

DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.340-352

УДК 624.04

д.т.н., професор Сур'янінов М.Г.,

sng@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221,

к.т.н., доцент Неутов С.П.,

neutov.stepan@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0132-124X,

к.т.н., доцент Сорока М.М.,

soroka@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9551-9475,

Метлицький В.В.,

metlizkiy98@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1668-9936,

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

## НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ І ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОЧКИ ПРИ ЗМІНІ ЇЇ ТОВЩИНИ

*Викладено результати експериментальних досліджень довгих циліндричних оболонок з метою визначення їх напружено-деформованого стану, несучої здатності та тріщиностійкості при зміні товщини оболонки. Для реалізації поставленого завдання авторами розроблено спеціальний стенд. Виготовлено та досліджено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4). Товщина зразків становила 45, 50, 55, 60 мм, а розміри поперечного перерізу бортових елементів змінювалися відповідним чином. Розподілене навантаження (вертикальне) було прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм. Усередині кожного бортового елемента по два арматурні стрижні діаметром 10мм. З метою отримання повної та достовірної картини деформації поверхні оболонки у кожному з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по 4 індикатори годинного типу. Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензометричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Процес навантаження закінчувався тоді, коли випробувана оболонка втрачала здатність чинити опір зовнішньому навантаженню. Величина навантаження, що відповідає цьому моменту, бралася за несучу здатність оболонки. Одночасно із зразками-оболонками виготовлялися контрольні зразки призми та кубів для визначення фізико-механічних характеристик бетону. Побудовано графіки залежності відносної деформації від навантаження. Визначено несучу здатність оболонок та навантаження, при якому утворилася перша тріщина. До моменту втрати несучої здатності у всіх оболонках утворилися тріщини з однаковою початковою шириною розкриття 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин,*

як і несуча здатність, децю зростала за умови зростання товщини оболонки. А ось навантаження початку тріщиноутворення виявилось найбільшим для двох середніх значень товщини оболонки – 50 та 55 мм. Загальна картина тріщиноутворення всіх зразків майже однакова. Методика випробувань та розроблений стенд мають універсальний характер, і будуть використані для проведення подальших досліджень.

*Ключові слова:* залізобетон; експеримент; стенд для випробувань; циліндрична оболонка; несуча здатність; тріщиноутворення.

**Вступ.** Одним із актуальних шляхів розвитку техніки є все ширше застосування легких та економічних тонкостінних конструкцій. В даний час тонкостінні просторові системи типу циліндричних оболонок та їх з'єднань знаходять широке застосування в різних галузях сучасної техніки: на автомобільному та залізничному транспорті, у тунелебудуванні, у промисловому та цивільному будівництві та інших галузях. Завдяки криволінійній формі, оболонки працюють як просторові елементи і мають високі характеристики міцності, що дозволяє при раціональному проектуванні створювати з них легкі і міцні конструкції. Подібні системи часто використовуються при будівництві будівель та підземних споруд, трубопроводів, виготовленні залізничних та автомобільних цистерн, а також у суднобудуванні, авіабудуванні, хімічному та енергійному машинобудуванні, газовій, нафтовій та інших галузях промисловості.

**Аналіз попередніх досліджень.** Нині створено досить досконалу теорію тонких оболонок, у розвиток якої значний внесок зробили вчені різних країн світу: С.А. Амбарцумян, І.М. Векуа, О.М. Гузь [1], В.З. Власов [2], А.С. Вольмір [3], І.І. Ворович, І.Г. Галеркін, К.З. Галімов, А.Л. Гольденвейзер [4], Я.М. Григоренко [5], Н.А. Кільчевський, М.С. Корнішін, А.І. Лур'є, Х.М. Муштарі, В.В. Новожилов [6], І.Х. Саїтов, С.П. Тимошенко [7], К.Ф. Чорних, І.Я. Штаерман, П.М. Нахді (P.M. Naghdi), Е. Рейсснер (E. Reissner), А. Ляв (A.E.H. Love), А. Бессет (A.V. Basset), Х. Лемб (H.Lamb) та інші дослідники.

Питання міцності та тріщиностійкості залізобетонних циліндричних оболонок давно привертають увагу вчених [8]. Цей інтерес не слабшає і зараз. Мета роботи [9] – дослідити, як експериментально, так і чисельно, модернізовану міцність бетонних циліндричних оболонок, армованих одним шаром, при зосередженому навантаженні. У статті [10] представлено математичну модель деформування тонких ортотропних оболонок обертання, засновану на моделі Тимошенка – Рейснера. Модель враховує розрахунок арматури з урахуванням зсувної та крутильної жорсткості ребер, геометричної нелінійності, а також неправильної форми оболонки. Показано можливість

застосування методів та алгоритмів, що використовуються при дослідженні ізотропних оболонок. Представлена модель більш адекватно досліджує напружено-деформований стан та стійкість тонких армованих ортотропних оболонок обертання. У статті [11] представлений підхід до моделювання поступового руйнування циліндричних оболонок під дією комбінованого осевого стискаючого зусилля та згинального моменту. У цьому методі поведінка поступового руйнування циліндричних оболонок оцінюється шляхом урахування локальної реакції кожного волокнистого елемента. Цей підхід пропонує обчислювально ефективну та надійну схему для розрахунку межі міцності циліндричних оболонок. Крім того, це дозволяє моделювати розподіл навантаження між вигнутими та неушкодженими елементами оболонки на стороні стиснення, а також руйнування податливості на стороні розтягування, що, очевидно, ігнорується у існуючих нормах проектування. Дослідження [12] є параметричним дослідженням непідкріплених циліндричних оболонок, що піддаються осевому стиску. Особливу увагу приділено граничним характеристикам міцності та їх зв'язку з вихідною геометричною недосконалістю. У [13] представлено комплексне параметричне дослідження статичної поведінки довгих циліндричних бетонних оболонок, що піддаються навантаженню від власної ваги. Аналіз проводився з використанням програмного забезпечення ANSYS, і систематично вивчався вплив трьох факторів, а саме розмаху, центрального кута та товщини. Новий метод оцінки міцності циліндричних оболонок з тріщинами при різних навантаженнях за коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) представлений в [14].

**Мета.** Метою роботи було дослідження несучої здатності та тріщиноутворення залізобетонної циліндричної оболонки при зміні її товщини.

**Матеріали та методи дослідження.** Матеріал досліджуваної оболонки — залізобетон. Використовуються методи будівельної механіки, математичного аналізу та експериментальні методи.

#### **Результати та обговорення.**

Силова частина випробувального стенду (рис. 1, 2) була змонтована таким чином, що на оболонку передавалося навантаження, рівномірно розподілене за чотирма смугами, які перебували на рівній відстані одна від одної. В процесі випробувань визначалася несуча здатність оболонки, а всі етапи навантаження (яке здійснювалося поступово) фіксувалися індикаторами.

Було встановлено 2 однакових манометри, ціна поділки кожного з них становить 1 діл. = 267,857 кг = 2,68 кН.

База індикаторів на оболонці становила 24 мм.



Рис. 1. Випробувальний стенд оболонки

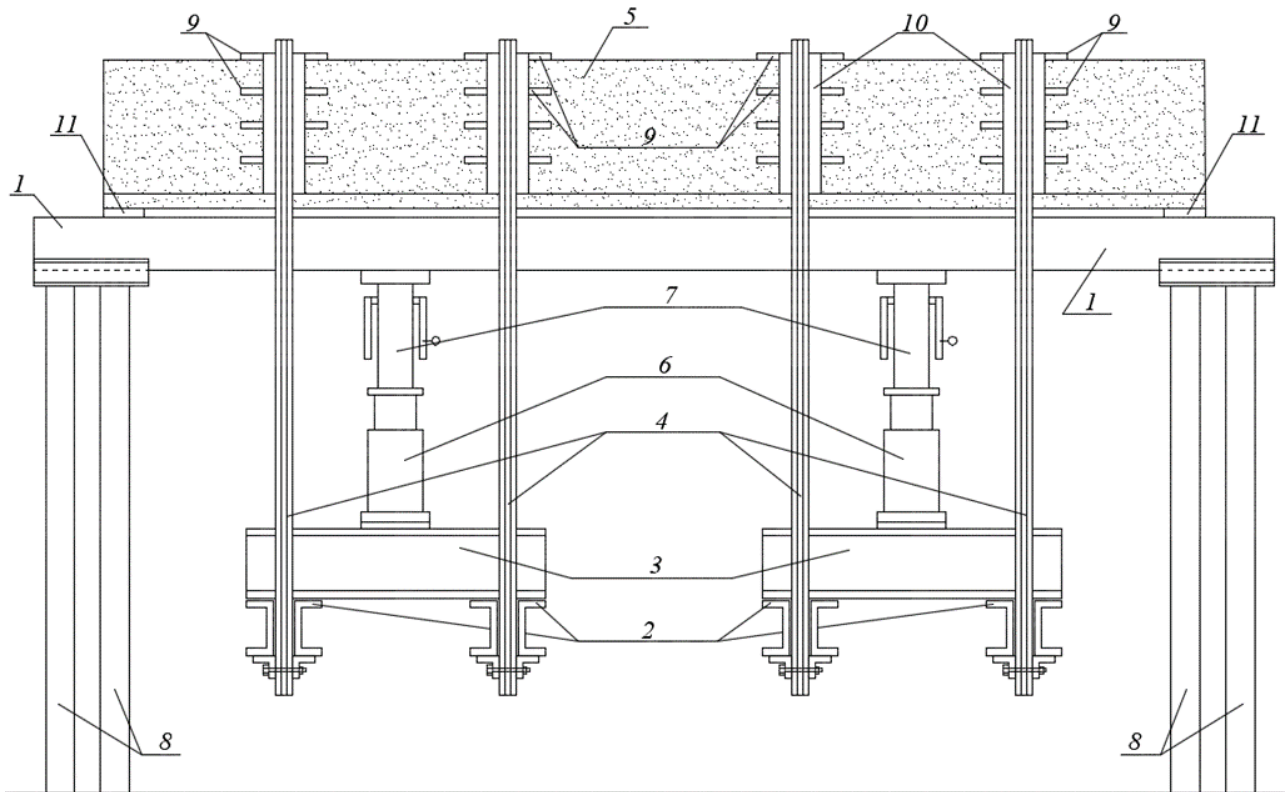


Рис. 2. Загальна схема стенду: 1 – рама навантаження; 2 – балка навантаження; 3 – передавальні балки; 4 – ланцюги навантаження; 5 – циліндрична оболонка; 6 – домкрати; 7 – зразкові динамометри 500 кН; 8 – опорні стійки; 9 – стрижні, що передають навантаження з ланцюга на оболонку; 10 – металевий лист; 11 – опорна металева пластина



Випробування оболонки на стенді виконується в наступному порядку: оболонку 5 встановлюють на раму навантаження 1, яка спирається на чотири опорні стійки 8. На верхню поверхню оболонки, що випробовується, укладають гнучкі металеві листи з жерсті 11, до яких через кожні 10 см за допомогою шурупів прикріплені передавальні бруси 9. Лист з жерсті в силу малої жорсткості приймає обрис зовнішньої поверхні оболонки 5 і дозволяє ланцюгам навантаження вільно ковзати по поверхні оболонки. На листи з жерсті укладають ланцюги навантаження 4, які охоплюють оболонку. Довжина кожного кола 4,8 метри, міцність на розрив 250 кН. У процесі прикладення навантаження балки навантаження 2 за допомогою гідравлічних домкратів 6 зміщуються щодо рами навантаження 1, на яку опирається оболонка. Переміщення балок навантаження призводить до того, що всі чотири ланцюги навантаження, що охоплюють оболонку, натягуються і передають рівномірно розподілене навантаження на поверхню. Процес навантаження починається після зняття нульових (початкових) показань на всіх без винятку вимірювальних приладах. Навантаження здійснюється ступенями, згідно з Національним стандартом України [15]. Кожна ступінь закінчується п'ятихвилинною витримкою з фіксацією всіх параметрів.

З метою отримання повної та достовірної картини деформації поверхні оболонки у кожному з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по 4 індикатори годинного типу з ціною поділу 0,01мм. Три індикатори (перший, п'ятий та дев'ятий) закріплені на бортовому елементі оболонки. Кожен четвертий з дванадцяти — на гребені оболонки. Два середні індикатори з кожної четвірки (2 і 3; 6 і 7; 10 і 11) розташовані на рівнях  $1/3$  і  $2/3$  стріли підйому оболонки відповідно (рис. 3).

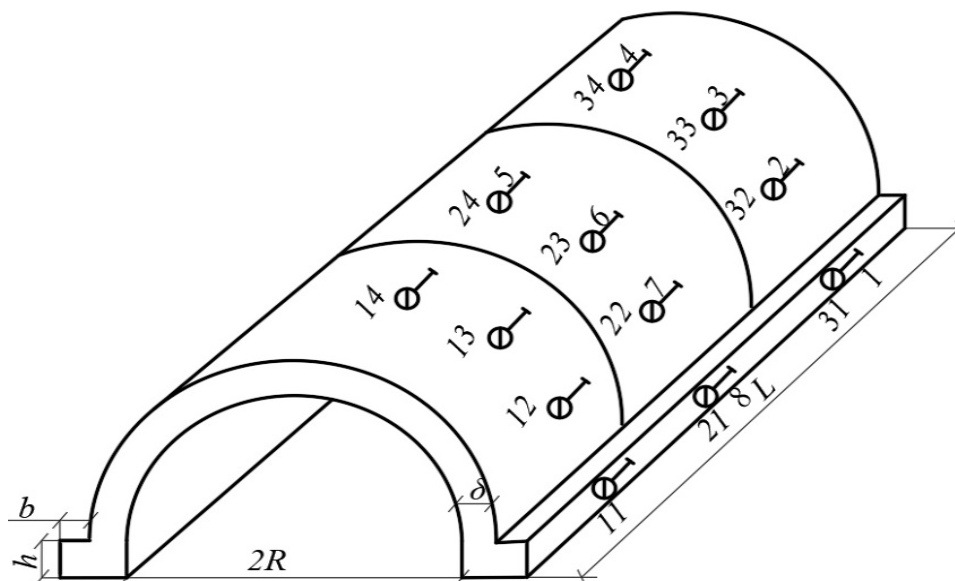


Рис. 3. Розташування вимірювальних приладів

Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензOMETричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Процес навантаження закінчувався тоді, коли випробувана оболонка втрачала здатність чинити опір зовнішньому навантаженню. Величина навантаження, що відповідає цьому моменту, бралася за несучу здатність оболонки.

Відповідно до програми випробувань циліндричних оболонок у рамках науково-дослідної роботи "Аналітичні, комп'ютерні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану фібробетонних конструкцій" (реєстраційний номер 0121U111755) на кафедрі будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури виготовлено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4).

Для визначення фізико-механічних характеристик бетону в кожній серії було випробувано по шість контрольних кубів розміром 100x100x100 мм та три призми розміром 100x100x400 мм. Випробування контрольних зразків виконано за ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [16]. За результатами цих випробувань встановлено, що бетон зразків-оболонок представлений класом C20/25 за міцністю на стиск.

Всі зразки-оболонки мали постійну довжину  $L = 2450 \text{ мм}$  та радіус поперечного перерізу  $R = 270 \text{ мм}$ , а варіювалися товщина оболонки  $\delta$  та розміри поперечного перерізу бортових елементів  $b$ ,  $h$ .

Товщина зразків (табл. 1) становила 45, 50, 55, 60 мм, а розміри поперечного перерізу бортових елементів змінювалися відповідним чином.

Розподілене навантаження (вертикальне) було прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто. бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм. Усередині кожного бортового елемента по два арматурні стрижні діаметром 10мм.

Для усіх зразків побудовано графіки залежності відносної деформації від навантаження. Деякі з них наведені на рис. 4-7.

Несуча здатність оболонок та навантаження, при якому утворилася перша тріщина, наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Несуча здатність та навантаження на початку тріщиноутворення

Модель	Товщина, мм	Несуча здатність, кН	Навантаження початку тріщиноутворення, кН	Відсоток від несучої здатності
RC1	45	96,4	42,9	44,5
RC2	50	101,6	64,5	63,5
RC3	55	109,6	64,5	58,9
RC4	60	117,9	53,6	45,5

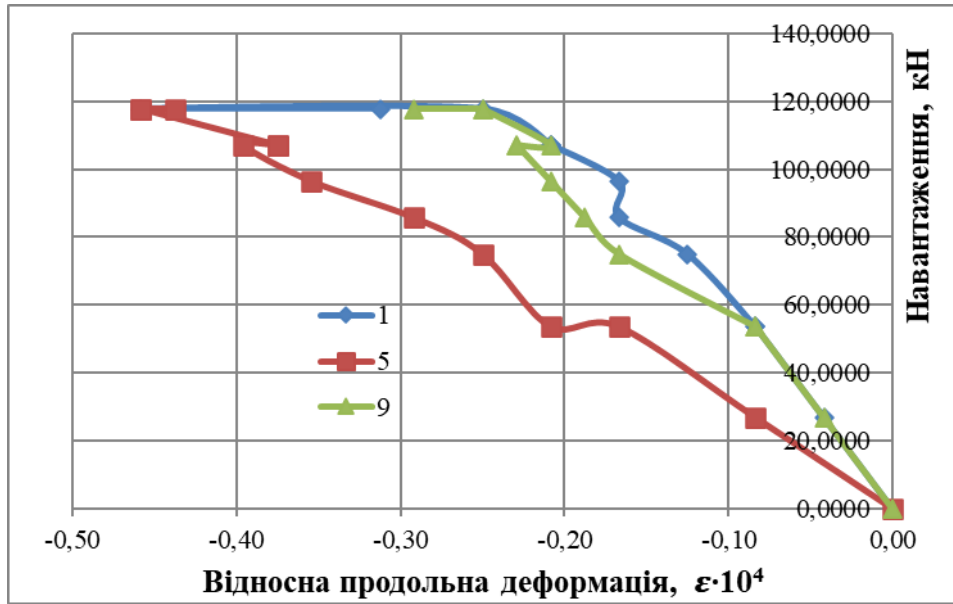


Рис. 4. Графік залежності відносної деформації від навантаження для частини оболонки 1-5-9

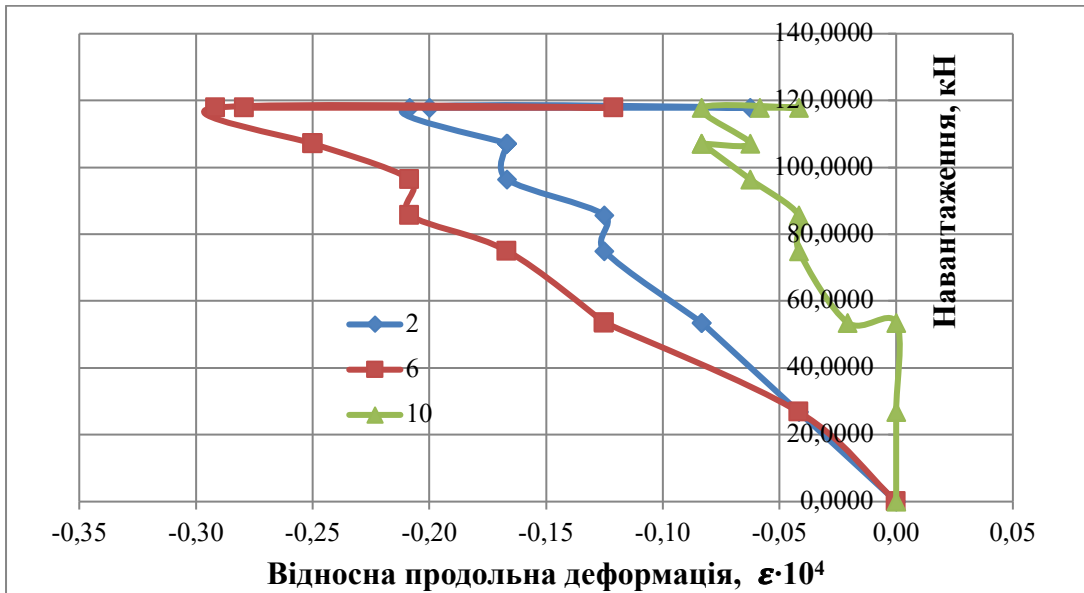


Рис. 5. Графік залежності відносної деформації від навантаження для частини 2-6-10

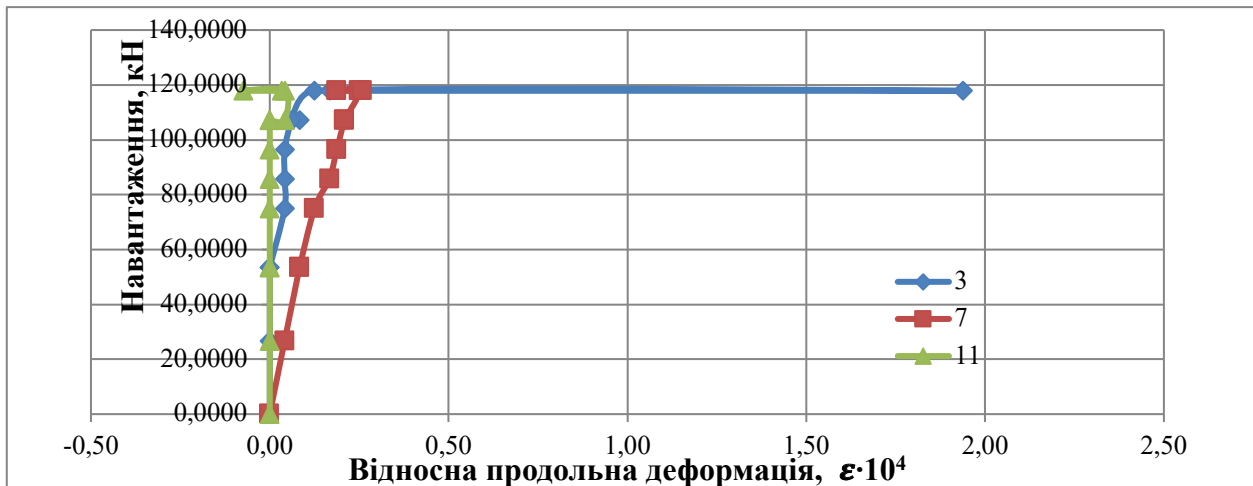


Рис. 6. Графік залежності відносної деформації від навантаження для частини 3-7-11

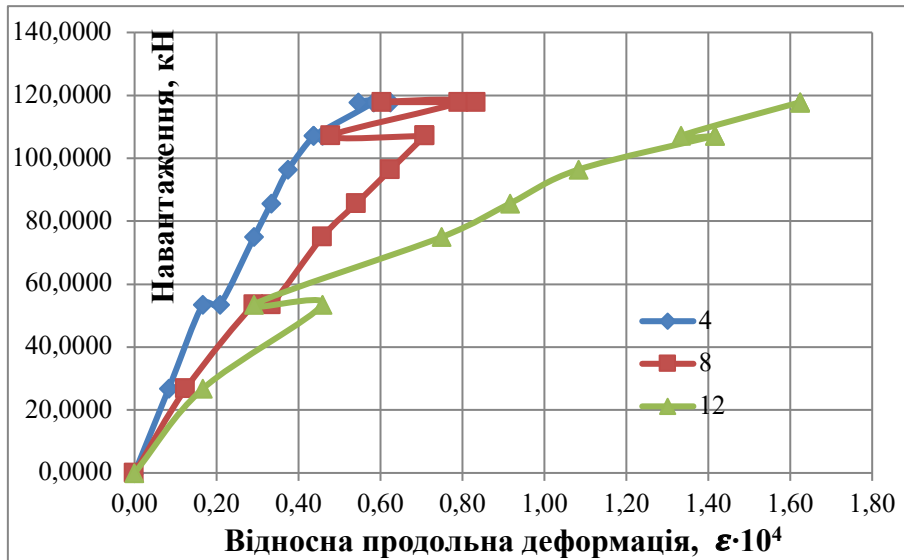


Рис. 7. Графік залежності відносної деформації від навантаження для частини 4-8-12

Величина та кількість ступеней навантаження зразків до втрати несучої здатності приведена в табл. 2.

Таблиця 2

Навантаження зразків по ступенях

Номер ступеню навантаження	Навантаження, кН			
	RC1	RC2	RC3	RC4
RC1, RC2, RC3, RC4				
1	21,4	24,2	24,2	21,4
2	32,2	40,3	40,3	32,2
3	<b>42,9</b>	48,4	56,4	42,9
4	53,6	56,4	<b>64,5</b>	<b>53,6</b>
5	64,3	<b>64,5</b>	72,5	64,3
6	75,0	72,5	80,6	74,9
7	85,8	80,6	88,7	85,8
8	96,4	88,7	96,7	96,4
9		96,7	104,8	107,1
10		101,6	109,6	117,8

На рис. 8 показано загальну картину тріщиноутворення у зразках.

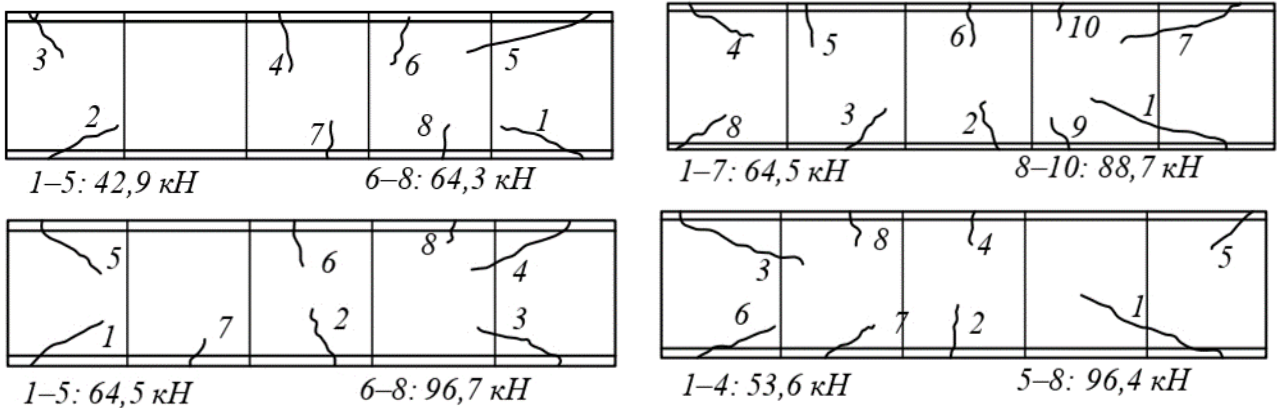


Рис. 8. Тріщиноутворення у зразках оболонки



Початкова ширина розкриття тріщин виявилася однаковою — 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин наведена у табл. 3.

Таблиця 3

## Кінцева ширина розкриття тріщин

Номер тріщини				Навантаження, кН				Кінцева ширина розкриття, мм			
RC1	RC2	RC3	RC4	RC1	RC2	RC3	RC4	RC1	RC2	RC3	RC4
1	1	1	1	42,9	64,5	64,5	53,6	0,5	0,5	0,4	0,5
2	2	2	2	42,9	64,5	64,5	53,6	0,4	0,7	0,7	0,8
3	3	3	3	42,9	64,5	64,5	53,6	0,3	0,1	0,4	0,6
4	4	4	4	42,9	64,5	64,5	53,6	0,8	0,4	0,6	0,6
5	5	5	5	42,9	64,5	64,5	96,4	0,5	0,05	0,4	0,3
6	6	6	6	64,3	64,5	96,7	96,4	0,1	0,6	0,7	0,4
7	7	7	7	64,3	64,5	96,7	96,4	0,7	0,7	0,05	0,1
8	8	8	8	64,3	88,7	96,7	96,4	0,05	0,3	0,1	0,1
	9				88,7				0,05		
	10				88,7				0,05		

## Висновки

Таким чином, розглянуто результати експериментальних досліджень довгих циліндричних оболонок з метою визначення їх напружено-деформованого стану, несучої здатності та тріщиноустійкості при зміні товщини оболонки. Виготовлено та досліджено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4). Товщина зразків становила 45, 50, 55, 60 мм, а розміри поперечного перерізу бортових елементів змінювалися відповідним чином. Розподілене навантаження (вертикальне) було прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм. У середині кожного бортового елемента по два арматурні стрижні діаметром 10мм. У кожному з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по 4 індикатори годинного типу. Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензометричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Побудовано графіки залежності відносної деформації від навантаження. Визначено несучу здатність оболонок та навантаження, при якому утворилася перша тріщина. До моменту втрати несучої здатності у всіх оболонках утворилися тріщини з однаковою початковою шириною розкриття 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин, як і несуча здатність, дещо зростала за умови зростання товщини оболонки. Навантаження початку тріщиноутворення виявилось найбільшим для двох середніх значень товщини оболонки – 50 та 55 мм. Загальна картина тріщиноутворення всіх зразків майже однакова.

### Список літератури

1. Гузь А.Н. (ред.) Методы расчета оболочек. Том 1. Теория тонких оболочек, ослабленных отверстиями. Монография / А.Н. Гузь, И.С. Чернышенко, Вал. Н. Чехов, Вик. Н. Чехов, К.И. Шнеренко. Киев: Наукова думка, 1980. 636 с.
2. Власов, В.З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике [Текст] / В.З. Власов. М.: Гостехиздат, 1949. 784 с.
3. Вольмир, А.С. Гибкие пластинки и оболочки [Текст] / А.С. Вольмир. М.: Гостехиздат, 1956. 420 с.
4. Гольденвейзер, А.А. Теория упругих тонких оболочек [Текст] / А.А. Гольденвейзер. М.: Наука, 1976. 512 с.
5. Григоренко, Я.М. Розв'язання задач теорій оболонок на ЕОМ [Текст] / Я.М. Григоренко, А.П. Мукоєд. Київ: Вища школа, 1979. 280 с. {in Ukrainian}
6. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек [Текст] / В.В. Новожилов. Л.: Судостроение, 1962. 431 с.
7. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. М.: Наука, 1966. 635 с.
8. Кан С.Н., Каплан Ю.И., Розраунок циліндричних оболонок покриттів будівель. Рік: 1973р. Видавництво: Вища школа 244 с.
9. Tanaka, Masafumi & Mashita, Kazuhiko. (2010). Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 75. 1681-1689. 10.3130/aijs.75.1681.
10. Karpov, Vladimir & Semenov, Alexey. (2013). Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution. *Magazine of Civil Engineering*. 40. 100-106. 10.5862/MCE.40.11.
11. Shen Li, Do Kyun Kim, Qing Quan Liang. Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment, *Engineering Structures*, Volume 272, 2022, 114988, ISSN 0141-0296, doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988.
12. Shen Li, Do Kyun Kim. Ultimate strength characteristics of unstiffened cylindrical shell in axial compression, *Ocean Engineering*, Volume 243, 2022, 110253, ISSN 0029-8018, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110253.
13. Ahmed A. Yaseen, Majed A. Khalaf, Fareed H. Majeed. Mathematical Modelling of Engineering Problems. Vol. 10, No. 3, June, 2023, pp. 815-820.
14. Rong Li, Meng Yang, Bin Liang. A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses. *Structures*, Volume 52, 2023, Pages 146-157, ISSN 2352-0124, https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130.

15. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 (2010). Бетон. Методи визначення міцності за контрольними зразками / К.: Мінрегіонбуд України.

16. ДСТУ Б В.2.6-7-95 (1997). Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи перевірення навантаженням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості. К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури IV.

17. Лазарєва Д.В., Сорока М.М., Шиляєв О.С. Прийоми роботи з ПК ANSYS при розв'язанні задач механіки. Під редакцією М.Г. Сур'янінова: монографія / Д.В. Лазарєва, М.М. Сорока, О.С. Шиляєв. Одеса: ОДАБА, 2020. 432 с.

Doctor of Science, Professor **Mykola Surianinov**,  
PhD, associate Professor **Stepan Neutov**,  
PhD, associate Professor **Mykola Soroka**,  
Postgraduate **Vitalii Metlizkiy**,  
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

### **LOAD-LOADING CAPACITY AND CRACK FORMATION OF REINFORCED CONCRETE CYLINDRICAL SHELL WHEN CHANGING ITS THICKNESS**

The results of experimental studies of long cylindrical shells with the aim of determining their stress-strain state, load-bearing capacity and crack resistance when the thickness of the shell changes are described. A special stand was developed by the authors to implement the task. 4 models of a cylindrical shell made of reinforced concrete (samples RC1-RC4) were manufactured and tested. The thickness of the samples was 45, 50, 55, 60 mm, and the cross-sectional dimensions of the side elements were changed accordingly. The distributed load (vertical) was applied in four strips, each 13 cm wide, and only the body of the shell, i.e. the side members were not loaded. The shell hinges from the corners on 100x100mm plates. Inside each side element are two reinforcing rods with a diameter of 10 mm. In order to obtain a complete and reliable picture of the deformation of the shell surface, 4 hour-type indicators are attached to each of the three zones located between the load chains. In addition to indicators, strain gauges were pasted on the shell, which were used to monitor deformations on the upper and lower surfaces. The loading process ended when the tested shell lost its ability to resist the external load. The magnitude of the load corresponding to this moment was taken as the bearing capacity of the shell. Simultaneously with the shell samples, control samples of prisms and cubes were made to determine the physical and mechanical characteristics of concrete.

Graphs of the dependence of the relative deformation on the load were constructed. The bearing capacity of the shells and the load at which the first crack formed were determined. By the time of loss of bearing capacity, cracks with the same initial opening width of 0.05 mm had formed in all shells. The final crack opening width, as well as the load-bearing capacity, slightly increased with increasing shell thickness. However, the load at the beginning of crack formation turned out to be the largest for the two average values of the shell thickness – 50 and 55 mm. The general pattern of cracking of all samples is almost the same. The test methodology and the developed stand are universal in nature and will be used for further research.

Keywords: reinforced concrete; experiment; test stand; cylindrical shell; bearing capacity; cracking.

### REFERENCES

1. Guz A.N. (ed.) Methods for calculating shells. Volume 1. Theory of thin shells weakened by holes. Monograph / A.N. Guz, I.S. Chernyshenko, Val. N. Chekhov, Vic. N. Chekhov, K.I. Shnerenko. Kyiv: Naukova Dumka, 1980. 636 p. {in Russian}
2. Vlasov, V.Z. General theory of shells and its application in technology [Text] / V.Z. Vlasov. M.: Gostekhizdat, 1949. 784 p. {in Russian}
3. Volmir, A.S. Flexible plates and shells [Text] / A.S. Volmir. M.: Gostekhizdat, 1956. 420 p. {in Russian}
4. Goldenweiser, A.A. Theory of elastic thin shells [Text] / A. A. Goldenweiser. M.: Nauka, 1976. 512 p. {in Russian}
5. Grigorenko, Ya. M. Solving problems of shell theories on EOM [Text]/Ya. M. Grigorenko, A. P. Mukoed. Kiev: Vishcha School, 1979. 280 p. {in Ukrainian}
6. Novozhilov, V.V. Theory of thin shells [Text] / V.V. Novozhilov. L.: Shipbuilding, 1962. 431 p. {in Russian}
7. Timoshenko, S.P. Plates and shells [Text] / S.P. Timoshenko, S. Voinovsky-Krieger. M.: Nauka, 1966. 635 p. {in Russian}
8. Kan S.N., Kaplan Yu.I., Destruction of cylindrical shells of budivel coatings. Rick: 1973 Vidavnitstvo: Vishcha school 244 p. {in Ukrainian}
9. Tanaka, Masafumi & Mashita, Kazuhiko. (2010). Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). 75. 1681-1689. 10.3130/aijs.75.1681. {in English}
10. Karpov, Vladimir & Semenov, Alexey. (2013). Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution. Magazine of Civil Engineering. 40. 100-106. 10.5862/MCE.40.11. {in English}

11. Shen Li, Do Kyun Kim, Qing Quan Liang. Fiber-Based modeling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment, *Engineering Structures*, Volume 272, 2022, 114988, ISSN 0141-0296, doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988. {in English}
12. Shen Li, Do Kyun Kim. Ultimate strength characteristics of unstiffened cylindrical shell in axial compression, *Ocean Engineering*, Volume 243, 2022, 110253, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110253>. {in English}
13. Ahmed A. Yaseen, Majed A. Khalaf, Fareed H. Majeed Mathematical Modeling of Engineering Problems. Vol. 10, No. 3, June, 2023, pp. 815-820. {in English}
14. Rong Li, Meng Yang, Bin Liang. A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses. *Structures*, Volume 52, 2023, Pages 146-157, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130>. {in English}
15. DSTU B V.2.6-7-95 (1997). Concrete concrete and reinforced concrete collections. Methods of verification of innovations. Rules for assessing strength, hardness and crack resistance. K.: State Committee of Ukraine on the right of place-building and architecture IV. {in Ukrainian}.
16. DSTU B V.2.7-214:2009 (2010). Concrete. Methods for assessing the importance of control images / K.: Ministry of Regional Development of Ukraine. {in Ukrainian}.
17. Lazareva D.V., Soroka M.M., Shilyaev O.S. Use the ANSYS PC to solve mechanical problems. Edited by M.G. Surianinov: monograph / D.V. Lazareva, M.M. Soroka, O.S. Shilyaev. Odessa: ODABA, 2020. 432 p. {in Ukrainian}