УДК 624.012.25

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗОБЕТОНУ, СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ТА СТАЛЕФІБРОЗАЛІЗОБЕТОНУ В ПРИДОРОЖНІХ ЛОТКАХ

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DEFORMATIONS IN REINFORCED CONCRETE AND STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE IN THE ROAD GUTTER

Андрійчук О.В., к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-6275-097X, **Ясюк І.М., аспірант,** ORCID 0000-0003-2087-594X (Луцький НТУ, м. Луцьк)

O. Andriichuk, Ph.D., associate professor, ORCID 0000-0002-6275-097X,
I. Yasyuk, PhD student, ORCID 0000-0003-2087-594X (Lutsk National Technical University, Lutsk)

Наведені результати експериментальних досліджень деформацій залізобетону, сталефібробетону та сталефіброзалізобетону в придорожніх лотках для водовідведення при короткочасних повторних навантаженнях із рівнем прикладання зусиль η_{cyc} = 0,6. Представлено методику проведення експериментальних досліджень.

The study of new materials and constructions with improved parameters of strength, crack resistance, bearing capacity and longer operating life than standard elements is an actual problem of building science.
The article presents the results of experimental researches of deformations in reinforced concrete, steel fiber reinforced concrete and steel fiber rebar reinforced concrete in the road drainage gutters at short-term re-loads.
The level of force application was η_{cyc} = 0,6 of the destructive values. The experimental part of the research conducted at the construction laboratory of Lutsk NTU. The methodology of experimental research is presented. It is determined that in the drainage trays that are made of steel fiber reinforced concrete under repeated loads occurs significantly less deformations in comparison with similar constructions made of ordinary concrete reinforced or combined reinforced elements (steel fiber rebar reinforced concrete).
Material deformations in "2SFBp" samples under the repeated loads during tenfold loading of maximum stress was in the 5...6 times less than in standard reinforced concrete constructions («2ZBp»). Therefore, the fracture toughness of steel fiber concrete gutters and their lifespan will be improved than in typical reinforced concrete constructions.

Ключові слова:
Залізобетон, сталефібробетон, сталефіброзалізобетон, сталева фібра, водовідведення, лоток, несуча здатність, міцність, деформації.
Reinforced concrete, steel fiber reinforced concrete, SFRC, steel fiber rebar reinforced concrete, fiber, water diversion, road gutter, durability, fracture toughness.

Вступ. Дослідженню сталефібробетону (СФБ) надається належна увага, оскільки він є ефективним матеріалом для виготовлення багатьох нових та підсилення існуючих будівельних конструкцій [1…8].

Через вищу тріщиностійкість та жорсткість в порівнянні з залізобетоном його доцільно застосовувати, у тому числі, й для виготовлення лотків для притрасового водовідведення, які можуть використовуватися також і в гідромеліоративних системах.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження СФБ проводяться для різних будівельних конструкцій, а саме таких як: жорстке цементно-бетонне покриття доріг; злітно-посадкові смуги аеродромів; гідроспоруди: причали, дамби, греблі, труби; просторові споруди; елементи мостів та інше. Отримані результати попередніх досліджень лотків для притрасового водовідведення зі СФБ, що проведено авторами статті – представлено в працях [9…11].

Експериментальні дослідження лотків систем придорожнього водовідведення виготовлених із СФБ при дії повторних навантажень, порівняння отриманих даних із результатами випробувань типових лотків і виявлення переваг та недоліків при застосуванні дисперсно-армованого бетону в конструкції лотків є актуальною та доцільною задачею.

Постановка мети і задач досліджень. Метою даної статті є висвітлення результатів проведених досліджень по визначенню деформацій залізобетону, сталефіброзалізобетону (СФЗБ) і СФБ в придорожніх лотках при дії короткочасних повторних навантажень.

Методика дослідження. Для проведення запланованого дослідження виготовлено три залізобетонні лотки з відсотком армування сталевим каркасом $\mu \approx 2\%$, три СФБ зразки з армуванням сталевою анкерною фіброю з $\mu \approx 2\%$, і три зразки із СФЗБ в яких відсоток армування фібрами становить $\mu \approx 1$ %, а відсоток армування сталевим каркасом $\mu \approx 1\%$. Детально конструктивні рішення, технологію виготовлення та методику дослідження експериментальних лотків представлено в статтях [9, 10].

У процесі випробування лотків для порівняння деформацій в ЗБ, СФБ і СФЗБ проведено експериментальні дослідження згідно табл. 1, відповідно до мети та задач, поставлених у роботі.

Таблиця 1

План експериментальної частини при дослідженні лотків водовідведення

Навантаження	Досліджувані параметри	Особливості зразків	Маркування зразків
Повторні з рівнем η_{cyc}= 0,6 при 10 циклах. Крок – 10 % від руйнівного	Міцність, деформативність, тріщиностійкість при дії повторних навантажень із η_{cyc} = 0,6	Залізобетонні, С12/15, $\mu \approx 2\%$	2ЗБп-1, 2ЗБп-2, 2ЗБп-3;
		Сталефібробетонні, С12/15, $\mu \approx 2$ %	2СФБп-1, 2СФБп-2, 2СФБп-3;
		Сталофіброзалізобетонні С12/15, $\mu \approx 1+1\%$	2СФЗБп-1, 2СФЗБп-2, 2СФЗБп-3;

Випробування дослідних зразків (лотків) виконується шляхом прикладання до металевої траверси зосередженого вертикального навантаження, яке діє на лоток як рівномірно розподілене (рис. 1).

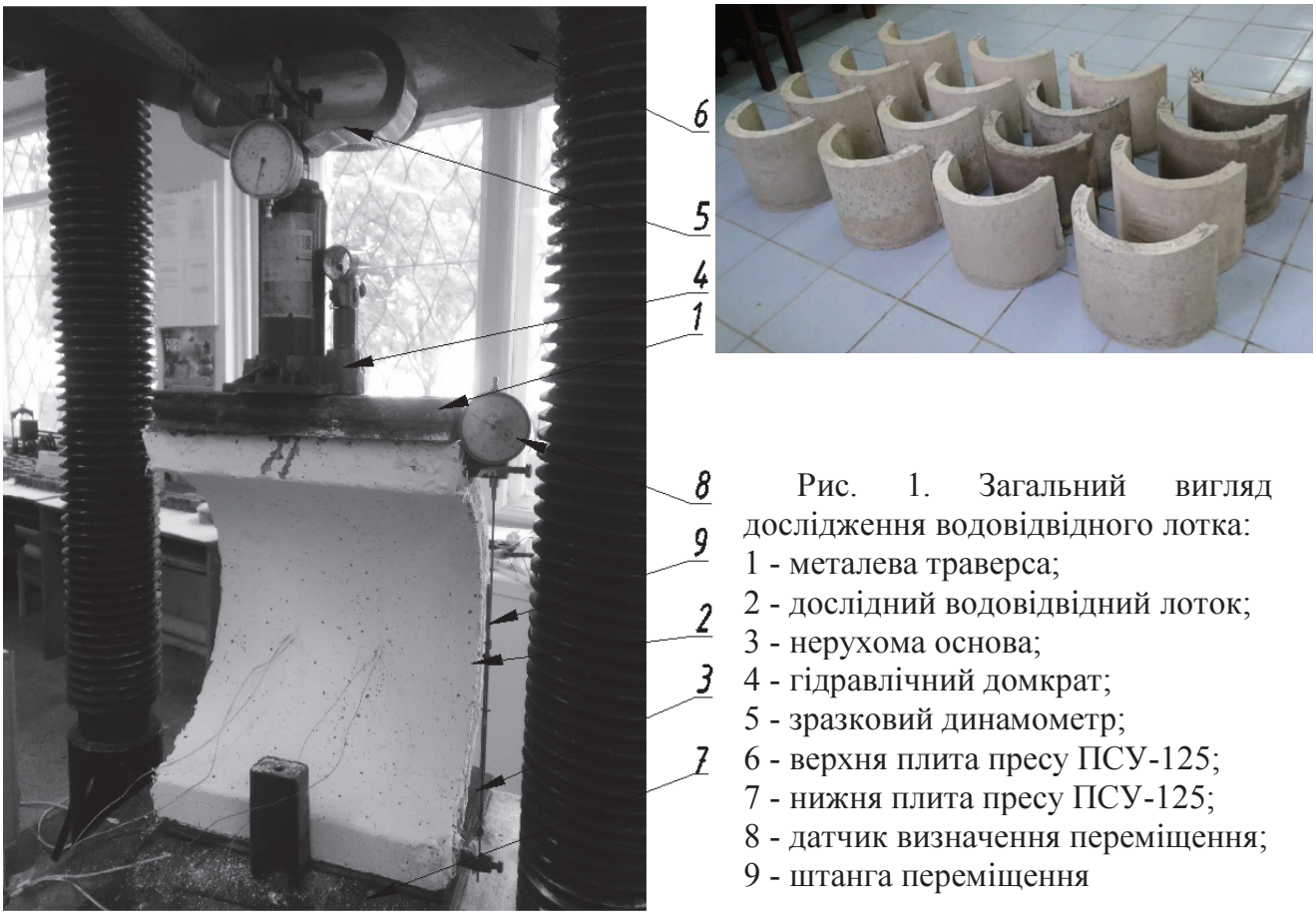

Рис. 1. Загальний вигляд дослідження водовідвідного лотка:
1 - металева траверса;
2 - дослідний водовідвідний лоток;
3 - нерухома основа;
4 - гідравлічний домкрат;
5 - зразковий динамометр;
6 - верхня плита пресу ПСУ-125;
7 - нижня плита пресу ПСУ-125;
8 - датчик визначення переміщення;
9 - штанга переміщення

В процесі дослідження нижня частина лотка спирається на жорстку основу. Для цього використано гідравлічний прес ПСУ-125. Для підвищення точності вимірювання діючого зусилля використовується зразковий протестований динамометр, що дає можливість виміряти навантаження з точністю 50 Н. Навантаження створюється гідравлічним домкратом.

Повторні навантаження прикладалися ступенями по 1,5 кН/м. Розвантаження зразків на циклах виконувалося такими ж ступенями. Після кожного ступеня навантаження робиться витримка 5 - 7 хв, під час якої знімаються покази індикаторів, вимірюються деформації перерізу та вимірюється ширина розкриття тріщин. Режим навантаження зразків подано на рис. 2.

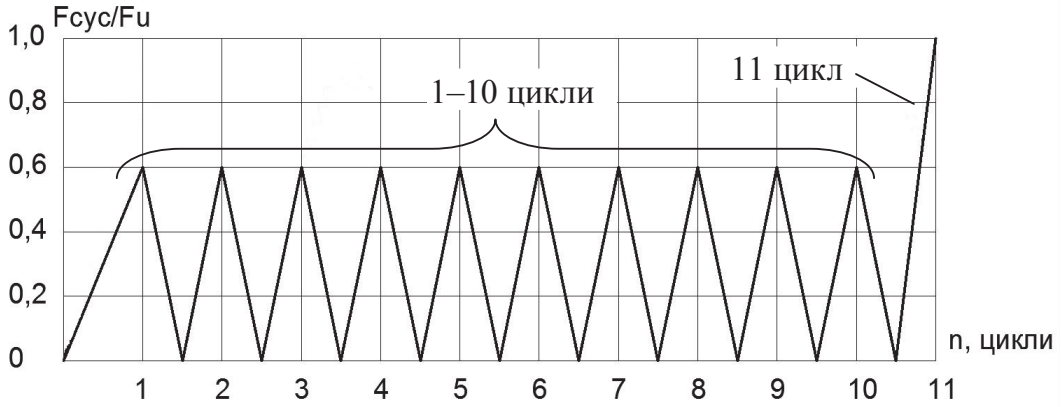

Рис. 2. Режим навантажень дослідних лотків водовідведення:

Для вимірювання деформацій в залізобетоні, СФЗБ і СФБ на внутрішні та зовнішні поверхні лотка наклеювали тензорезистори з базою 50 мм, показники яких фіксували тензометричним вимірювальним комплексом «Измерительная тензометрическая система ВНП-8». Їх наклеювали по два в двох зонах (зсередини – зона стиску та ззовні – зона розтягу). Тензорезистори на елементах розміщували відповідно до схеми, що подана на рис. 3.

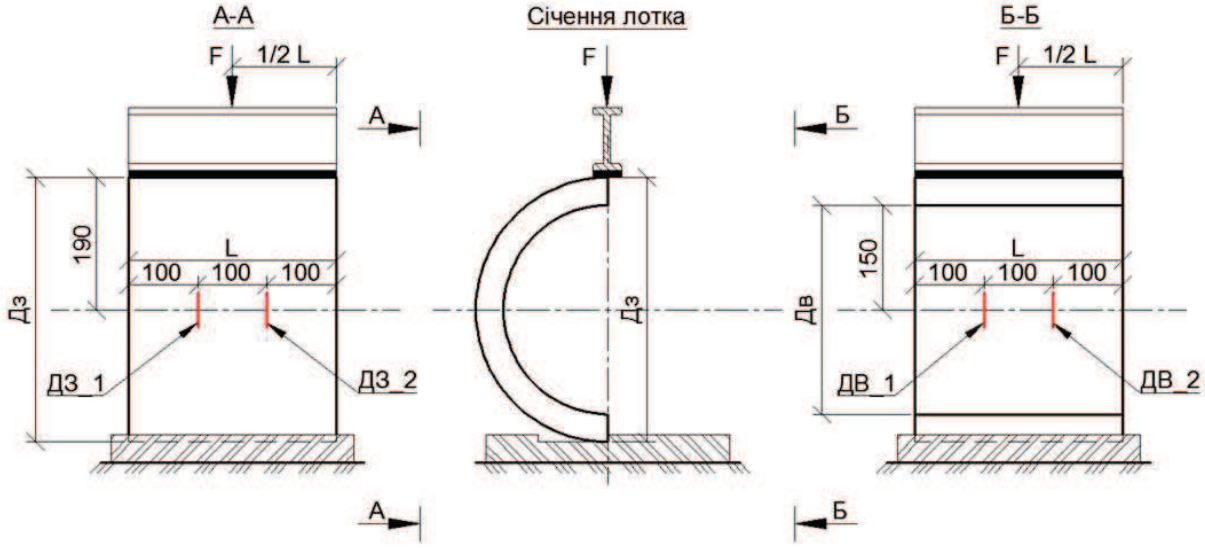

Рис. 3. Схема розташування тензорезисторів на лотках водовідведення:
ДВ_1…2 – тензорезистори розміщені на внутрішній поверхні лотка (зона стиску);
ДЗ_1…2 – тензорезистори розміщені на зовнішній поверхні лотка (зона розтягу);

Результати досліджень. *Випробування залізобетонних зразків.* Дослідження проводилося на лотках: 2ЗБп–1, 2ЗБп–2 і 2ЗБп–3, із відсотком армування сталевими каркасами $\mu = 2$. Під час дослідження лотки 2ЗБп–1…3 на протязі 10 циклів ступенями навантажувались до рівня $\eta_{\text{сус}} = 0{,}6$ від руйнівного зусилля, а на 11 циклі були доведені до руйнування.

Деформації залізобетону, які вимірювались в зразках 2ЗБп–1…3 за допомогою тензометричного комплексу ВНП-8 подані на рис. 4.

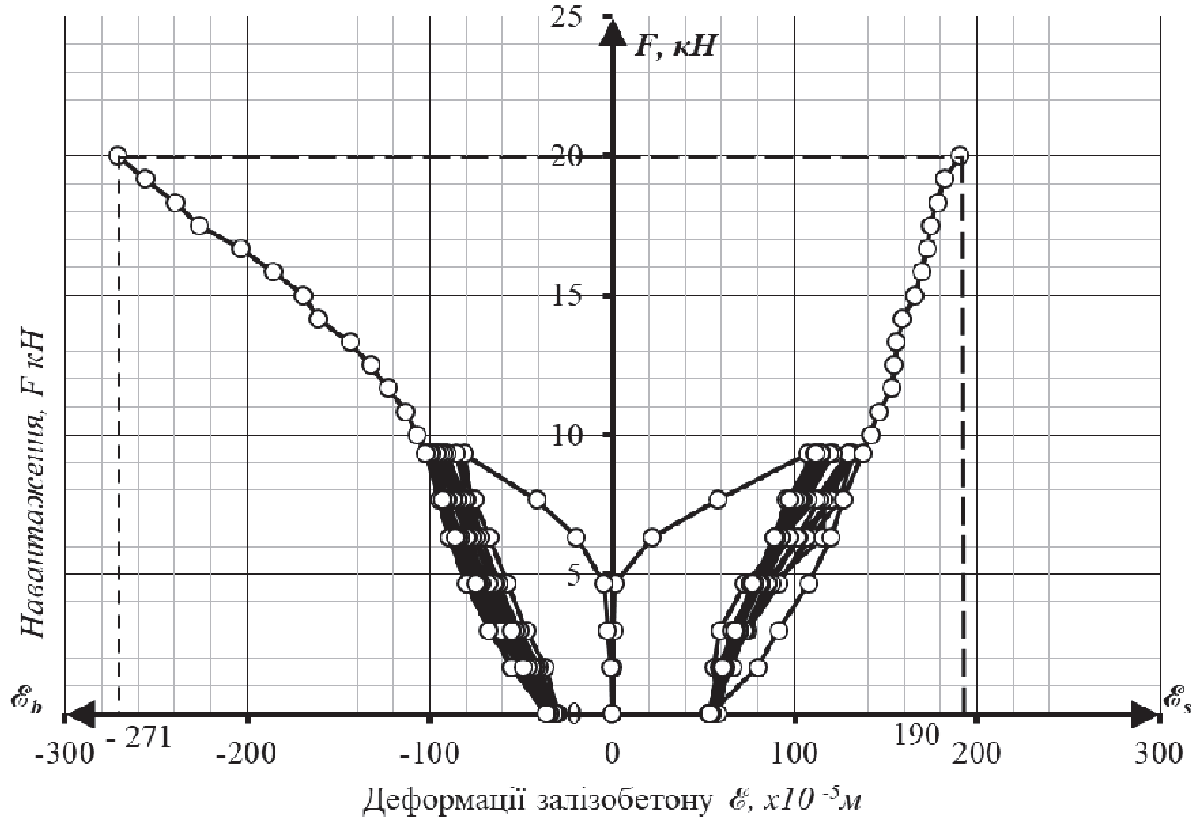

Рис. 4. Деформації стиснутої ($\mathcal{E}_b$) та розтягненої ($\mathcal{E}_s$) зони в зразках 2ЗБп–1…3

На 1-му циклі при навантаженні $F = 9{,}33$ кН, значення повних та залишкових деформацій залізобетону в зонах стиску та розтягу становили: $\mathcal{E}_{b,max} = 81\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,max} = 107\text{x}10^{-5}$, $\mathcal{E}_{b,pl} = 29\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,pl} = 57\text{x}10^{-5}$. Протягом наступних 9-ти циклів до 10-го включно, в зонах стиску та розтягу відбувалося помірне зростання повних деформацій до $\mathcal{E}_{b,max} = 101\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,max} = 131\text{x}10^{-5}$. На наступному 11-му циклі (руйнівному), внаслідок підвищення навантаження вище рівня $\eta_{\text{сус}} = 0{,}6$, спостерігалося зростання повних деформацій до $\mathcal{E}_{b,max} = 271\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,max} = 190\text{x}10^{-5}$ (при $F = 20$ кН).

Випробування сталефібробетонних зразків. Дослідження проводилося на лотках: 2СФБп–1, 2СФБп–2 і 2СФБп–3 виготовлених із СФБ ($\mu = 2$). Під час дослідження 2СФБп–1…3 на протязі 10 циклів ступенями навантажувались до рівня $\eta_{\text{сус}} = 0{,}6$, а на 11 циклі були доведені до руйнування.

Деформації СФБ, які вимірювались в зразках 2СФБп–1…3 за допомогою тензометричного комплексу ВНП-8 подані на рис. 5.

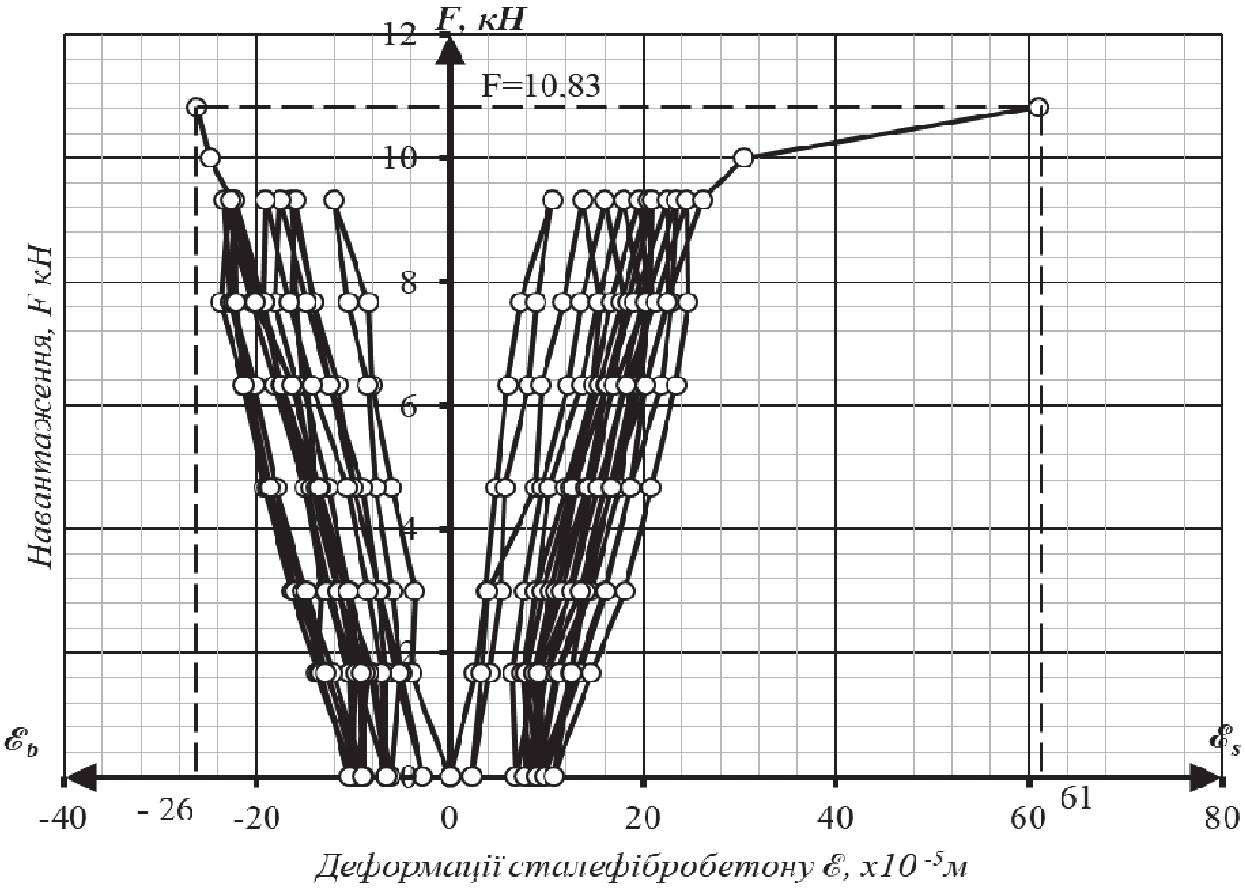

Рис. 5. Деформації стиснутої ($\mathcal{E}_b$) та розтягненої ($\mathcal{E}_s$) зони в зразках 2СФБп–1…3

Варто відмітити, що на 1-му циклі навантаження, значення повних та залишкових деформацій СФБ становили: $\mathcal{E}_{b,max} = 12\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,max} = 10\text{x}10^{-5}$, $\mathcal{E}_{b,pl} = 2\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,pl} = 2\text{x}10^{-5}$. Протягом наступних 9-ти циклів до 10-го включно, в зонах стиску та розтягу зростання повних та залишкових деформацій на 10-му циклі становило $\mathcal{E}_{b,max} = 19\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,max} = 21\text{x}10^{-5}$, $\mathcal{E}_{b,pl} = 10\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,pl} = 9\text{x}10^{-5}$. На наступному 11-му руйнівному циклі, внаслідок підвищення навантаження вище рівня $\eta = 0{,}6$, спостерігалося зростання повних деформацій до: $\mathcal{E}_{b,max} = 26\text{x}10^{-5}$ та $\mathcal{E}_{s,max} = 61\text{x}10^{-5}$ (при $F = 10{,}83$ кН).

Випробування сталефіброзалізобетонних зразків. Дослідження проводилось на лотках: 2СФЗБп–1, 2СФЗБп–2 і 2СФЗБп–3 із відсотками армування сталевим каркасом $\mu = 1$ і сталевими анкерними фібрами $\mu = 1$, а $\mu_{заг} = 2$.

Під час дослідження 2СФЗБп–1…3 на протязі десяти циклів ступенями навантажувались до рівня $\eta_{cyc} = 0{,}6$ від руйнівного зусилля, а на одинадцятому циклі були доведені до руйнування. Розвантаження зразків на циклах виконувалося такими ж ступенями, як і при навантаженні.

Деформації сталефіброзалізобетону, які вимірювались в зразках 2СФЗБп–1…3 за допомогою тензометричного комплексу ВНП-8 подані на рис. 6.

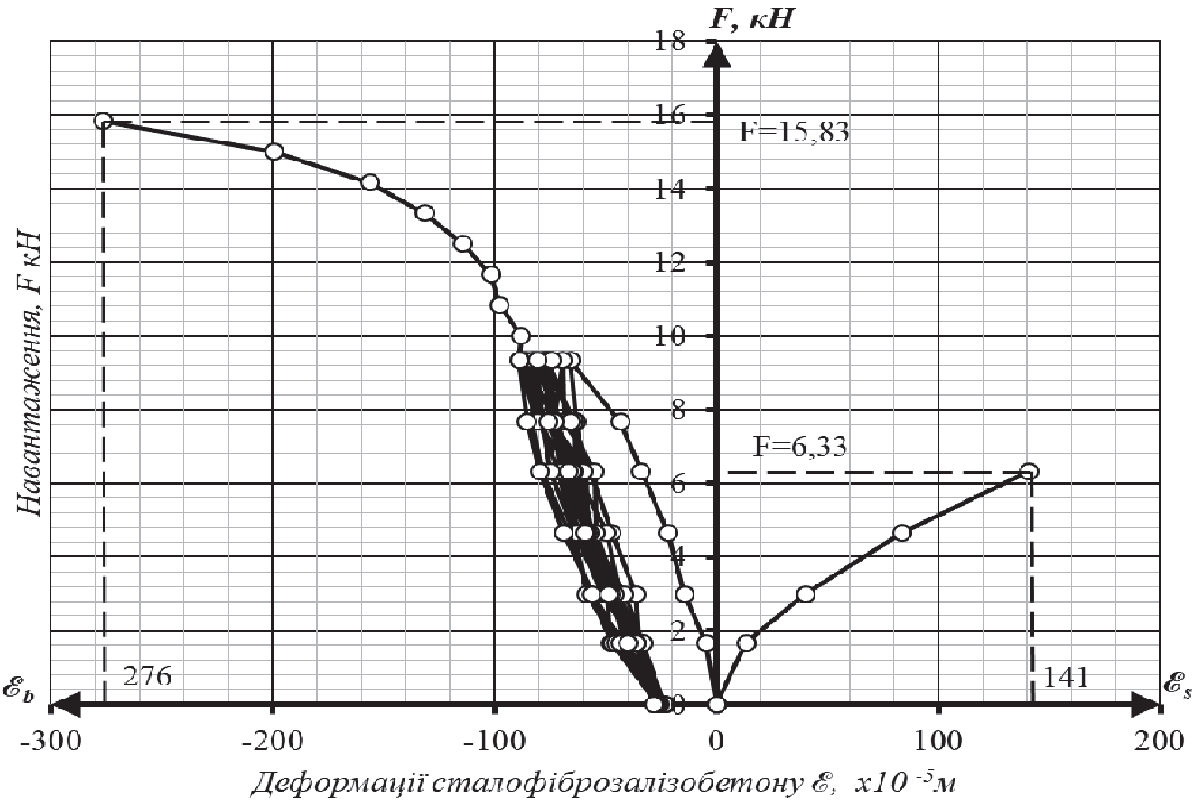

Рис. 6. Деформації стиснутої ($\mathcal{E}_b$) та розтягненої ($\mathcal{E}_s$) зони в зразках 2СФЗБп–1…3

Під час прикладання зусилля F = 6,33 кН в розтягнутій зоні елементів 2СФЗБП–1…3 почали розкриватися тріщини. Утворення тріщин призвело до виходу з ладу тензорезисторів, що були розміщені в даній зоні. Через це крива $F - \mathcal{E}$ в зоні розтягу закінчується при F = 6,33 кН.

На 1-му циклі навантаження, значення повних та залишкових деформацій залізобетону в зонах стиску становили: $\mathcal{E}_{b,max}$ = 65x10^{-5} та $\mathcal{E}_{b,pl}$ = 25x10^{-5}. Протягом наступних 9-ти циклів до 10-го включно, в зонах стиску відбувалося помірне зростання повних деформацій до $\mathcal{E}_{b,max}$ = 88x10^{-5}. Залишкові деформації практично не збільшувалися і на 10-му циклі становили $\mathcal{E}_{b,pl}$ = 28x10^{-5}. На наступному 11-му руйнівному циклі, внаслідок підвищення навантаження вище рівня η_{cyc} = 0,6, спостерігалося зростання повних деформацій до $\mathcal{E}_{b,max}$ = 276x10^{-5} (при F = 15,83 кН).

Висновки.

Встановлено, що в водовідвідних лотках із СФБ при однаковому рівні повторних навантажень виникають значно менші деформації порівняно із аналогічними елементами зі звичайного ЗБ чи комбінованоармованими елементами (СФЗБ), тому можна стверджувати про збільшення їх терміну експлуатації в порівнянні з типовими елементами.

При повторних навантаженнях в зразках 2СФБп протягом десятикратного завантаження деформації (при максимальному завантаженні 10-го циклу) становили $\mathcal{E}_{b,max}$ = 19x10^{-5} та $\mathcal{E}_{s,max}$ = 21x10^{-5} м, а в той час в типових залізобетонних елементах (2ЗБп) ці величини були (від 1-го до 10-го циклу)

більшими 5…6 разів $\mathcal{E}_{b,max}$ = 101x10^{-5} та $\mathcal{E}_{s,max}$= 131x10^{-5} м відповідно. В комбіновано армованих дослідних лотках (2СФЗБп) встановлені деформації $\mathcal{E}_{b,max}$ = 88x10^{-5} м були в 4…4,5 разів більшими ніж в СФБ лотках.

Тріщини в дослідних зразках 2ЗБп і 2СФЗБп були зафіксовані вже при завантаженні 1-ого циклу (η_{cyc} = 0,6), а в зразках із СФБ лише на 11-му (при довантаженні). У всіх зразках вони були зафіксовані тільки в зоні з максимальним згинальним моментом. У типових ЗБ елементах тріщини були практично прямолінійними, з чіткими берегами, а в зразках із СФБ та СФЗБ тріщини були з нечіткими контурами та вираженою плетінчастістю.

1. Бабич Є.М. Дослідження опору високоміцних бетонів та фібробетонів пробиванню / Є.М. Бабич, Д.В. Кочкарьов, С.В. Філіпчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2017. - Вип. 34. - С. 71-85.

2. Бабич Є.М. Використання сталефібробетону для дорожньо-транспортних споруд / Є.М. Бабич, О.В. Андрійчук, І.М. Ясюк // Містобудування та територіальне планування. Науково-технічний збірник. – К., КНУБА, 2014. Випуск № 54. – С.33– 41.

3. Бабич Є.М. Проектування та виготовлення безнапірних труб із сталефібробетону / Є.М. Бабич, О.В. Андрійчук // Рекомендації. – Луцьк: Луцький НТУ, 2012. – 32 с.

4. Борисюк О.П. Напружено-деформований стан залізобетонних балок підсилених під навантаженням сталефібробетоном 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.

5. Білозір В.В. Вплив низхідної вітки діаграми деформування сталефібробетону 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.

6. Опанасенко Е.В. Виды фибрового армирования / Е.В. Опанасенко, А.А. Берестянская // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2015. - Вип. 30. - С. 57-64.

7. Андрійчук О.В. Сталефібробетонні безнапірні труби / О.В. Андрійчук, Є.М. Бабич // Монографія. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. – 150 с.

8. 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.

9. Андрійчук О.В. Виготовлення придорожніх лотків водовідводу зі сталефібробетону / О.В. Андрійчук, І.М. Ясюк // Наукові нотатки: збірник наукових праць – Луцьк: Луцький НТУ, 2014. – Випуск 45. – С. 7 – 14.

10. Андрійчук О.В. Методика експериментального дослідження дисперсно-армованих придорожніх лотків водовідведення / О.В. Андрійчук, І.М. Ясюк // Вісник Одеської національної академії будівництва та архітектури: збірник наукових праць. – Одеса: ОНАБА. 2015. Випуск 58. – С. 11 – 18.

11. Андрійчук О.В. Дослідження міцнісних характеристик сталефібробетонних лотків водовідведення / О.В. Андрійчук, І.М. Ясюк// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: науковий збірник. Випуск 31 – Рівне, НУВГП, 2015. – С. 371-378.

1. Babych Ye.M. Doslidzhennia oporu vysokomitsnykh betoniv ta fibrobetoniv probyvanniu [Investigation of resistance of high durable concrete and fiber-reinforced concrete penetration] / Ye.M. Babych, D.V. Kochkarov, S.V. Filipchuk // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. - 2017. - Vyp. 34. - S. 71-85.

2. Babych Ye.M. Vykorystannia stalefibrobetonu dlia dorozhno-transportnykh sporud [Use steel fiber reinforced concrete for road constructions] / Ye.M. Babych, O.V. Andrijchuk, I.M. Yasiuk // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. – K., KNUBA, 2014. Vypusk № 54. – S. 33– 41.

3. Babych Ye.M. Proektuvannia ta vyhotovlennia beznapirnykh trub iz stalefibrobetonu [Design and manufacture of non-pressure pipes made of steel fiber reinforced concrete] / Ye.M. Babych, O.V. Andrijchuk // Rekomendatsii. – Lutsk: Lutskyj NTU, 2012. – 32 s.

4. Borysiuk O.P. Napruzheno-deformovanyj stan zalizobetonnykh balok pidsylenykh pid navantazhenniam stalefibrobetonom i kompozytamy pry dii malotsyklovykh navantazhen [REINFORCED CONCRETE BEAMS STRESS-STRAIN STRENGTHENED UNDER LOADING STEELFIBERCONCRETE AND COMPOSITES AT ACTION LOWCYCLE LOAD] // O.P. Borysiuk, Yu.Yu. Ziatiuk // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zb. nauk. prats. – Rivne: NUVHP, 2016. – Vyp. 33. – S. 298 – 303.

5. Bilozir V.V. Vplyv nyzkhidnoi vitky diahramy deformuvannia stalefibrobetonu za roztiahu na nesuchu zdatnist balok [Influence of descending branch of diagram of deformation of steel fibre concrete at tension on bearing strength of beams] / V.V. Bilozir // Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia: Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo. – Dubliany, LNAU, 2015. Vypusk № 16. – S. 60 – 64.

6. Opanasenko E.V. Vydy fybrovoho armyrovanyia [TYPES FIBER REINFORCEMENT] / E.V. Opanasenko, A.A. Berestianskaia // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. - 2015. - Vyp. 30. - S. 57-64.

7. Andrijchuk O.V. Stalefibrobetonni beznapirni truby [Steel fiber reinforced concrete non-pressure pipes] / O.V. Andrijchuk, Ye.M. Babych // Monohrafiia. – Lutsk: RVV Lutskoho NTU, 2012. – 150 s.

8. Andrijchuk O.V. Robota i rozrakhunok elementiv kiltsevoho pererizu pry dii povtornykh navantazhen [Work and calculation of elements of a ring section from steel fiber reinforced concrete at repeated loads]: Avtoref. dys… kand. tekhn. nauk: 05.03.21 / O.V. Andrijchuk – Lviv, 2011. – 24 s.

9. Andrijchuk O.V. Vyhotovlennia prydorozhnikh lotkiv vodovidvodu zi stalefibrobetonu [MAKING OF WAYSIDE TRAYS OF OVERFLOW-PIPE WITH STELL-FIBRE-CONCRETE] / O.V. Andrijchuk, I.M. Yasiuk // Naukovi notatky: zbirnyk naukovykh prats – Lutsk: Lutskyj NTU, 2014. – Vypusk 45. – S. 7 – 14.

10. Andrijchuk O.V. Metodyka eksperymentalnoho doslidzhennia dyspersno-armovanykh prydorozhnikh lotkiv vodovidvedennia [methodology of experimental research dis-persed-reinforced trays of roadside drainage] / O.V. Andrijchuk, I.M. Yasiuk // Visnyk Odeskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury: zbirnyk naukovykh prats. – Odesa: ONABA. 2015. Vypusk 58. – S. 11 – 18.

11. Andrijchuk O.V. Doslidzhennia mitsnisnykh kharakterystyk stalefibrobetonnykh lotkiv vodovidvedennia [STUDY DURABLE CHARACTERISTICS STEEL FIBER CONCRETE TRAYS SEWAGE SYSTEMS] / O.V. Andrijchuk, I.M. Yasiuk// Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: naukovyj zbirnyk. Vypusk 31 – Rivne, NUVHP, 2015. – S. 371-378.