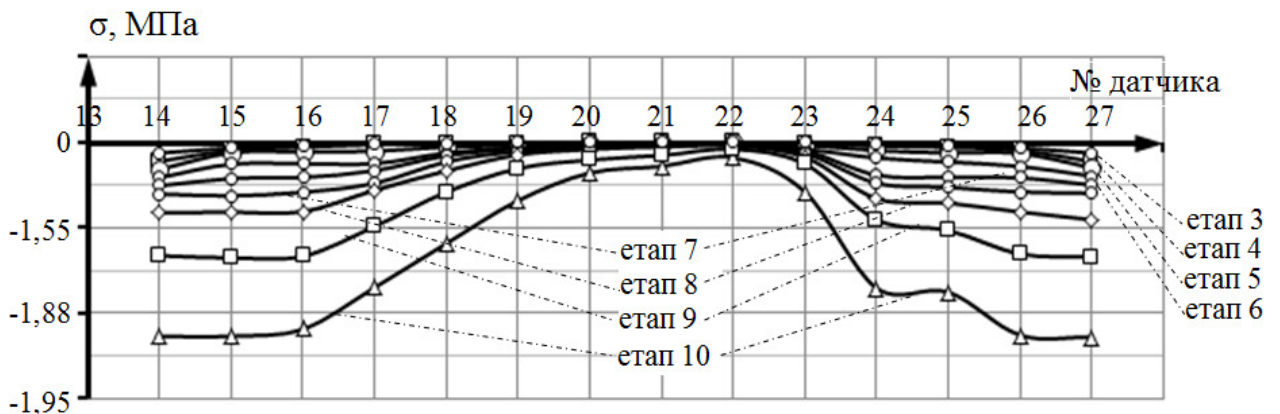


Рисунок 10 – Експериментально встановленні напруження в гіпарі Г-СФБ-1 вздовж діагоналі з тензодатчиками №14...№27

Після аналізування матеріалів дослідження, що викладені в даному розділі можна зробити висновок, що тонкостінні оболонки покриття зі сталевібробетону у формі гіперболічного параболоїда за показниками прогинів і тріщиностійкості при одноразових і повторних навантаженнях мають суттєві переваги порівняно із аналогічними елементами з армоцементу.

В четвертому розділі розглянуто питання розрахунку міцності та жорсткості покрівель, що мають форму гіперболічного параболоїда.

В роботі за допомогою ПК ЛИРА–САПР 2016 було проведено моделювання дослідження тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда, що виконані зі сталевібробетонної суміші та визначено числові значення згинальних моментів, прогинів та переміщення, що виникають при дії на них наперед відомих навантажень.

При моделюванні матеріалу конструкції застосовувався кінцевий елемент №234 (физически нелинейный универсальный пространственный 6-узловой изопараметрический КЭ), що враховує фізичну нелінійність матеріалу. Законом нелінійного деформування було вибрано «14 – кусочно-линейный закон деформирования». Числові значення для діаграми стану «Деформация-Напряжение» (σ – ε) були задані на основі експериментально отриманих даних під час проведення досліджень сталевібробетонних призм.

Одержані в результаті розрахунку в ПК ЛИРА–САПР 2016 напруження та переміщення в оболонці зі СФБ представлено на рис. 11.

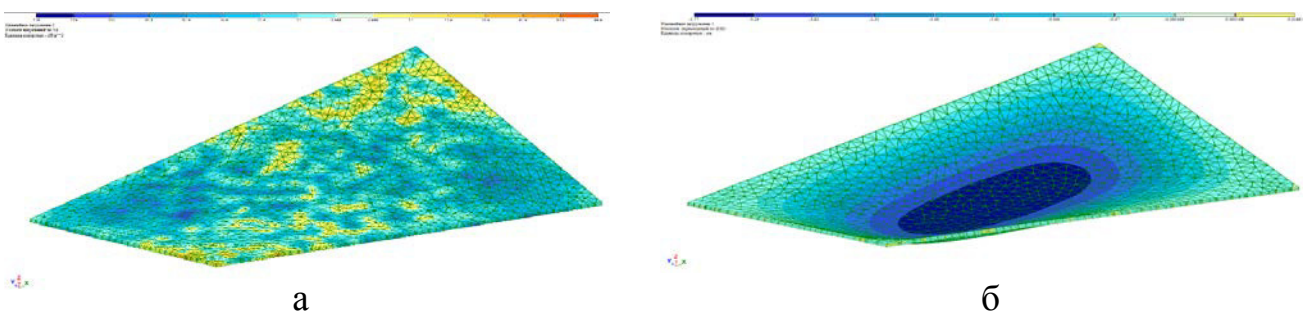


Рисунок 11 – Ізополя напружень та переміщень в оболонці у формі гіпара з СФБ:
а – ізополя напружень по осі Y, б – ізополя переміщень по осі Z

Для теоретичного визначення прогинів і напружень в покрівлях у формі гіпара використано рівняння пологих оболонок з відмінними від нуля кривинами кручення, для розв'язування яких удосконалено метод подвійних рядів Фур'є.

Враховуючи, що оболонка є прямокутною в плані і її серединна поверхня займає область $0 < x < a$, $0 < y < b$, то рівняння пологих оболонок із ненульовою кривиною кручення записано у комплексному вигляді:

$$\left(\Delta^2 + i \frac{\mu}{h} \partial_k \right) F - \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} F = q, \quad (1)$$

де $\mu = \sqrt{12(1-\nu^2)}$, h – товщина, q – поперечне навантаження, Δ – оператор Лапласа, $\partial_k = k_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, $\varepsilon = i2k_{12} \frac{\mu}{h}$, k_1, k_2 – кривини в напрямку осей Ox, Oy , k_{12} – кривина кручення, ν – коефіцієнт Пуассона, $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Нормальні прогини w та функція напружень ϕ визначаються через введену комплексну функцію F за формулами: $w = \frac{1}{D} \text{Re}(F)$, $\phi = \frac{\mu}{h} \text{Im}(F)$, де $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$.

В роботі розглянуто два типи закріплень контурів оболонок, які найчастіше зустрічаються на практиці – шарнірно-рухоме (вільне) та шарнірно-нерухоме.

а) шарнірно-рухоме обпирання (рис. 12, а). За такого обпирання приймається, що контур оболонки додатково підкріплений жорсткими тонкостінними елементами.

б) шарнірно-нерухоме обпирання оболонки на жорсткий контур (рис. 12, б). За такого обпирання контур в оболонки не зміщується в нормальних напрямках до країв оболонки.

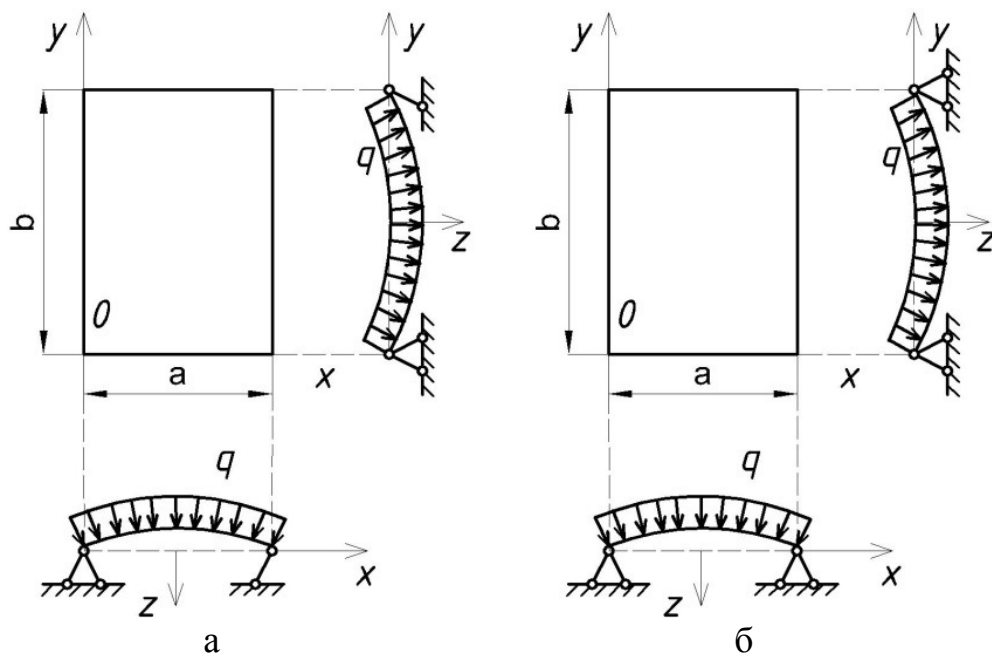


Рисунок 12 – Схема закріплення оболонки:

а – вільне закріплення, б – шарнірно-нерухоме закріплення

Розглянуто важливі для практики випадки, коли контури оболонки є прямими. Рівняння середньої поверхні такого гіпара записано у вигляді:

$$z = \frac{z_0}{ab} ux. \quad (2)$$

Три вершини гіпара знаходяться в площині $z=0$, а четверта має координату (a, b, z_0) . Кривини в цієї оболонки будуть: $k_1 = 0$, $k_2 = 0$, $k_{12} = \frac{z_0}{ab}$.

До рівняння (1) для вільно опертої оболонки при відмінній від нуля кривині кручення k_{12} не можна застосовувати відомий в літературі метод рядів Фур'є.

Тому розв'язок цього рівняння попередньо зображено у вигляді розкладу в ряд Тейлора за параметром ε :

$$F = F^{(0)} + \varepsilon F^{(1)} + \varepsilon^2 F^{(2)} + \dots + \varepsilon^k F^{(k)}.$$

Підставляючи його в рівняння (1), отримуємо рекурентні рівняння:

$$\begin{aligned} \left(\Delta^2 + i \frac{\mu}{h} \partial_k \right) F^{(0)} = q, \quad \left(\Delta^2 + i \frac{\mu}{h} \partial_k \right) F^{(j)} = q^{(j)}, \\ q^{(j)} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} F^{(j-1)}, \quad j = 1, 2, \dots, k+1, \end{aligned} \quad (3)$$

де $q^{(0)} = q$, $q^{(j)} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} F^{(j-1)}$, $j = 1, \dots, k+1$.

Введені функції зображено у вигляді подвійних рядів:

$$F^{(k)} = \sum_{n,m=1}^{\infty} F_{nm}^{(k)} \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y), \quad k = 0, 1, \dots, \infty,$$

де $\alpha_n = \frac{\pi n}{a}$, $\beta_m = \frac{\pi m}{b}$.

При такому зображенні граничні умови вільного обпирання виконуються автоматично. Після перетворень отримано рекурентні формули, які дозволяють послідовно обчислювати коефіцієнти при $k = 1, 2, \dots, \infty$:

$$F_{ij}^{(k)} = \frac{16}{ab} ij \sum_{n,m} \frac{nm}{(i^2 - n^2)(j^2 - m^2)} \varepsilon_{i+n} \varepsilon_{j+m} F_{nm}^{(k-1)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, \infty; \quad (4)$$

де $\varepsilon_n = 1$ при n – непарному і $\varepsilon_n = 0$ при n – парному.

Коефіцієнти $F_{ij}^{(k)}$ у формулі (4) при $k=0$, з яких починаються обчислення, при рівномірно розподіленому навантаженні, коли $q=Q=const$, визначаються за формулою (5):

$$F_{nm}^{(0)} = \frac{16Q\varepsilon_n\varepsilon_m}{\pi^2 nm A_{nm}}, \quad \text{де } A_{nm} = (\alpha_n^2 + \beta_m^2)^2 - i \frac{\mu}{h} (k_2 \alpha_n^2 + k_1 \beta_m^2). \quad (5)$$

Після знаходження коефіцієнтів моменти і зусилля знаходяться за формулами:

$$\begin{aligned} M_x = \operatorname{Re} \sum_{n,m} (\alpha_n^2 + \nu \beta_m^2) F_{nm} \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y), \quad M_y = \operatorname{Re} \sum_{n,m} (\nu \alpha_n^2 + \beta_m^2) F_{nm} \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y) \\ N_x = -\frac{\mu}{h} \operatorname{Im} \sum_{n,m} \beta_m^2 F_{nm} \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y), \quad N_y = -\frac{\mu}{h} \operatorname{Im} \sum_{n,m} \alpha_n^2 F_{nm} \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y), \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$F_{nm} = F_{nm}^{(0)} + \varepsilon F_{nm}^{(1)} + \varepsilon^2 F_{nm}^{(2)} + \dots + \varepsilon^k F_{nm}^{(k)}. \quad (7)$$

За допомогою розробленої на основі отриманих формул (4)–(7) комп'ютерної програми «Розрахунок оболонки двоякої кривини» (на базі програмного комплексу «Matlab») проведено теоретичні розрахунки напружень і прогинів в оболонці зі сталевібробетону у формі гіперболічного параболоїда.

Розрахунки прогинів і напружень проведено для сталевібробетону, для якого приймали $E = 2 \times 10^4$ МПа, $\nu = 0.17$, $a = 2.25$ м, $b = 3.5$ м. За врахування власної ваги й снігового навантаження отримано $Q = (1250 + 22000h)$. Розраховані при вільному закріпленні контуру оболонки (згідно рис. 12, а) напруження $\sigma_x^\pm, \sigma_y^\pm$ (величини зі знаком (+) відносяться до верхньої поверхні оболонки, а зі знаком (-) – до нижньої) в перерізах оболонки $x = a/2$, $x = 0.7a$ залежно від координати y при $h = 0.03$ м наведено на рис. 13, а і рис. 13, б.

Наведені на цих рисунках напруження виявились достатньо великими і більшими за допустимі (експерименти показали, що тріщини не виникають в сталевібробетоні, якщо напруження не перевищують 2 МПа). Тому, з метою зменшення напружень доцільно збільшити товщину оболонки. Розраховані напруження при $a = 2.25$ м, $b = 3.5$ м та збільшеній товщині $h = 0.05$ м наведені на рис. 13, в і рис. 13, г. Видно, що напруження зменшились приблизно вдвічі і не перевищують допустимі.

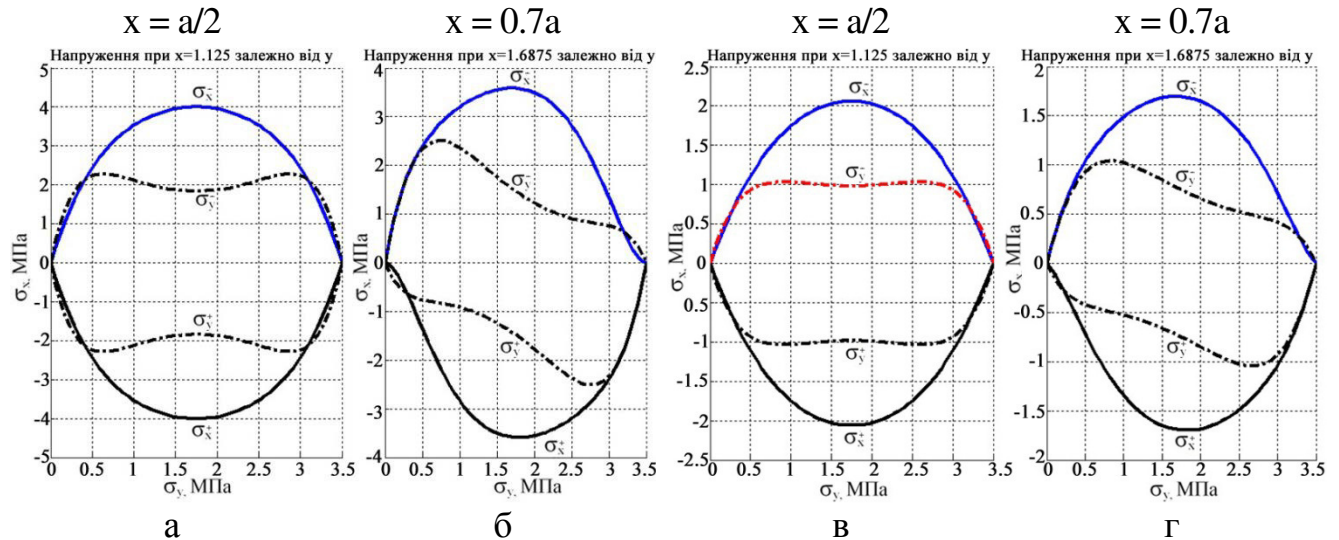


Рисунок 13 – Напруження в оболонці при $h = 0.03$ м (а, б) і $h = 0.05$ м (в, г) при шарнірно-рухомому закріпленні

При шарнірно-нерухомому обпиранні гіпара на жорсткий контур (згідно рис. 12, б) ключові функції після перетворень записано у вигляді:

$$w = \frac{4}{ab} \sum_{n,m=1}^{\infty} w_{nm}^s \sin(\alpha_n x) \sin(\beta_m y), \quad \varphi = \frac{4}{ab} \sum_{n,m=1}^{\infty} \varphi_{nm}^c \cos(\alpha_n x) \cos(\beta_m y),$$

де $w_{nm}^s = \frac{q_{nm}^s}{Dc_{nm}}$, $\varphi_{nm}^c = 2k_{12} \frac{Eh}{D} \alpha_n \beta_m \frac{w_{nm}^s}{\gamma_{nm}^2}$, $q_{nm}^s = \frac{16}{\pi^2 nm} Q$, при n, m – непарних,

$$\gamma_{nm} = \alpha_n^2 + \beta_m^2, \quad c_{nm} = \gamma_{nm}^2 + 4k_{12}^2 \frac{Eh}{D} \frac{\alpha_n^2 \beta_m^2}{\gamma_{nm}^2}.$$

Розраховані напруження при шарнірно-нерухомому закріпленні в різних перерізах вздовж оболонки $x=0.5a$; $0.6a$; $0.7a$; $0.8a$ залежно від координати y наведено на рис. 14 (а, б, в, г).

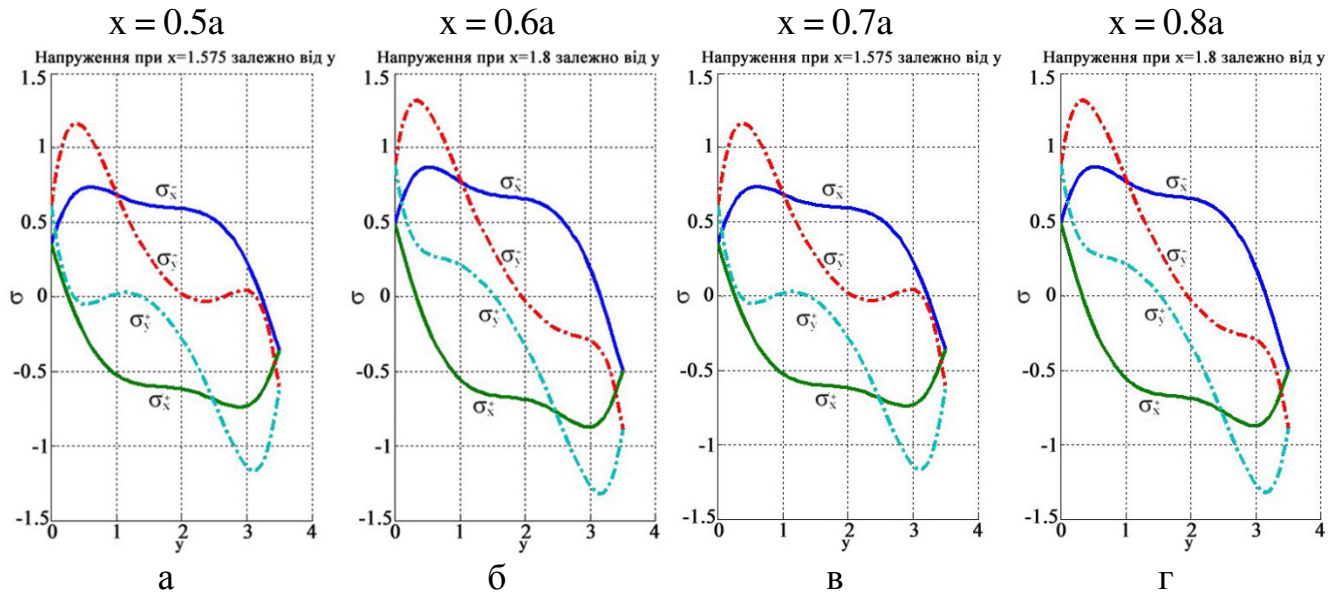


Рисунок 14 – Напруження в оболонці в перерізах $x=0.5a$ (а); $x=0.6a$ (б); $x=0.7a$ (в); $x=0.8a$ (г) при шарнірно-нерухомому закріпленні

На основі проведених розрахунків можна зробити висновки: напруження при жорсткому закріпленні контуру оболонки значно менші за величиною, ніж при вільному шарнірному закріпленні; максимальні напруження виникають біля контуру оболонки; для розглянутої оболонки максимальні напруження значно менші за величиною, ніж допустимі напруження для сталевібробетону. Тобто, влаштування жорсткого шарнірно-нерухомого закріплення, при якому забезпечується відсутність зміщення в напрямку нормальному до контуру оболонок, дозволяють підвищити надійність гіпарних покрівель.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено наукове завдання з встановлення особливостей роботи та несучої здатності тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону при короткочасних одноразових і повторних навантаженнях. В підсумку проведених експериментальних та теоретичних досліджень сформульовано наступне:

1. Встановлено, що сталевібробетон, як ефективний матеріал, доцільно використовувати під час зведення тонкостінних оболонок покриття від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда.

2. Розроблено та запатентовано модель конструкції тонкостінної оболонки зі сталевібробетону у формі гіперболічного параболоїда з кращими показниками несучої здатності та тріщиностійкості, ніж аналогічні конструкції покриття зі звичайного залізобетону або армоцементу.

3. Отримано нові експериментальні дані щодо несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості тонкостінної оболонки від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону під час дії одноразових та повторних навантажень та встановлено особливості її напружено-деформованого стану.

4. Зафіксовано, що тонкостінні оболонки від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда, які виготовлені зі сталевібробетону з відсотком армування 1,5%, за показниками несучої здатності перевищують відповідні показники типових залізобетонних тонкостінних оболонок.

5. Визначено, що жорсткість оболонки у формі гіпара зі сталевібробетону в порівнянні з жорсткістю армоцементної оболонки під час дії одноразових навантажень вища в 1,9...2,1 рази.

6. Встановлено, що тонкостінні оболонки покриття з сталевібробетону у формі гіперболічного параболоїда за показниками тріщиностійкості при одноразових і повторних навантаженнях мають суттєві переваги порівняно із аналогічними конструкціями з армоцементу. Під час прикладання до оболонки зі СФБ повторних навантажень експлуатаційного рівня появи процесу тріщиноутворення не було зафіксовано, а в тонкостінному покритті з армоцементу під аналогічними повторними навантаженнями вздовж увігнутої твірної спостерігалася поява тріщин та їх розкриття. Зафіксовано, що тріщини в СФБ оболонках були з нечіткими контурами та вираженою плетінчастістю.

7. Зафіксовано, що при однаковому рівні повторних навантажень встановлені деформації в сталевібробетоні були в 3,1...3,5 разів менші, ніж в армоцементі.

8. Подано алгоритм розрахунку тонкостінної оболонки методом скінченних елементів за допомогою ПК ЛИРА-САПР 2016 з врахуванням фізичної нелінійності матеріалу зі збіжністю отриманих результатів із експериментальними даними 80 %.

9. Отримано співвідношення для визначення напруження та прогинів у тонкостінних оболонках покриттів з ненульовою кривиною кручення в аналітичному вигляді. Для розв'язування основних рівнянь узагальнено застосування методу подвійних рядів Фур'є, в якому враховано кривину кручення гіперболоїда. Побудовано на основі отриманих співвідношень графіки, що дають можливість оцінювати напруження та прогини для широкого класу пологих оболонок подвійної кривини у формі гіпарів.

10. Теоретично встановлено, що: при шарнірно-рухомому закріпленні максимальні напруження виникають у центральній частині сталевібробетонної оболонки, тоді як при шарнірно-нерухомому її закріпленні – біля контуру; при шарнірно-нерухомому закріпленні контуру оболонки відбувається зменшення значення виникаючих напружень більш ніж в два рази в порівнянні з вільним обпиранням.

11. Розроблено програму розрахунку напружень і прогинів в тонкостінних оболонках, що мають форму гіперболічного параболоїда (базується на рівняннях моментної теорії пологих оболонок), що при розрахунку навантажень експлуатаційних рівнів дає збіжність результатів із експериментально встановленими даними в межах 85...95 %.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Сунак О. П. До визначення внутрішніх зусиль у пологій оболонці від'ємної Гаусової кривини при дії вертикального навантаження / О. П. Сунак, С. О. Ужегов, О. А. Пахолук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Вип. 24. – Рівне, 2012. – С. 413-418. *(Особистий внесок автора: отримано результати аналітичного визначення внутрішніх зусиль від вертикального навантаження в оболонці у формі гіпара).*
2. Пасічник Р. В. Застосування методу скінченних різниць до розрахунку однопорожнинного гіперболоїда / Р. В. Пасічник, С. О. Ужегов, Т. В. Горбатюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне, 2015. – Випуск 30. – С. 384–389. *(Особистий внесок автора: отримано результати розрахунку оболонок від'ємної гаусової кривини методом скінченних різниць).*
3. Бернакевич І. Є. Розрахунок напружено-деформованого стану будівельних споруд на основі уточнених теорій оболонок / І. Є. Бернакевич, П. П. Вагін, С. О. Ужегов // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2014. – Вип. 54. – С. 42–49. *(Особистий внесок автора: отримано результати розрахунку напружень в оболонках).*
4. Пасічник Р. В. Алгоритм розв'язку задач міцності та стійкості оболонок обертання методом сіток / Р. В. Пасічник, С. О. Ужегов, О. С. Пасічник // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : збірник наукових праць. – Випуск 3. – Луцьк : Луцький НТУ, 2015. – С. 120–126. *(Особистий внесок автора: застосовано алгоритм розв'язку задач міцності та стійкості оболонок обертання скінченно-різницеvim методом).*
5. Пасічник Р. В. Комп'ютерна програма «розрахунок оболонок». Область застосування та можливості / Р. В. Пасічник, С. О. Ужегов, О. С. Пасічник // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : збірник наукових праць. – Випуск 4. – Луцьк : Луцький НТУ, 2015. – С. 54–61. *(Особистий внесок автора: розроблено комп'ютерну програму «Розрахунок оболонок» для обчислення деформацій та дослідження стійкості оболонок обертання).*
6. Ужегов С. О. Дослідження впливу окремих факторів на міцність сталевібробетону методом математичного планування експерименту / С. О. Ужегов // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : збірник наукових праць. – Випуск 5. – Луцьк : Луцький НТУ, 2016. – С. 174–183. *(Особистий внесок автора: досліджено міцність сталевібробетону на розтяг шляхом використання математичного моделювання на основі трирівневого плану другого порядку Бокса-Бенкена).*
7. Андрійчук О. В. Дослідження тонкостінного сталевібробетонного покриття у формі гіперболічного параболоїда за допомогою програмного комплексу «ЛИРА-САПР» / О. В. Андрійчук, А. Б. Григорчук, С. О. Ужегов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне : НУВГП, 2017. – Вип. 34. – С. 176–183. *(Особистий внесок*

автора: отримано результати напружень і деформацій в тонкостінній оболонці покриття у формі гіпара зі сталевібробетону за допомогою ПК «ЛИРА-САПР».

8. Ужегов С. О. Порівняння різновидів добавок для бетону та їх застосування у тонкостінних конструкціях покриття / С. О. Ужегов // Товарознавчий вісник. Збірник наукових праць. – Випуск 11. – Луцьк : Луцький НТУ, 2018. – С. 152–159. *(Особистий внесок автора: встановлено вплив сталевіброфібри на тріщиностійкість, деформативність та несучу здатність тонкостінних оболонок у формі гіпара).*

Стаття у науковому періодичному виданні, що включено до міжнародної наукометричної бази Scopus:

9. Uzhehov S. The influence of repeated loading on work of the steel fiber concrete drainage trays and pipes on the roads / O. Andriichuk, V. Babich, I. Yasyuk, S. Uzhehov // MATEC Web of Conferences. N 116. P. 02001, 1–9, DOI: 10.1051/mateconf/20171160200 *(Особистий внесок автора: ефективність додавання сталевіброфібри до бетонних конструкцій, що сприймають повторні навантаження).*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

10. Сунак О. П. Внутрішні зусилля у пологій оболонці від'ємної гаусової кривини при дії вертикального навантаження / О. П. Сунак, С. О. Ужегов, О. А. Пахолюк // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : збірник наукових праць – Випуск 1. Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2014. – С. 139–145. *(Особистий внесок автора: наведено вирази для аналітичного визначення внутрішніх зусиль від вертикального навантаження в оболонці у формі гіперболічного параболоїда).*

11. Uzhegov S. Badanie pokryć żelbetowych / S. Uzhegov // PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń. Tom 2. Monografie. – Lublin: Politechnika Lubelska, 2015. – 75–84 p. *(Особистий внесок автора: розраховано армоцементне покриття у формі гіпара, а також моделювання його конструкції для проведення експериментального дослідження).*

Патенти:

12. Пасічник Р.В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №59810 «Комп'ютерна програма «Розрахунок оболонок»» // Р.В. Пасічник, С.О. Ужегов, О.В. Андрійчук, О.А. Ужегова, В.В. Божидарнік. Дата реєстрації 22.05.2015.

13. Бабич Є.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №5083-18 «Розрахунок оболонок двоякої кривини» // Є.М. Бабич, О.В. Андрійчук, С.О. Ужегов. Дата реєстрації 18.07.2018.

АНОТАЦІЯ

Ужегов С.О. Несуча здатність, тріщиностійкість та деформативність тонкостінних оболонок типу «гіперболічний параболоїд» з використанням сталевібробетону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2019.

Дисертація присвячена дослідженню напружено-деформованого стану (НДС) тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда, виконаних із сталевібробетону.

Розроблено методику та програму експериментальних досліджень напружено-деформованого стану та тріщиностійкості тонкостінних оболонок покриття зі сталевібробетону під час дії одноразових та повторних (малоциклових) навантажень. У результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено, що конструкції тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону при одноразових і повторних навантаженнях мають вищу несучу здатність, жорсткість і тріщиностійкість в порівнянні з оболонками з армоцементу. Проведено моделювання роботи тонкостінних оболонок методом скінчених елементів, удосконалено методику розрахунку несучої здатності тонкостінних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону.

Ключові слова: залізобетон, армоцемент, сталевібробетон, фібра, оболонка, гіперболічний параболоїд, гіпар, навантаження, напружено-деформований стан, тріщиностійкість.

АННОТАЦИЯ

Ужегов С.О. Несущая способность, трещиностойкость и деформативность тонкостенных оболочек типа «гиперболический параболоид» с использованием сталефибробетона. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно, 2019.

Диссертация посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенных оболочек покрытия в форме гиперболического параболоида, выполненных из сталефибробетона.

Разработана методика и программа экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости тонкостенных оболочек покрытия из сталефибробетона во время действия однократных и повторных (малоцикловых) нагрузок. В результате проведенных

экспериментальных исследований было установлено, что конструкции тонкостенных оболочек покрытия в форме гиперболического параболоида из сталефибробетона при однократных и повторных нагрузках имеют высшую несущую способность, жесткость и трещиностойкость по сравнению с оболочками из армоцемента. Проведено моделирование работы тонкостенных оболочек методом конечных элементов, усовершенствована методика расчета несущей способности тонкостенных оболочек покрытия в форме гиперболического параболоида с сталефибробетона.

Ключевые слова: железобетон, армоцемент, сталефибробетон, фибра, оболочка, гиперболический параболоид, гипар, нагрузки, напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость.

ABSTRACT

Uzhehov S.O. Bearing capacity, crack resistance and deformability of thin-walled shells of the type "hyperbolic paraboloid" using steel fiber concrete. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.23.01 – Building structures, buildings and facilities. – National University of Water Management and Environmental Management, Rivne, 2019.

The thesis is devoted to the study of the work on the stress-strain state (SSS) of thin-walled coating shells of the "hyperbolic paraboloid" type made of steel fiber reinforced concrete.

In this thesis analyzes the field of application and scientific achievements in the design and operation of flat thin-walled shells, in particular, shells of negative Gaussian curvature of the "hyperbolic paraboloid" type under the action of both single-use and repeated low-cycle loads. The review and analysis of works devoted to the General theory of shells is carried out.

Comparison of materials for thin shells covering, among which the ferrocement and steel fiber reinforced concrete (SFRC). The analysis of researches of features of work SFRC constructions with different types of loads.

It is shown a scheme of bench tests of thin-walled shells of negative curvature of the "hyperbolic paraboloid" made of ferrocement and SFRC under the action of single and repeated low-cycle loads was developed. The program and scope of experimental studies are described in detail.

According to the goal set in the work, two complex series of experimental studies were carried out – all tested according to the research plan: two ferrocement shells, two SFRC concrete shells, 12 concrete and 12 SFRC prisms, 12 concrete and 12 SFRC concrete cubes.

The influence of the prismatic strength of concrete matrix, percentage of fiber reinforcement and fiber diameter on the strength of SFRC by the method of mathematical planning of experiment.

Also presents a theoretical calculation of stresses and deflections in the shell type "hyperbolic paraboloid" made of SFRC.

The work of the thin-walled shell by the finite element method using the LIRA–SAPR 2016 software that was simulated taking into account the physical nonlinearity of the material with the convergence of the results with the experimental data of 80 %.

Theoretically, it is established that: when hinged maximum stresses occur in the central part of the SFRC shell, whereas when it is fixed hard-near the contour; when the shell circuit is fixed, the value of the resulting stresses is reduced more than twice in comparison with the free support. This can be explained by the fact that a significant part of the load perceives (transmitted) fastening.

The ratio for determination of stress and deflections in thin-walled coatings in analytical form is obtained. To solve the basic equations, the method of double Fourier series is generalized, which takes into account the torsion curve of the hyperboloid.

A program for calculating stresses and deflections in thin-walled shells having the form of a hyperbolic paraboloid (based on the equations of the moment theory of flat shells) was developed, which in calculating the loads of operating levels gives the convergence of the results with the experimentally established data within 85...95%.

Keywords: reinforced concrete, reinforced concrete, steel fiber concrete, fiber, shell, hyperbolic paraboloid, hyper, loads, stress-strain state, crack resistance.

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
Свідоцтво Деркомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011
Підписано до друку __.__.2019 р.
Папір офсетний. Гарнітура Times. Друк RISO.
Ум. друк. арк. 10,0. обл.-вид. арк. 9,8.
Формат 60x84 1/16 Тираж 100. Зам. № 4