

**ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ
РЕСУРСОЕКОНОМНИХ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД**

УДК 624.012.25

**ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНОК ПОКРИТТЯ У
ФОРМІ ГІПЕРБОЛІЧНОГО ПАРАБОЛОЇДА З АРМОЦЕМЕНТУ ТА
СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ЗА УМОВ ДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО
НАВАНТАЖЕННЯ**

**ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК
ПОКРЫТИЯ В ФОРМЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ПАРАБОЛОИДА ИЗ
АРМОЦЕМЕНТА И СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПРИ ДЕЙСТВИИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ**

**THE FRACTURE TOUGHNESS OF THIN-WALLED COVER SHELLS
HYPERBOLIC PARABOLOID SHAPED OF FERROCEMENT AND
STEEL FIBER CONCRETE UNDER THE ACTION OF OPERATING
LOADS**

**Андрійчук О.В. к.т.н., доцент (ORCID 0000-0002-6275-097X), Ужегов С.О.
асистент, (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)**

**Андрійчук А.В. к.т.н., доцент (ORCID 0000-0002-6275-097X), Ужегов С.О.
асистент, (Луцкий национальный технический университет, г. Луцк)**

**Andriichuk O.V., Ph.D., associate professor (ORCID 0000-0002-6275-097X),
Uzhehov S.O. professor assistant, (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

**У статті наведено результати експериментальних досліджень
тріщиностійкості тонкостінних оболонок покриття у формі
гіперболічного параболоїда з армоцементу та сталевібробетону за умов
дії експлуатаційного навантаження.**

**В статті приведені результати експериментальних досліджень
тріщиностійкості тонкостінних оболонок покриття в формі
гіперболічного параболоїда з армоцементу та сталевібробетону при
дії експлуатаційної навантаження.**

**Experimental research of new materials and structures with improved
parameters of strength, fracture toughness, bearing capacity and their
lifetime in comparison with typical elements is an actual problem of building
science.**

Nowadays there is a trend to design and use for buildings covering the new design solutions as the thin shells. One of the types of thin shells are Gaussian shells with negative curvature. It is worth to note that in the last decade, a considerable number of researches of thin-walled structures made of steel fiber reinforced concrete were conducted, which confirmed the efficiency of its use to enhance their hardness, fracture toughness and thus longer life.

The article presents the results of the authors' experimental studies of fracture toughness of thin-walled cover structures with Gaussian negative curvature in the shape of hyperbolic paraboloid made of ferrocement and steel fiber reinforced concrete under the action of the operating load.

The load application was carried out for ten steps, after each step the pause was for 15...20 min, during which the data of the strain-gauge station VNP-8 was recorded, using a microscope were measured and recorded the width of the cracks, deflection of the structure were measured etc.

The external force was evenly-distributed to its applications and the impact was simulated according to the real conditions of construction use.

The experimental part of the research was conducted at the laboratory of building materials and structures of Lutsk National Technical University. In scientific work carried out mapping and comparison of the obtained experimental results, carried out processing and analysis, presents the conclusions.

During the researches it was found that the fracture toughness of thin-walled shell cover with Gaussian negative curvature in the shape of a hyperbolic paraboloid with dispersed reinforcement (steel fiber reinforced concrete) is higher than in the shell made of ferrocement. Accordingly, it can be argued about the increasing of the lifetime of steel fiber reinforced concrete shell covering in comparison with the ferrocement shell.

Ключові слова:

Оболонка, гіпар, армоцемент, сталевіфібробетон, тріщиностійкість

Оболочка, гипар, армоцемент, сталефибробетон, трещиностойкость

Shell, hypar, ferrocement, steel fiber reinforced concrete, fracture toughness

Стан питання. За останні роки серед будівельних конструкцій, що використовуються в якості покриття будівель і споруд, спостерігаються тенденції до застосування нових конструктивних рішень у вигляді тонкостінних оболонок [1, 2]. Одним із видів тонкостінних оболонок, що розглянуто в статті, є оболонки від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда. Експериментальні дослідження оболонок з підвищеною тріщиностійкістю представляють значний науковий інтерес. Вони набувають широкого застосування у будівництві під час проектування будівель та споруд з точки зору техніко-економічної ефективності. Для підвищення тріщиностійкості тонкостінних оболонок застосовано

сталефібробетон, який є перспективним і ще не повністю вивченим матеріалом [3 - 12].

Метою даної роботи є експериментальні дослідження тріщиностійкості тонкостінних армоцементних і сталефібробетонних оболонок покриття у формі гіперболічного параболоїда при дії експлуатаційного навантаження.

Для проведення випробувань були сконструйовані тонкостінні оболонки у формі гіперболічного параболоїда з розмірами в плані 2250×3500 мм, товщиною 30 мм та стрілою підйому 500 мм (рис. 1).

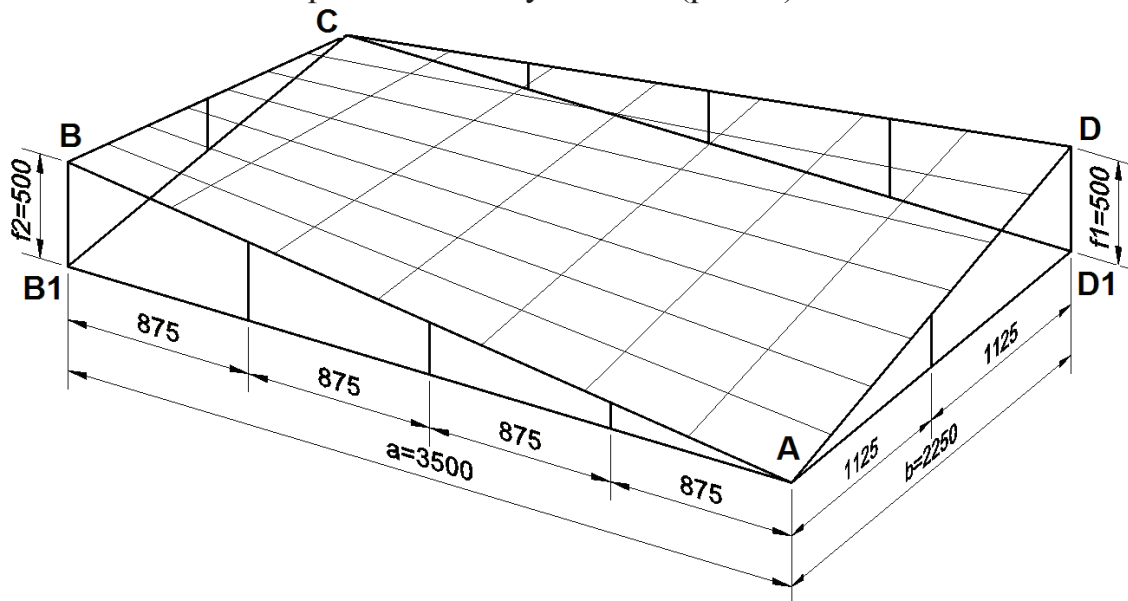


Рис. 1. Схема оболонки покриття у формі гіперболічного параболоїда

Детально про застосовані матеріали, процес конструювання та виготовлення оболонок, прикладання навантаження описано в роботах [13, 14].

Конструкція експериментальної оболонки покриття у формі гіперболічного параболоїда з армоцементу, який експлуатується за умов впливу навколишнього середовища, належить до другої категорії тріщиностійкості [15]. Гранично допустима ширина короточасного розкриття тріщини для даного випадку становить $a_{cr,c,k} = 0,05$ мм, а гранично допустима ширина тривалого розкриття тріщини становить $a_{cr,m} = 0,03$ мм.

Ширину розкриття тріщин визначали за допомогою мікроскопа МПБ-3 з ціною поділки 0,02 мм. З метою покращення візуального спостереження за виникненням та розвитком тріщин перед дослідженнями на нижню поверхню тонкостінної оболонки у формі гіперболічного параболоїда наносився вапняний розчин. Утворення тріщин фіксувалось візуально та відмічалось графічно (олівцем) на нижній грані оболонки, а їх ширину розкриття заміряли в місці максимального розкриття.

Дослідження процесу виникнення та розвитку тріщин у моделях тонкостінних конструкцій покриття у формі гіперболічного параболоїда проводилися на армоцементних зразках: 1Г-А-1 та 2Г-А-1 і сталефібробетонних зразках: 1Г-СФБ-1 та 2Г-СФБ-1.

Під час прикладання рівномірно розподіленого навантаження одноразової дії до армоцементної оболонки 1Г–А–1, тріщини у розтягнутій зоні почали виникати уже на 5-му етапі завантаження, коли зусилля на Г-А-1 досягло $F_T = 1,345$ кПа. На 6-му етапі завантаження під час прикладання $F_T = 1,505$ кПа кількість утворених тріщин збільшилася. Також спостерігався приріст ширини їх розкриття. На наступних етапах завантаження (№7...№10) фіксувалася поява нових тріщин та подальше розкриття існуючих (рис. 2).

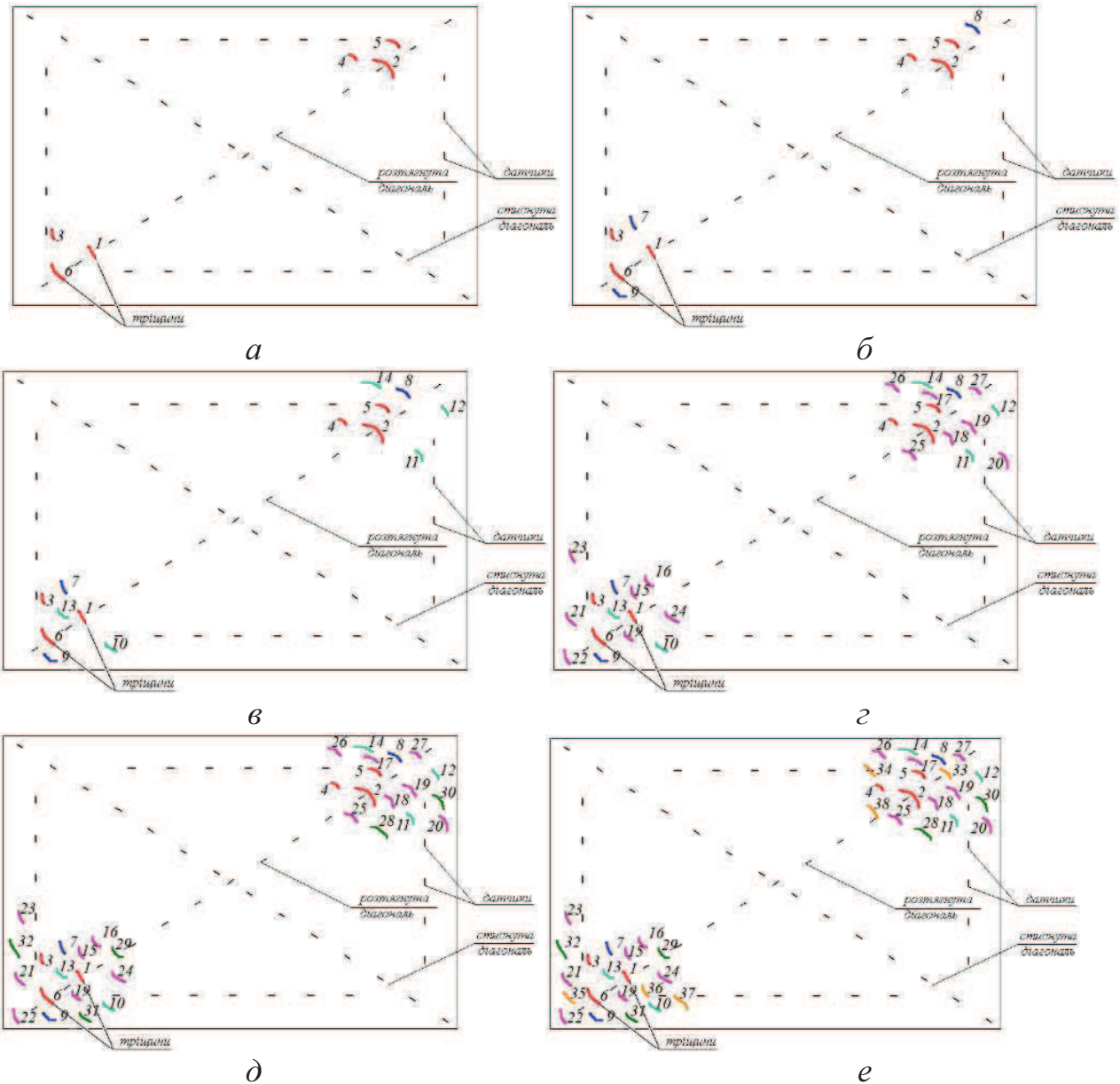


Рис. 2. Процес тріщиноутворення у зразку 1Г–А–1 при завантаженні:
 а – $F_T = 1,345$ кПа (етап №5); б – $F_T = 1,505$ кПа (етап №6);
 в – $F_T = 1,665$ Па (етап №7); г – $F_T = 1,825$ кПа (етап №8);
 д – $F_T = 1,985$ кПа (етап №9); е – $F_T = 2,145$ кПа (етап №10)

Детально процес тріщиноутворення в армоцементній оболонці 1Г–А–1 на 5...10 етапах завантаження представлено в табл. 1 і на рис. 3. Тріщини пронумеровані, відповідно до їх появи.

Таблиця 3

Ширина розкриття тріщин (мм) при різних рівнях навантаження

Номер тріщини	Етап завантаження					
	5	6	7	8	9	10
	1345 Па	1505 Па	1665 Па	1825 Па	1985 Па	2145 Па
1	0,01	0,02	0,04	0,05	0,10	0,20
2	0,01	0,01	0,02	0,04	0,09	0,17
3	0,02	0,03	0,03	0,05	0,11	0,21
4	0,01	0,02	0,03	0,04	0,08	0,19
5	0,02	0,02	0,02	0,03	0,07	0,18
6	0,01	0,02	0,02	0,04	0,09	0,22
7	-	0,01	0,02	0,02	0,04	0,09
8	-	0,02	0,03	0,03	0,06	0,18
9	-	0,01	0,02	0,03	0,07	0,18
10	-	-	0,03	0,04	0,10	0,23
11	-	-	0,01	0,02	0,04	0,10
12	-	-	0,01	0,02	0,03	0,08
13	-	-	0,02	0,02	0,05	0,11
14	-	-	0,03	0,04	0,09	0,20
15	-	-	-	0,05	0,11	0,24
16	-	-	-	0,05	0,12	0,27
17	-	-	-	0,03	0,07	0,16
18	-	-	-	0,02	0,05	0,12
19	-	-	-	0,02	0,04	0,08
20	-	-	-	0,03	0,09	0,20
21	-	-	-	0,04	0,08	0,18
22	-	-	-	0,03	0,07	0,17
23	-	-	-	0,04	0,08	0,20
24	-	-	-	0,03	0,08	0,12
25	-	-	-	0,02	0,04	0,07
26	-	-	-	0,03	0,06	0,09
27	-	-	-	0,04	0,07	0,13
28	-	-	-	-	0,03	0,06
29	-	-	-	-	0,02	0,05
30	-	-	-	-	0,03	0,06
31	-	-	-	-	0,02	0,06
32	-	-	-	-	0,02	0,07
33	-	-	-	-	-	0,05
34	-	-	-	-	-	0,09
35	-	-	-	-	-	0,08
36	-	-	-	-	-	0,07
37	-	-	-	-	-	0,06
38	-	-	-	-	-	0,09
Середня	0,013	0,018	0,024	0,033	0,066	0,133

Під час дослідження зафіксовано, що з прикладанням кожного етапу в елементі 1Г–А–1 кількість нових тріщин зростає на 40...50%, а ширина розкриття існуючих ($a_{сгс}$) збільшується приблизно вдвічі.

На графіках, що представлені на рис. 3 наглядно подано залежності від прикладеного навантаження на етапах та кількістю утворених тріщин (a) в конструкції гіпарі 1Г–А–1, та їх усередненою шириною (b).

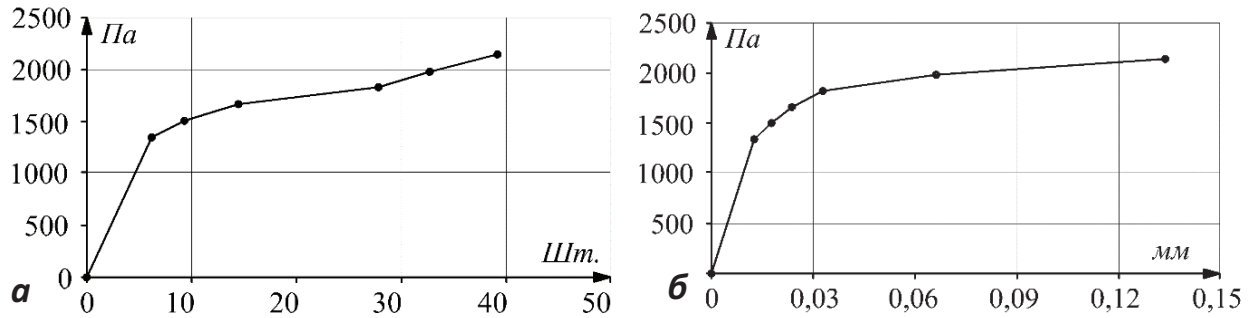


Рис. 3. Процес тріщиноутворення в гіпарі 1Г–А–1:

a – кількість утворених тріщин на етапах прикладання навантаження;
 b – усереднена ширина розкриття тріщин, мм

Під час прикладання рівномірно розподіленого навантаження одноразової дії до оболонки 1Г–СФБ–1 було зафіксовано виникнення перших тріщин у розтягнутій зоні оболонки на 8-му етапі при $F_T=1,825$ кПа. На наступних етапах завантаження (№9 і №10) фіксувалася поява нових тріщин та подальше розкриття існуючих. На рис. 4 подано схему розташувань тріщин з нумерацією у відповідності до їх появи в оболонці.

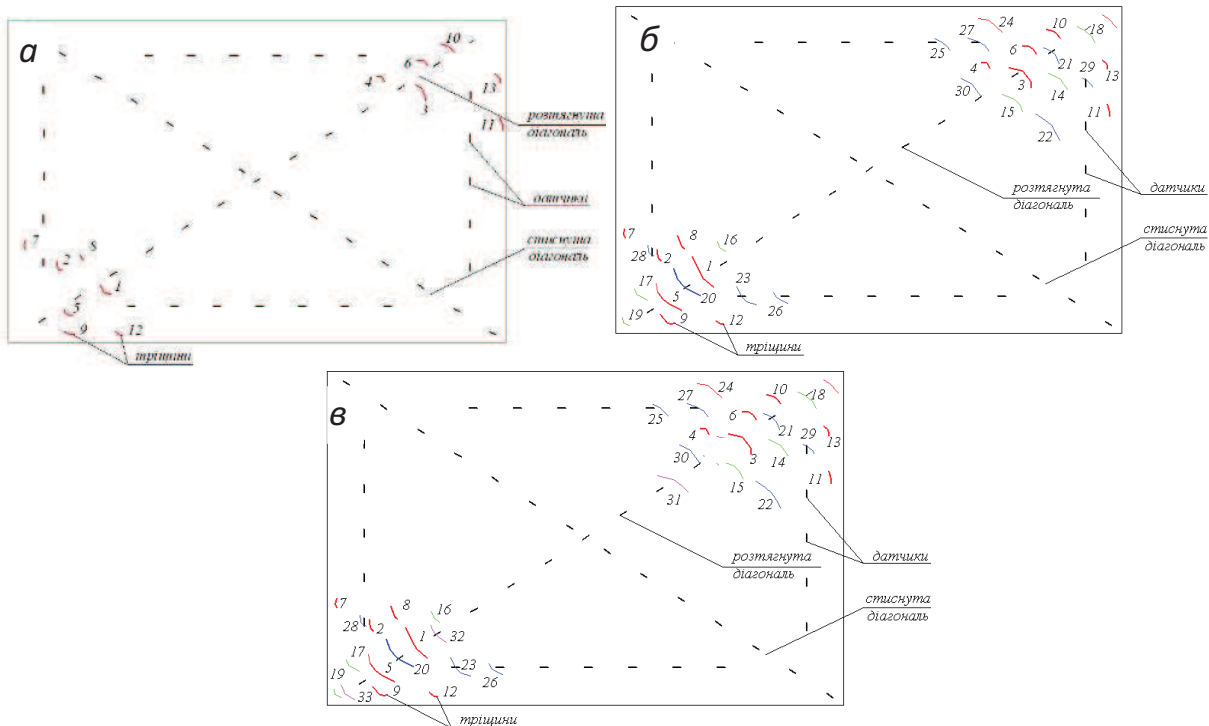


Рис. 4. Процес тріщиноутворення у зразку 1Г–СФБ–1 при завантаженні:

a – $F_T = 1,825$ кПа (етап №8); $б$ – $F_T = 1,985$ кПа (етап №9);

$в$ – $F_T = 2,145$ кПа (етап №10);

Зафіксовано, що на кожному етапі кількість нових тріщин збільшується на 50...80 %, а ширина розкриття існуючих зростає в 2-2,5 рази. Детально процес тріщиноутворення в сталевібробетонній оболонці 1Г-СФБ-1 на 8...10 етапах завантаження представлено в табл. 2 і на рис. 5.

Таблиця 2

Ширина розкриття тріщин (мм) при різних рівнях навантаження

Номер тріщини	Етап завантаження		
	8	9	10
	1825 Па	1985 Па	2145 Па
1	0,02	0,07	0,16
2	0,01	0,02	0,06
3	0,03	0,07	0,18
4	0,03	0,04	0,09
5	0,02	0,06	0,15
6	0,03	0,07	0,14
7	0,01	0,02	0,05
8	0,02	0,04	0,10
9	0,01	0,02	0,06
10	0,03	0,06	0,13
11	0,01	0,02	0,05
12	0,01	0,02	0,06
13	0,01	0,02	0,05
14	-	0,06	0,12
15	-	0,06	0,13
16	-	0,05	0,10
17	-	0,03	0,09
18	-	0,03	0,09
19	-	0,01	0,03
20	-	0,09	0,19
21	-	0,08	0,16
22	-	0,04	0,09
23	-	0,06	0,14
24	-	0,03	0,07
25	-	-	0,04
26	-	-	0,03
27	-	-	0,04
28	-	-	0,03
29	-	-	0,04
30	-	-	0,06
31	-	-	0,05
32	-	-	0,06
33	-	-	0,05
Середня	0,018	0,045	0,089

На графіках, що представлені на рис. 5 наглядно подано залежності від прикладеного навантаження на етапах та кількості утворених тріщин (а) в конструкції гіпара 1Г–СФБ–1, та їх усередненою шириною (б).

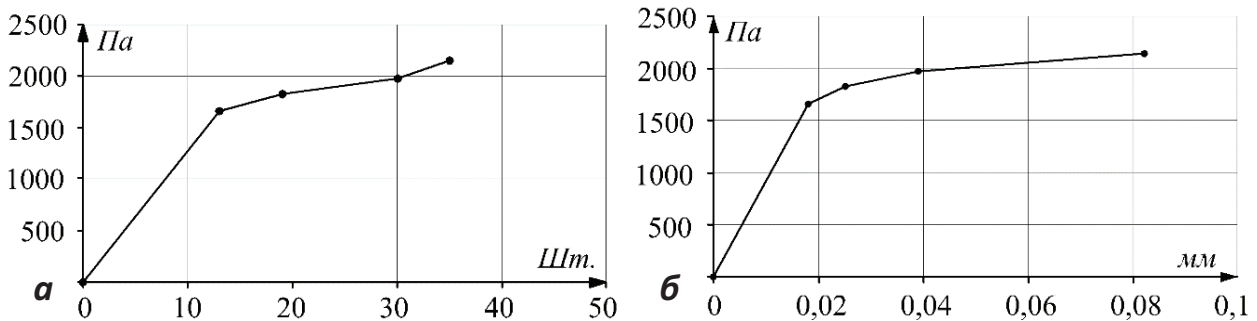


Рис. 5. Процес тріщиноутворення в гіпарі 1Г–СФБ–1:
 а – кількість утворених тріщин на етапах прикладання навантаження;
 б – усереднена ширина розкриття тріщин, мм

В ході експерименту встановлено, що під час прикладання до оболонки зі сталевібробетону 2Г–СФБ–1 повторних навантажень експлуатаційного рівня ($\eta=0,7$) появи процесу тріщиноутворення не було зафіксовано. А в тонкостінному покритті з армоцементу 2Г–А–1 під аналогічними повторними навантажень вздовж увігнутої твірної спостерігалася поява тріщин та їх розкриття.

Варто відмітити, що тріщини в сталевібробетонній оболонці 1Г–СФБ–1 були з нечіткими контурами та вираженою плетінчастістю. Зафіксовано, що основне русло тріщин неначе розтікається на кілька дрібних прямолінійно направлених потоків, що характеризує плетінчасту природу під час процесу тріщиноутворення.

Доведено, що тонкостінні оболонки від'ємної гаусової кривини типу «гіперболічний параболоїд», які виготовлені зі сталевібробетону з відсотком армування 1,5%, за показниками несучої здатності та тріщиностійкості перевищують відповідні показники типових залізобетонних (армоцементних) тонкостінних оболонок і при цьому зменшуються витрати матеріалів.

Після аналізування матеріалів дослідження, що викладені в даній статті, можна зробити висновок, що тонкостінні оболонки покриття у формі гіперболічного параболоїда зі сталевібробетону за показниками тріщиностійкості при одноразових і повторних навантаженнях мають суттєві переваги порівняно із аналогічними елементами з армоцементу, а сталевібробетон, як ефективний матеріал, доцільно використовувати для виготовлення тонкостінних оболонок покриття від'ємної гаусової кривини у формі гіперболічного параболоїда.

1. Сунак О.П. Оцінювання надійності сталевібробетонних елементів: монографія / О.П. Сунак, П.О. Сунак. – Луцьк: ЛДТУ, 2001. – 142 с.
2. Сунак О.П. Сталевібробетонні конструкції: навчальний посібник – К.: ІЗіМН, 1999. – 158 с.
3. Бабич Є.М. Дослідження опору високоміцних бетонів та фібробетонів пробиванню / Є.М. Бабич, Д.В. Кочкар'юв, С.В. Філіпчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2017. - Вип. 34. - С. 71-85.
4. Бабич Є.М. Використання сталевібробетону для дорожньо-транспортних споруд / Є.М. Бабич, О.В. Андрійчук, І.М. Ясюк // Містобудування та територіальне планування. Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2014. Випуск № 54. – С. 33– 41.
5. Бабич Є.М. Проектування та виготовлення безнапірних труб із сталевібробетону / Є.М. Бабич, О.В. Андрійчук // Рекомендації. – Луцьк: Луцький НТУ, 2012. – 32 с.
6. Борисюк О.П. Напружено-деформований стан залізобетонних балок підсиленіх під навантаженням сталевібробетоном і композитами при дії малоциклових навантажень // О.П. Борисюк, Ю.Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2016. – Вип. 33. – С. 298 – 303.
7. Білозір В.В. [Вплив низхідної вітки діаграми деформування сталевібробетону за розтягу на несучу здатність балок](#) / В.В. Білозір // Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – Дубляни, ЛНАУ, 2015. Випуск № 16. – С. 60 – 64.
8. Андрійчук О.В. Сталевібробетонні безнапірні труби / О.В. Андрійчук, Є.М. Бабич // Монографія. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. – 150 с.
9. Андрійчук О.В. Робота і розрахунок елементів кільцевого перерізу при дії повторних навантажень: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.21 / О.В. Андрійчук – Львів, 2011. – 24 с.
10. Андрійчук О.В. Виготовлення придорожніх лотків водовідводу зі сталевібробетону / О.В. Андрійчук, І.М. Ясюк // Наукові нотатки: збірник наукових праць – Луцьк: Луцький НТУ, 2014. – Випуск 45. – С. 7 – 14.
11. Babych E.M., Strength of elements with annular cross sections made of steel-fiber-reinforced concrete under one-time loads / O.V. Andriichuk, E.M. Babych // Materials Science, Vol. 52, No. 4, January, 2017, p. 509 – 513.
12. Andriichuk O. The influence of repeated loading on work of the steel fiber concrete drainage trays and pipes on the roads / Andriichuk O., Babich V., Yasyuk I., Uzhehov S. // MATEC Web of Conferences, N 116, p 02001, 1-9.
13. Ужегов С.О. [Визначення оптимальних розмірів конструктивних елементів сталевібробетонної конструкції покриття у формі гіперболічного параболоїда](#) / С.О. Ужегов, Р.В. Пасічник, О.В. Андрійчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди – Рівне: НУВГП, 2014. – Випуск 29. – С. 506 – 511.
14. [Ужегов С.О. Моделивання армоцементної оболонки](#) / С.О. Ужегов // [Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди](#). – 2015. – Випуск 30. – С. 277 – 284.
15. ДСТУ Б В.2.6.-204:2016 «Розрахунок і конструювання армоцементних конструкцій будівель та споруд» – К.: Мінрегіон України, 2015. – 46 с.

1. Sunak O.P. Otsiniuvannia nadiinosti stalefibrobetonnykh elementiv: monohrafiia / O.P. Sunak, P.O. Sunak. – Lutsk: LDTU, 2001. – 142 s.

2. Sunak O.P. Stalefibrobetonni konstruktsii: navchalnyi posibnyk – K.: IZiMN, 1999. – 158 s.
3. Babych Ye.M. Doslidzhennia oporu vysokomitsnykh betoniv ta fibrobetoniv probyvanniu / Ye.M. Babych, D.V. Kochkarov, S.V. Filipchuk // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. - 2017. - Vyp. 34. - S. 71-85.
4. Babych Ye.M. Vykorystannia stalefibrobetonu dlia dorozhno-transportnykh sporud / Ye.M. Babych, O.V. Andriichuk, I.M. Yasiuk // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. Nauk.-tekhn. zbirnyk. – K., KNUBA, 2014. Vypusk № 54. – S. 33– 41.
5. Babych Ye.M. Proektuvannia ta vyhotovlennia beznapirnykh trub iz stalefibrobetonu / Ye.M. Babych, O.V. Andriichuk // Rekomendatsii. – Lutsk: Lutskiy NTU, 2012. – 32 s.
6. Borysiuk O.P. Napruzhenno-deformovanyi stan zalizobetonnykh balok pidsylenykh pid navantazhenniam stalefibrobetonom i kompozytamy pry dii malotsyklovykh navantazhen // O.P. Borysiuk, Yu.Iu. Ziatyuk // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zb. nauk. prats. – Rivne: NUVHP, 2016. – Vyp. 33. – S. 298 – 303.
7. Bilozir V.V. Vplyv nyzkhidnoi vitky diahramy deformuvannia stalefibrobetonu za rozttiahu na nesuchu zdatnist balok / V.V. Bilozir // Visnyk Lvivskoho natsionalnogo aharnoho universytetu. Serii: Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo. – Dubliany, LNAU, 2015. Vypusk № 16. – S. 60 – 64.
8. Andriichuk O.V. Stalefibrobetonni beznapirni truby / O.V. Andriichuk, Ye.M. Babych // Monohrafiia. – Lutsk: RVV Lutskoho NTU, 2012. – 150 s.
9. Andriichuk O.V. Robota i rozrakhunok elementiv kiltsevoho pererizu pry dii povtornykh navantazhen: Avtoref. dys... kand. tekhn. nauk: 05.03.21 / O.V. Andriichuk – Lviv, 2011. – 24 s.
10. Andriichuk O.V. Vyhotovlennia prydorozhnykh lotkiv vodovidvodu zi stalefibrobetonu / O.V. Andriichuk, I.M. Yasiuk // Naukovi notatky: zbirnyk naukovykh prats – Lutsk: Lutskiy NTU, 2014. – Vypusk 45. – S. 7 – 14.
11. Babych E.M., Strength of elements with annular cross sections made of steel-fiber-reinforced concrete under one-time loads / O.V. Andriichuk, E.M. Babych // Materials Science, Vol. 52, No. 4, January, 2017, p. 509 – 513.
12. Andriichuk O. The influence of repeated loading on work of the steel fiber concrete drainage trays and pipes on the roads / Andriichuk O., Babich V., Yasyuk I., Uzhehov S. // MATEC Web of Conferences, N 116, p 02001, 1-9.
13. Uzhehov S.O. Vyznachennia optymalnykh rozmiriv konstruktyvnykh elementiv stalefibrobetonnoi konstruktsii pokryttia u formi hiperbolichnogo paraboloida / S.O. Uzhehov, R.V. Pasichnyk, O.V. Andriichuk // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy – Rivne: NUVHP, 2014. – Vypusk 29. – S. 506 – 511.
14. Uzhehov S.O. Modeliuvannia armotsementnoi obolonky / S.O. Uzhehov // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. – 2015. – Vypusk 30. – S. 277 – 284.
15. DSTU B V.2.6.-204:2016 «Rozrakhunok i konstruiuvannia armotsementnykh konstruktsii budivel ta sporud» – K.: Minrehion Ukrainy, 2015. – 46 s.