

ТЕОРЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ПЕТ-ФІБРОБЕТОНУ НА РОЗТЯГ

THEORETICAL EVALUATION OF THE TENSILE STRENGTH OF PET FIBROCONCRETE

Шмиг Р.А., к. т. н., доцент, Білозір В.В, аспірант (Львівський національний університет природокористування) ORCID 0000-0003-1926-9520

Shmyh R., PhD, Associate Professor (Lviv National Environmental University), Bilozir V., PhD student (Lviv National Environmental University)

Виконано експериментальні дослідження зчеплення ПЕТ-фібри поперечним перерізом 3 x 0,2 мм з дрібнозернистим бетоном класів C20/25, C25/30 і C30/35 за довжин закладання фібри 10, 15 і 20 мм. За результатами експериментів з витягування ПЕТ-фібри з торців призм розмірами 100 x 50 x 50 мм визначено коефіцієнт, що враховує анкерування фібри η_f . Використання цього коефіцієнта у відповідних формулах дозволило спрогнозувати міцність ПЕТ-фібробетону на розтяг.

By calculating the bearing capacity of the elements of PET-fiber concrete structures, it is necessary to determine the tensile strength of this material. There are two cases of tensile failure of fiber concrete. In the first case, part of the fiber is torn, and part is pulled out, and in the second - the entire fiber is pulled out. If the required fiber anchoring length is less than half its length, then the first case of tensile failure of fiber concrete is realized, and if this condition is not fulfilled, then the second case is realized. The required length of anchoring l_{fb} depends on the coefficient that takes into account the anchoring of the fiber η_f , so its experimentally justified purpose is important, since it will affect the correctness of the calculation of both the tensile strength of PET- fiber concrete and the bearing capacity of elements made of this material. In this regard, experimental studies of the adhesion of PET fiber to fine-grained concrete were performed and recommendations were developed for calculating the tensile strength of PET-fiber concrete.

The research program involved the production and tensile testing of a PET- fiber with a cross-section of 3 x 0,2 mm, embedded in the end of a 100 x 50 x 50 mm prism with a length of 10, 15 and 20 mm. For each of the classes of concrete (C20/25, C25/30 and C30/35) and each fiber laying length, 6 twin samples were manufactured and tested. Thus, a total of 54 samples were tested.

According to the results of experiments on pulling PET- fiber from concrete prisms, a coefficient that takes into account the anchoring of the fiber η_f , which is equal to 1,25, was determined. Determination of the length of PET- fiber is substantiated, taking into

account the results of tensile tests. It is recommended to appoint a fiber with dimensions of 40 x 3 x 0,2 mm. It is proposed to calculate the tensile strength of PET- fiber concrete by analogy with steel fiber concrete. The corresponding formula can be used to preliminarily estimate the tensile strength of PET fiber concrete, and then refine it after testing PET- fiber concrete tensile samples. It is shown that the tensile strength of PET fiber concrete with a fiber reinforcement ratio of 0,02 is lower than the strength of concrete. Therefore, it is impractical to use PET- fiber concrete in stretched elements, unlike bent ones.

Ключові слова: ПЕТ-фібра, дрібнозернистий бетон, зчеплення, міцність, розтяг, розрахунок.

Key words: PET-fiber, fine-grained concrete, adhesion, strength, tension, calculation.

Постановка проблеми. Для розрахунку несучої здатності елементів ПЕТ-фібробетонних конструкцій необхідно, як і для сталевіфробетонних конструкцій, спочатку визначити міцність цього матеріалу на розтяг [1]. При цьому до уваги треба брати те, що можливими є два випадки руйнування фібробетону за розтягу [2]. У першому випадку частина фібр розривається, а частина висмикується, а в другому – вся фібра висмикується. Якщо необхідна довжина анкерування фібри менша за її пів довжини ($l_{fb} \leq l_f / 2$), то реалізується перший випадок руйнування фібробетону за розтягу, а якщо ця умова не виконується, то реалізується другий випадок. Необхідна довжина анкерування l_{fb} залежить від коефіцієнта, що враховує анкерування фібри η_f , тому його експериментально обґрунтоване призначення є важливим, оскільки це впливатиме на коректність розрахунку як міцності ПЕТ-фібробетону на розтяг, так і несучої здатності елементів з цього матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження зчеплення сталеві фібри з дрібнозернистим бетоном [3 – 6] свідчать, що на максимальні зусилля при витягуванні фібр діаметром d_f з дрібнозернистого бетону впливають довжина закладання фібри l_e , призмова міцність бетону $f_{c,prism}$ і коефіцієнт η_f . Врахування вказаних параметрів у розрахунках дозволило розвинути деформаційний метод розрахунку згинаних сталевіфробетонних елементів [7 – 10].

Зарубіжні дослідження ПЕТ-фібробетону [11 – 18] свідчать про те, що об'ємний вміст ПЕТ-фібри впливає на міцнісні властивості бетону, однак за низьких її витрат силовий ефект не спостерігається, тоді як завжди відмічається в'язкість руйнування згинаних і стиснутих елементів.

У працях [19 – 21] подано результати експериментально-теоретичних досліджень ПЕТ-фіробетону, де акцентується увага на необхідності обґрунтованого призначення геометричних розмірів ПЕТ-фібри і її вмісту в об'ємі фіробетону.

Постановка завдання. Наше завдання – виконати експериментальні дослідження зчеплення ПЕТ-фібри з дрібнозернистим бетоном та розробити рекомендації щодо розрахунку міцності ПЕТ-фіробетону на розтяг.

Виклад основного матеріалу. Для того, щоб реалізувався перший випадок руйнування сталевіробетону за розтягу [1], необхідне виконання умови:

$$l_{fb} \geq \frac{\eta_f d_f f_{fk}}{f_{ck}}, \quad (1)$$

де f_{fk} – характеристичне значення міцності фібри на розтяг;

f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск.

Для визначення коефіцієнта η_f були виготовлені у формі (Рис.1) призми 100 x 50 x 50 мм (Рис.2), у торці яких закладалася ПЕТ-фібра поперечним перерізом 3 x 0,2 мм на довжину 10, 15 і 20 мм.



Рис.1. Форма для виготовлення дослідних зразків-призм



Рис. 2. Дослідні зразки-призми 100 x 50 x 50 мм зі закладеною ПЕТ-фіброю у їх торці

Програмою досліджень передбачено виготовлення та випробування на витягування ПЕТ-фібри поперечним перерізом 3 x 0,2 мм, закладеної в торці призм 100 x 50 x 50 мм на довжину 10, 15 і 20 мм. Для кожного з класів бетону (С20/25, С25/30 і С30/35) і кожної довжини закладання фібри виготовлено і випробувано по 6 зразків-близнюків. Таким чином, всього випробувано 54 зразки.

Для виготовлення зразків використано цемент ПрАТ "Івано-Франківськцемент" марок М400 і М500 активністю 42,3 МПа і 53,1 МПа відповідно, пісок Ясинецького кар'єру з модулем крупності 2,1. Склади бетону подані в таблиці 1.

Таблиця 1

Клас бетону	Склади бетону дослідних зразків			
	Витрати матеріалів з розрахунку на 1 м ³ суміші			
	Цемент, кг	Марка цементу	Пісок, кг	Вода, л
С20/25	444,5	М400	1644,4	239,2
С25/30	442,6	М500	1604,5	243,4
С30/35	433,2	М500	1724,3	215,6

Суміш готували у бетонозмішувачі, після чого вкладали її у форму з попередньо закладеною фіброю в прорізи цієї форми. Одночасно з шістьма зразками кожної серії виготовляли по три куби 150 x 150 x 150 мм і по три

призми 100 x 100 x 400 мм. Після ущільнення суміші зразків на вібростолі їх зберігали протягом 28 діб за температури 18 – 20 градусів під шапрм вологих опилок.

Випробовували на витягування ПЕТ-фібру зі зразків на розривній машині Р – 0.5 за швидкості навантаження 0,05 мм/с (Рис 3).



Рис 3. Випробування на витягування ПЕТ-фібри з бетонної призми 100 x 50 x 50 мм

Випробування кубів і призм з дрібнозернистого бетону на стиск дозволили отримати такі середні показники міцності: для дрібнозернистого бетону класу C20/25 – $f_{cm,cube} = 28,79$ МПа , $f_{cm,prism} = 23,28$ МПа ; класу C25/30 – $f_{cm,cube} = 34,54$ МПа , $f_{cm,prism} = 27,29$ МПа ; класу C30/35 – $f_{cm,cube} = 39,11$ МПа , $f_{cm,prism} = 31,29$ МПа.

Результати випробувань на витягування фібр з бетонних призм подані в таблицях 2 – 4. При довжині закладання фібри 10 мм у призми з міцністю $f_{cm,prism} = 23,28$ МПа максимальні напруження при витягуванні дорівнювали 86,67 - 93,33 МПа (середнє значення – 90,00 МПа). При такій же довжині закладання фібри у бетон призм з міцністю

$f_{cm,prism} = 27,29$ МПа ці напруження дорівнювали 101,67 – 108,33 МПа (середнє значення – 106,39 МПа). При витягуванні ПЕТ-фібри за довжини закладання 10 мм у призми з міцністю $f_{cm,prism} = 31,29$ МПа максимальні напруження дорівнювали 121,67 – 126,67 МПа (середнє значення – 123,61 МПа).

При довжині закладання фібри 15 мм у призми з міцністю бетону $f_{cm,prism} = 23,28$ МПа максимальні напруження при витягуванні дорівнювали 135,00 - 140,00 МПа (середнє значення – 136,94 МПа).

За довжини закладання фібри 20 мм у призми з бетону класу С20/25 і довжин закладання 15 мм і 20 мм у призми з бетону класів С25/30 і С30/35 фібра найчастіше розривалася при напруженнях 160,00 – 163,33 МПа, що добре кореспондується з експериментальними даними, відображеними у працях [17, 18]. Лише з двох призм із бетону класу С20/25 за довжини закладання 20 мм фібра витягнулася, а не розірвалася при напруженнях 158,33 і 160,00 МПа відповідно.

Еквівалентний діаметр фібри прямокутного перерізу $d_f = 2,038$ мм

у формулі (1) визначали з рівності периметрів круглого стрижня і прямокутного перерізу ПЕТ-фібри:

$$\pi d_f = 2(b_f + \delta_f), \quad (2)$$

де b_f – ширина поперечного перерізу фібри (3 мм);

δ_f – товщина фібри, що дорівнює в середньому 0,2 мм.

За результатами, поданими в таблицях 2 – 4, побудували графік в осях “ $\frac{l_e}{d} - \frac{\sigma_f}{f_{c,prism}}$ ” (Рис. 4). Це дозволило визначити коефіцієнт що враховує

анкерування фібри η_f , який для даної ПЕТ-фібри дорівнює 1,25.

Таблиця 2
 Результати випробувань на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм
 (клас бетону C20/25)

Призмova міцність зразків $f_{cm,prism}$	Довжина закладання фібри у бетон l_e , мм	Площа поперечного перерізу фібри A_f , мм ²	Витягуюче зусилля N , Н	Максимальне напруження у фібри при витягуванні чи розриві σ_f , МПа
23,28	10	0,6	55	91,67
			54	90,00
			54	90,00
			53	88,33
			52	86,67
			56	93,33
	15		82	136,67
			83	138,33
			81	135,00
			84	140,00
			81	135,00
			82	136,67
	20		95	158,33
			96	160,00
			97	161,67
			97	161,67
			96	160,00
			98	163,33

Таким чином, використавши значення цього коефіцієнта можна визначити необхідну довжину анкерування фібри l_{fb} для кожного з прийнятих класів бетону і призначити оптимальну довжину фібри l_f такою, що в чотири рази більша за l_{fb} , оскільки середня довжина закладання фібри у фронті тріщини дорівнює чверті її довжини, Результати розрахунків l_{fb} і l_f подані в таблиці 5. Характеристичне значення міцності ПЕТ-фібри прийняте 80 МПа і обґрунтоване у праці [19].

Таблиця 3
 Результати випробувань на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм
 (клас бетону С25/30)

Призмova міцність зразків $f_{cm,prism}$	Довжина закладання фібри у бетон l_e , мм	Площа поперечного перерізу фібри A_f , мм ²	Витягуюче зусилля N , Н	Максимальне напруження у фібри при витягуванні чи розриві σ_f , МПа
27,29	10	0,6	64	106,67
			66	110,00
			65	108,33
			61	101,67
			63	105,00
			64	106,67
	15		96	160,00
			95	158,33
			97	161,67
			98	163,33
			95	158,33
			96	160,00
	20		97	161,67
			96	160,00
			98	163,33
			97	161,67
			97	161,67
			95	158,33

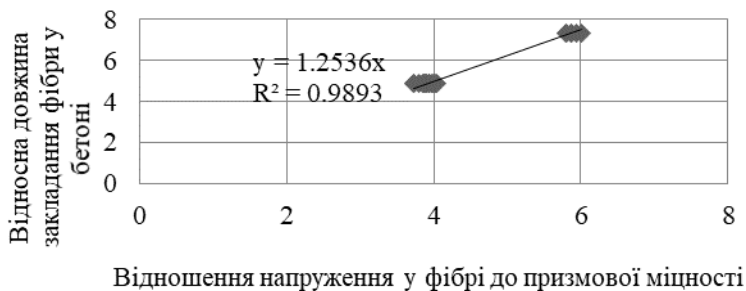


Рис. 4. До визначення коефіцієнта, що враховує анкерування фібри η_f

Таблиця 4
Результати випробувань на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм
(клас бетону С30/35)

Призмova міцність зразків $f_{cm,prism}$	Довжина закладання фібри у бетон l_e , мм	Площа поперечного перерізу фібри A_f , мм ²	Витягуюче зусилля N , Н	Максимальне напруження у фібри при витягуванні чи розриві σ_f , МПа
31,29	10	0,6	74	123,33
			73	121,67
			73	121,67
			74	123,33
			76	126,67
			75	125,00
	15		97	161,67
			98	163,33
			95	158,33
			96	160,00
			96	160,00
			95	158,33
	20		96	160,00
			97	161,67
			96	160,00
			98	163,33
			97	161,67
			95	158,33

Таблиця 5
Результати розрахунку теоретичної оптимальної довжини фібри

f_{ck} , МПа	f_{fk} , МПа	δ_f , мм	η_f	l_{fb} , мм	l_f , мм
20	80	2,038	1,25	10,19	40,76
25				8,15	32,61
30				6,79	27,17

Доцільним було б призначення довжини фібри, однакової для розглядуваних класів бетону. Тому пропонується приймати розміри фібри: 40 x 3 x 0,2 мм.

Міцність фібробетону на розтяг можна визначити за аналогічною формулою норм проектування сталевібробетонних конструкцій [1], в яку можуть бути внесені уточнення після випробувань центрально розтягнутих ПЕТ-фібробетонних елементів:

$$f_{fct} = k_{or}^2 \left(1 - \frac{l_{fb}}{l_f} \right) \rho_{fv} f_{fk}, \quad (3)$$

де k_{or} – коефіцієнт, що враховує орієнтацію фібр в об'ємі елемента залежно від співвідношення розмірів перерізу елемента і довжини фібри [1];

ρ_{fv} – коефіцієнт фібрового армування за об'ємом.

Результати розрахунку міцності на розтяг ПЕТ-фібробетону при коефіцієнті фібрового армування за об'ємом 0,02 і коефіцієнті орієнтації фібр 0,72 подані в таблиці 6.

Таблиця 6
Теоретичне оцінювання міцності ПЕТ-фібробетону на розтяг

f_{ck} , МПа	l_{fb} , мм	l_f , мм	ρ_{fv}	f_{fk} , МПа	k_{or}	f_{fct} , МПа
20	10,19	40	0,02	80	0,72	0,62
25	8,15					0,66
30	6,79					0,69

Результати, подані в таблиці 6, свідчать, що міцність ПЕТ-фібробетону на розтяг є суттєво меншою за міцність бетону на розтяг відповідних класів. Тому у розтягнутих елементах ПЕТ-фібробетон використовувати недоцільно навіть за великих витрат фібри. Слід зауважити, що результати наших експериментально-теоретичних досліджень [19 – 21] свідчать, що ПЕТ-фіброве армування є доцільним у

згинаних елементах, міцність на згин яких суттєво більша за згинальну міцність бетонних елементів.

Висновки

1. За результатами експериментів на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм визначено коефіцієнт, що враховує анкеровання фібри η_f , який дорівнює 1,25.

2. Обґрунтовано призначення довжини ПЕТ-фібри з урахуванням результатів випробувань на витягування.

3. Запропоновано міцність на розтяг ПЕТ-фібробетону обчислювати за аналогією зі сталевібробетоном і уточнити відповідну формулу після випробувань ПЕТ-фібробетонних розтягнутих зразків.

4. Показано, що міцність на розтяг ПЕТ-фібробетону при коефіцієнті фібрового армування за об'ємом 0,02 є меншою за міцність бетону. Тому в розтягнутих елементах, на відміну від згинаних, ПЕТ-фібробетон використовувати недоцільно.

References

1. DSTU-N B V.2.6-218:2016 Guidelines for the design and manufacture of structures from dispersed reinforced concrete. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2017. 32 p. [Effective from 2017.04.01].

2. Rabinovich F.N. Dispersion-reinforced concretes. Moscow: Stroyizdat, 1989. 174 p.

3. Bilozir V.V. Formation and opening of cracks in normal sections of bent steel-fiber-concrete elements on a fiber from a sheet: diss ... cand. tech. Sciences. Moscow, 1991. 164 p.

4. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.

5. Bilozir V., Vysochenko A. Determination of the required length of fiber anchoring in concrete. Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction. 2013. № 14. P. 64-70.

6. Kinash R., Bilozir V., Bidenko I. Theoretical evaluation of tensile strength of concrete reinforced with steel fiber with bent ends. Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction. 2021. № 22. P. 17-22.

7. Bilozir V. V. Deformation method of calculation of flexural steel-reinforced concrete elements. Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Ser. Theory and practice of construction. 2012. № 742. P. 18-24. 8. Kinash R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne* (Technical Transactions: Architecture), 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.

9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspsensibility of Steel Fibre Reinforce d Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Ochi T., Okubo S., Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*. 2007. № 29. P. 448-455.
12. Won J. P., Jang C. I., Lee S. W., [et all] Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*. 2009. № 24. P. 660 – 665.
13. Kim S. B., Yi N. H., Kim H. Y., Kim J.H.J., Song Y.Ch. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2010. № 32. P. 232 – 240.
14. Kim J., Park C., Lee S. Effects of the geometry of recycled PET fibre reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites*. 2008. № 39. P. 442-450.
15. Pacheco-Torgal F., Ding Y., Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*. 2012. № 30. P. 714 – 724.
16. Zhi Ge, Renjuan Sun, Kun Zhang, Zhili Gao, Pengcheng Li. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*. 2013. № 44. P. 81 – 86.
17. Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*. 2011. № 25. P. 1906 – 1915.
18. Foti D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 96. P. 396 – 404.
19. Bilozir V., Bilozir V. Justification of the parameters of fiber reinforcement from used polyethylene terephthalate. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction*. 2016. № 17. P. 66-71.
20. Shmyh R., Bilozir V., Vysochenko A., Bilozir V. Carrying capacity of bending concrete elements reinforced by fibro and stripes taken from used polyethylene terephthalate bottles. *International Scientific and Practical Conference World science*, 2018. № 2 (30). Vol. 1. pp. 88 – 93.
21. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041

Список використаної літератури

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32 с. [Чинний з 2017.04.01].
2. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1989. 174 с.
3. Билозир В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа: дис... канд. техн. наук. Москва, 1991. 164 с.
4. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.
5. Білозір В., Височенко А. Визначення необхідної довжини анкерування фібри в бетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2013. № 14. С. 64 – 70.
6. Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Теоретичне оцінювання міцності на розтяг бетону, армованого сталеву фібрую зі загнутими кінцями. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2021. № 22. С. 17 – 22.
7. Білозір В. В. Деформаційний метод розрахунку згинальних сталефибробетонних елементів. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Сер. Теорія і практика будівництва*. 2012. № 742. С. 18 – 24.
8. Kinash R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne (Technical Transactions: Architecture)*, 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.
9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspensibility of Steel Fibre Reinforce d Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Ochi T., Okubo S., Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*. 2007. № 29. P. 448-455.
12. Won J. P., Jang C. I., Lee S. W., [et all] Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*. 2009. № 24. P. 660 – 665.
13. Kim S. B., Yi N. H., Kim H. Y., Kim J.H.J., Song Y.Ch. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2010. № 32. P. 232 – 240.

14. Kim J., Park C., Lee S. Effects of the geometry of recycled PET fibre reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites*. 2008. № 39. P. 442–450.
15. Pacheco-Torgal F., Ding Y., Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*. 2012. № 30. P. 714 – 724.
16. Zhi Ge, Renjuan Sun, Kun Zhang, Zhili Gao, Pengcheng Li. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*. 2013. № 44. P. 81 – 86.
17. Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*. 2011. № 25. P. 1906 – 1915.
18. Foti D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 96. P. 396 – 404.
19. Білозір В., Білозір В. Обґрунтування параметрів фібрового армування з використаного поліетилентерефталату. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2016. № 17. С. 66 – 71.
20. Shmyh R., Bilozir V., Vysochenko A., Bilozir V. Carrying capacity of bending concrete elements reinforced by fibro and stripes taken from used polyethylene terephthalate bottles. *International Scientific and Practical Conference World science*, 2018. № 2 (30). Vol. 1. pp. 88 – 93.
21. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041.