

УДК 624. 012

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФІБРОВОГО АРМУВАННЯ З ВИКОРИСТАНОГО ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ**

*В. Білозір, к.т.н., В. Білозір  
Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** Відомо, що поліетилентерефталат (ПЕТ) є сировиною для виготовлення пляшок для газованих напоїв, мінеральної води, пива, соків, майонезу, олії, побутової хімії, косметики, плівок тощо. До України щомісяця ввозять понад 10 тисяч т ПЕТ-грануляту, який здебільшого використовують для виготовлення пляшок, що згодом, після їх використання, потребує утилізації. Шість українських підприємств з переробки ПЕТ-відходів на гранулят і пакувальну стрічку наразі спроможні переробити лише 1 тисячу т щомісяця [1].

Будівництво може стати перспективною галуззю, в якій доцільно використовувати сировину з ПЕТ-пляшок. В Україні дослідження фібрової арматури з використаних ПЕТ-пляшок, несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості фібробетонних елементів на фібрі з використаних ПЕТ-пляшок до нас не проводили.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання технології виготовлення фібробетонної суміші з ПЕТ-фіброю завдовжки 20 мм вивчали японські дослідники [2]. Відзначено, що така фібра за вмісту 3% від об'єму суміші легко перемішується. Цю фібру використовували для виготовлення тротуарних плиток і шахтних конструкцій.

Як свідчать результати досліджень, фібробетон на ПЕТ-фібрі має тривалу міцність на стиск і розтяг за багаторазового заморожування-відтавання, за дії різноманітних хімічних середовищ не нижчу, ніж звичайний бетон [3].

Цікаво, що міцність на стиск і модуль пружності фібробетону на ПЕТ-фібрі зменшувалися зі збільшенням відсотка армування фібробетону за об'ємом [4]. У дослідженні відзначено позитивний вплив фібри на тріщиностійкість згинальних елементів, зменшення ширини розкриття усадкових тріщин, в'язкий характер руйнування. Про незначне зниження міцності на стиск фібробетону на ПЕТ-фібрі розмірами 50 x 1,2 x 0,3 мм за об'ємного відсотка армування 1,5% зазначено у працях [5; 6]. Подібний ефект спостерігався за армування дрібнозернистого бетону ПЕТ-пластівцями [7].

Механічні властивості фібробетону на фібрі з ПЕТ-пляшок системно вивчала Дора Фоті [8; 9]. Призми 400 x 100 x 100 мм, армовані ПЕТ-фіброю розмірами 32 x 2 x 0,1 мм і кільцями діаметром 30-50 мм та шириною

приблизно 5 мм, випробовували за схемою триточкового згину за прогону 350 мм. Відсоток армування за масою становив 0,5 і 0,75 (за об'ємом – 0,78 та 1,16 відповідно). Виявилося, що міцність на згин таких призм не завжди перевищувала міцність бетонних призм [8].

Отже, дослідники досі не вивчали питання, пов'язані з призначенням оптимальних розмірів ПЕТ-фібри, мінімального відсотка фібрового армування за об'ємом.

**Постановка завдання.** Завдання нашого дослідження – на основі сучасних уявлень про роботу фібр у фронті нормальних тріщин, даних про міцність і деформативність ПЕТ-фібри розробити пропозиції щодо призначення її геометричних розмірів, оцінити теоретично згинальну міцність фібробетону.

**Виклад основного матеріалу.** У праці [9] отримані експериментальні дані щодо деформативності й міцності кілець, вирізаних із використаних ПЕТ-пляшок (див. рис.).

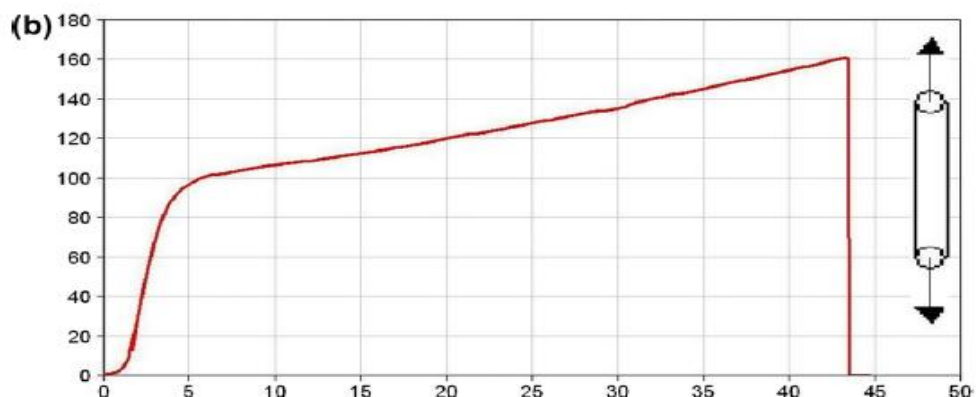


Рис. Випробування кільця з використаної ПЕТ пляшки на розтягування (a) і діаграма “напруження (МПа) – деформація (мм)” (b) [9].

Середнє значення модуля пружності –  $E_{PET} = 3100$  МПа, тимчасовий опір  $f_{PET,u} = 160$  МПа. Із рисунка бачимо, що до рівня напружень 80 МПа ПЕТ працює практично пружно. Такому рівню напружень, згідно зі законом Гука, відповідатимуть відносні деформації 0,0258. Потрібно зауважити, що ці деформації приблизно такі самі, як і граничні для арматурної сталі, встановлені європейськими нормами [10]. Максимальні деформації, які відповідають тимчасовому опору ПЕТ (див. рис.), є дуже значними, тому у згинальних елементах досягнуті не будуть. Отже, як розрахункову для ПЕТ-фібри можна прийняти дволінійну діаграму деформування (діаграму Прандтля) з горизонтальною лінією, яка починається з точки, для якої напруженням  $f_{PET,k} = 80$  МПа відповідають відносні деформації  $\varepsilon_{PET} = 0,0026$ .

Для залізобетонних стрижнів, які висмикували з бетону, відома залежність [11]:

$$\frac{l_{an}}{d} = \frac{\eta f_{yk}}{f_{ck}}, \quad (1)$$

де  $l_{an}$  – необхідна довжина зароблення стрижня в бетон;  $d$  – діаметр стрижня;  $\eta$  – коефіцієнт, який враховує зчеплення стрижня з бетоном і дорівнює 1,2 для гладкої арматури;  $f_{yk}$  – характеристичне значення міцності арматури;  $f_{ck}$  – те саме, бетону.

Еквівалентний діаметр фібри прямокутного перерізу визначимо з рівності периметрів круглого стрижня і прямокутної ПЕТ-фібри:

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

де  $b_f$  – ширина фібри;  $\delta_f$  – товщина фібри, що дорівнює в середньому 0,2 мм.

Використавши рівняння (1) і (2), знаходили таку довжину фібри, яка би заанкерювалася на чверті її довжини для різних класів бетону за міцності фібри  $f_{PET,c} = 80$  МПа (див. табл.). У формулу (1) замість  $f_{yk}$  підставляли  $f_{PET,c}$ . Чверть довжини фібри є середнім значенням довжини зароблення фібри, яка потрапляє у фронт критичної тріщини.

Відомо, що необхідна довжина заанкерювання є дещо більшою за теоретичну. Наприклад, проф. В.І. Мурашов свого часу пропонував цю довжину для стрижневої сталеві арматури збільшувати на  $5d$ , оскільки стрижень включається в роботу не одразу. Тому можна запропонувати, наприклад, за класу бетону С20/25 і ширини фібри 2 мм довжину 35 мм.

Мінімальний відсоток фібрового армування пропонується призначити з умови рівномірності бетонного і фібробетонного згинальних елементів.

За трикутної розрахункової епюри напружень у стиснутій зоні та прямокутної – в розтягнутій несуча здатність згинального елемента може бути розрахована за відомою формулою:

$$M_u = 1,75 f_{ct} \frac{bh^2}{6}, \quad (3)$$

де  $f_{ct}$  – міцність бетону на розтяг;  $b, h$  – ширина й висота поперечного перерізу елемента.

Таблиця

Результати розрахунку теоретичної оптимальної довжини фібри

$f_{ck}$ , МПа	$b_f$ , мм	$\delta_f$ , мм	$f_{PET,k}$ , МПа	$l_{an}$ , мм	$l_f$ , мм
20	1	0,2	80	3,821656	15,28662
	2			6,878981	27,51592
	3			9,936306	39,74522
25	1			3,057325	12,2293
	2			5,503185	22,01274
	3			7,949045	31,79618
30	1			2,547771	10,19108
	2			4,585987	18,34395
	3			6,624204	26,49682

Несучу здатність згинальних фібробетонних елементів за прямокутних епюр у розтягнутій і стиснутій зонах можна розрахувати за формулою [12]:

$$M_u = \frac{f_c \cdot f_{fct} \cdot b \cdot h^2}{f_c + f_{fct} \cdot 2}, \quad (4)$$

де  $f_c$  – призмова міцність бетону на стиск;  $f_{fct}$  – міцність фібробетону на розтягування.

Міцність фібробетону на розтягування можна визначити за аналогічною формулою норм проектування сталеві фібробетонних конструкцій [12]:

$$f_{fct} = k_{or}^2 \left( 1 - \frac{l_{an}}{l_f} \right) \mu_{fv} f_{PET,k}, \quad (5)$$

де  $k_{or}$  – коефіцієнт, що враховує орієнтацію фібр в об’ємі елемента залежно від співвідношення розмірів перерізу елемента і довжини фібри [12];  $\mu_{fv}$  – коефіцієнт фібрового армування за об’ємом.

Прирівнявши праві частини формул (3) і (4) та використавши рівняння (1), (2) і (5), можна знайти мінімальний коефіцієнт армування за об’ємом. Розрахунки засвідчили, наприклад, що за класу бетону C20/25, армованого ПЕТ фіброю розмірами 35 x 2 x 0,2 мм, бетонний і фіробетонний зразки матимуть однакову міцність, коли  $\mu_{fv} = 0,022$  (2,2%).

#### **Висновки**

1. Теоретично обґрунтоване питання призначення геометричних розмірів ПЕТ-фібри. Уточнення в запропонований аналітичний апарат можна внести після експериментальних досліджень зчеплення ПЕТ-фібри з бетоном і уточнення коефіцієнта  $\eta$ .

2. Потрібно додатково експериментально дослідити вплив відсотка фібрового армування на згинальну міцність ПЕТ-фіробетону, що дасть змогу обґрунтувати призначення мінімального відсотка армування за об’ємом і ввести необхідні уточнення у формули (4) і (5).

#### **Бібліографічний список**

1. Способи утилізації ПЕТ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.galpet.com.ua>.
2. Ochi T. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber / T. Ochi, S. Okubo, K. Fukui // Cement and Concrete Composites. – 2007. – № 29. – P. 448-455.
3. Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites / J. P. Won, C. I. Jang, S. W. Lee [et all] // Construction and Building Materials. – 2009. – № 24. – P. 660 – 665.
4. Material and structural performance evaluation of recclcd PET fiber reinforced concrete / S. B. Kim, N. H. Yi, H. Y. Kim [et all] // Cement and Concrete Composites. – 2010. – № 32. – P. 232 – 240.
5. Effects of the geometry of recycled PET fibre reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites / J. Kim, C. Park, S. Lee [et all] // Composites. – 2008. – № 39. – P. 442–450.
6. Pacheco-Torgal F. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview / F. Pacheco-Torgal, Yining Ding, Said Jalali // Construction and Building Materials. – 2012. – № 30. – P. 714 – 724.
7. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles / Zhi Ge, Renjuan Sun, Kun Zhang [et all] // Construction and Building Materials. – 2013. – № 44. – P. 81–86.
8. Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers / D. Foti // Construction and Building Materials. – 2011. – № 25. – P. 1906 – 1915.

9. Foti D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete / D. Foti // Construction and Building Materials. – 2013. – № 96. – P. 396 – 404.
10. Eurocode 2: Design of concrete structures EN 1992- 1-1: General rules and rules for buildings. – Brussels : CEN, 2004. –226 p.
11. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / под ред. А. А. Гвоздева. – М. : Стройиздат, 1978. – 207 с.
12. Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування та виготовлення сталевібробетонних конструкцій : ДСТУ-Н Б В.2.6-78: 2009. – Введ. в дію 01.01.2010. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с.

**Білозір В., Білозір В. Обґрунтування параметрів фібрового армування з використаного поліетилентерефталату**

Теоретично обґрунтовані оптимальні геометричні розміри фібри з використаних ПЕТ-пляшок. Розроблені пропозиції щодо призначення мінімального відсотка фібрового армування за об'ємом.

**Ключові слова:** поліетилентерефталат, ПЕТ-пляшки, рециклінг, ПЕТ-фібра, фібробетон.

**Bilozir V., Bilozir V. Reasoning of parameters of reinforcement fiber from used polyethylene terephthalate**

Theoretically reasoned optimal geometric dimensions of fiber from used PET bottles. Have been developed propositions for setting of a minimum percentage of fiber reinforcement in volume.

**Key words:** polyethylene terephthalate, PET-bottles recycling, PET-fiber, fiber-reinforced concrete.

**Билозир В., Билозир В. Обоснование параметров фибрового армирования с использованного полиэтиленерефталата**

Теоретически обоснованы оптимальные геометрические размеры фибры с использованных ПЭТ-бутылок. Разработаны предложения относительно назначения минимального процента фибрового армирования по объёму.

**Ключевые слова:** полиэтиленерефталат, ПЭТ-бутылки, рециклінг, ПЭТ-фібра, фибробетон.