

МІЦНІСТЬ ШПОНКОВИХ СТИКІВ ІЗ ФІБРОБЕТОНУ НА ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ ВОЛОКНАХ

Довженко О. к.т.н., доц., Юрко І.А. асистент

*Полтавський національний технічний університет імені
Юрія Кондратюка, Україна*

Актуальність теми. Фібробетон є перспективним конструкційним матеріалом для багатопільового застосування у будівництві (в тому числі й у стикових з'єднаннях). Синтетичні (поліпропіленові) волокна як армуючі добавки характеризуються високою міцністю на розтяг, незначною масою та хімічною нейтральністю по відношенню до цементу.

Нормативних документів щодо застосування, розрахунків і виробництва конструкцій із фібробетонів в Україні немає, однак у розвиток нового ДБН В.2.6-98:2009 передбачається розроблення норм «Дисперно-армовані залізобетонні конструкції».

Ураховуючи вищевикладене, можна вважати, що вдосконалення шпонкових стиків бетонних і залізобетонних елементів шляхом застосування фібробетону на синтетичних волокнах є актуальною задачею.

Метою роботи є дослідження шпонкових стиків бетонних і залізобетонних елементів шляхом застосування фібробетону на поліпропіленових волокнах.

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок про доцільність застосування фібробетону в стикових з'єднаннях для поліпшення їх міцнісних і деформативних властивостей.

У роботах Г.І. Ашкіндзе, П.М. Бобришева, В.О. Бондарева, І.Л. Герасимової, Е. Горачека, О.О. Довженко, В.С. Єськова, Л.В. Карабаша, В.Г. Кваші, П.М. Коваля, В.І. Коноводченка, М.М. Коровіна, В.І. Лишака, Н.Г. Мартинової, Л.С. Махвіладзе, В.П. Митрофанова, В.В. Погрібного, С.В. Полякова, М. Поммере, Д. Пуме, В.Н. Рожка, І.О. Рохліна, Б.С. Соколова, О.В. Черкашина, О.В. Яшина, D.L. Araujo, S.C. Chakrabarti, J. Cristofferson, S.H. Megally, S.H. Rizkalla, W. Qi, T. Norimono, Y. Naotaka, E. Makitani, A. Muzikami, R.L. Serette й інших детально розглянуті характер руйнування шпонкових стиків і фактори, котрі впливають на їх міцність: вид і клас бетону; геометричні розміри й їх співвідношення; кут нахилу опорних повер-

хонь; форма робочого перерізу; армування (обтиснення); умови на опорних поверхнях; ширина шва; кількість шпонок.

Існуючі методи розрахунку шпонкових з'єднань можна умовно розподілити на: нормативні, авторські (В.С. Єськов, В.І. Коноводченко, М.М. Коровін О.Г. Лотоєва, Б.С. Соколов, М.Р. Nielsen та інші), методи із застосуванням теорії пластичності. З нашої точки зору, останні є найбільш перспективними для застосування.

Викладення основного матеріалу. У межах експериментального дослідження стикових з'єднань було виготовлено три серії зразків загальною кількістю 15 штук (табл. 1).

Перша серія являла собою трьохшпонкові стики з трапецієподібною формою шпонкового профілю та $l_k / h_k = 0,25$ (l_k , h_k – глибина і висота шпонки). Вивчався вплив ширини шва $t_j = 25-300$ мм, відсотка армування $\rho_w = 0,64-1,49$ % й особливостей розміщення арматури за висотою шпонки на міцність зразків. Оскільки в нормативних документах у розрахунках рекомендується обмежувати кількість шпонок 3-ма шт, то для експерименту обрано саме трьохшпонкові стики.

У межах другої серії на одношпонкових стиках з прямокутними шпонками досліджувався вплив ширини стику $t_j = 50-200$ мм на характер його руйнування та граничне навантаження при зміненому, порівняно із зразками першої серії, параметрі $l_k / h_k = 0,5$, що зменшувало опір шпонки зрізу. Відсоток армування для всіх з'єднань практично не змінювався та становив $\rho_w = 0,67-0,69$ %.

На зразках третьої серії з трапецієподібними шпонками вивчався вплив $\rho_w = 0,9-1,5$ % та характеру розміщення поперечної арматури за висотою шпонки на міцність контактних швів. Висота шпонок усіх серій становила $h_k = 100$ мм, ширина $b_k = 150$ мм.

Виготовлення стиків здійснювалося у два етапи з бетону двох різних класів і видів. Спершу бетонувалися бокові частини зразків важким бетоном більш високого класу (рис. 1, а, е) з метою запобігання їх руйнуванню під час випробувань. Для бетонування центральної частини (шва) застосовувався дрібнозернистий бетон, дисперсно-армований поліпропіленовими волокнами діаметром 4 мкм і довжиною 12 мм, для котрого попередньо було зроблено підбір складу [1]: портландцемент ПЦ П/Б-Ш-400 – 490 кг/м³; полтавський річковий пісок – 1470 кг/м³; В/Ц – 0,7; поліпропіленове волокно – 10 кг (1% від об'єму суміші), пластифікуюча добавка BEVRTOL-SPL – 3,9 л (0,8% за

масою цементу). Зчеплення між боковими та центральною частинами зразка усувалося шляхом змащення спеціальним мастилом.

Моментом руйнування експериментального зразка вважався зріз за нормальним («за шпонкою») або похилим («за швом») перерізом.

Трьохшпонкові стики з шириною шва 100 та 150 мм руйнувалися шляхом зрізу в області двох сусідніх шпонок із утворенням похилої тріщини в межах третьої або зрізу за вертикаллю двох крайніх (найбільш навантажених) шпонок та шва за похилим перерізом у середині стиків (рис. 2, II випадок).

При такій же ширині t_j реалізовувалася схема, коли зрізалася одна шпонка та утворювалася похила тріщина в межах 2-х інших (рис. 2, III випадок).

Руйнування стиків з шириною шва 300 мм відбулося шляхом діагонального зсуву за швом (рис. 2, IV випадок).

Як видно, ширина стиків визначає картину руйнування й, як наслідок, суттєво впливає на граничне навантаження, котре зменшується зі збільшенням t_j . При зміні t_j з 25 мм до 300 мм, за всіх інших однакових параметрів, міцність стиків зменшувалася на 18 %. Крім того, шпонкові з'єднання з рознесеною за висотою шпонки арматурою сприймали навантаження більші до 10 %, ніж аналогічні зразки з її розташуванням по середині висоти шпонки (табл. 1).

У ході випробувань другої серії виявлено три випадки руйнування одношпонкових стиків [2]: при $t_j = 25$ мм – зріз шпонки за вертикальним перерізом (рис. 1, в); при $t_j = 100$ мм – зсув за похилою площиною у межах висоти шпонки (рис. 1, г); при $t_j = 200$ мм – утворення похилої тріщини в межах усього стиків (рис. 1, д). Як і для трьохшпонкових зразків, збільшення ширини шва призводить до суттєвого зменшення граничного навантаження.

Руйнування всіх зразків третьої серії відбувалося за перерізом, який розміщений поблизу площини зрізу [3]. Міцність стиків збільшувалася при рознесенні арматури за висотою шпонки та зростанні ρ_w .

Під час випробування фібробетонних стиків спостерігалися деякі особливості: руйнування відбувалося не крихко, тріщини утворювалися на більш пізніх стадіях порівняно з аналогічними стиками, виготовленими з керамзитобетону [4]. Це пояснюється підвищенням значення опору фібробетону на розтяг f_{ct} (до 20 %), що зумовило збільшення максимальних деформацій розтягу до 70×10^{-5} .

Для розрахунку міцності шпонкових з'єднань використовувався варіаційний метод у теорії пластичності бетону, розроблений на кафедрі ЗБ і КК та ОМ ПолтНТУ [5].

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень стикових з'єднань

№ п/п	Зразок	$f_{c,повн}$ МПа	$f_{c,}$ МПа	$\chi = f_{ct}/f_c$	$\gamma = l_0/h_0$	$A_{c,sh}$ мм ²	l_0 , мм	$f_{повн}$ МПа	A_{sc} мм ²	$\rho_s = \frac{A_{sc}}{A_{c,sh}}$ 100, %	V_{sc} кН	$f_{sh}^{exp} = \frac{V_{sc}}{A_{c,sh}}$ МПа	$\frac{f_{sh}^{exp}}{f_c}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Трьохшпонкові стики трапецієподібного профілю													
1	1ШФ-6-100(4)*	9,7	1,36	0,14	0,25	45000	100	240	339	0,75	153	3,40	0,35
2	1ШФ-6-150(4)*					48900	150			0,69	142	2,91	0,30
3	1ШФ-8-100(2)					45750	100			0,66	146	3,20	0,33
4	1ШФ-8-150(2)					47250	150		0,64	133	2,81	0,29	
5	1ШФ-12-25(2)					45660	25		1,48	199	4,37	0,45	
6	1ШФ-12-150(2)					45300	150		1,49	176	3,88	0,40	
7	1ШФ-12-300(2)					45360	300		1,49	163	3,59	0,37	
Одношпонкові стики з прямокутним профілем													
1	2ШФ-8-25	12,0	1,48	0,12	0,5	14650	25	260	101	0,69	53	3,62	0,30
2	2ШФ-8-100					15000	100			0,67	47	3,13	0,261
3	2ШФ-8-200					15000	200			0,67	38	2,53	0,210
Одношпонкові стики з трапецієподібними шпонками													
1	3ШФ-Б	14,0	2,0	0,16	0,5	2x 17600	150	–	–	–	88,2	2,51	0,179
2	3ШФ-10-4*	12,0	1,48	0,12		2x 15759		230	314	0,99	137,67	4,37	0,364
3	3ШФ-14-2	12,0	1,48	0,12		2x 17050		210	308	0,9	164,04	4,14	0,345
4	3ШФ-16-2	14,0	2,0	0,16		2x 17600		220	402	1,14	173,47	4,93	0,352
5	3ШФ-18-2	14,0	2,0	0,16		2x 17600		236	509	1,5	198,59	5,64	0,403

* зразки з рознесеною арматурою за висотою шпонок

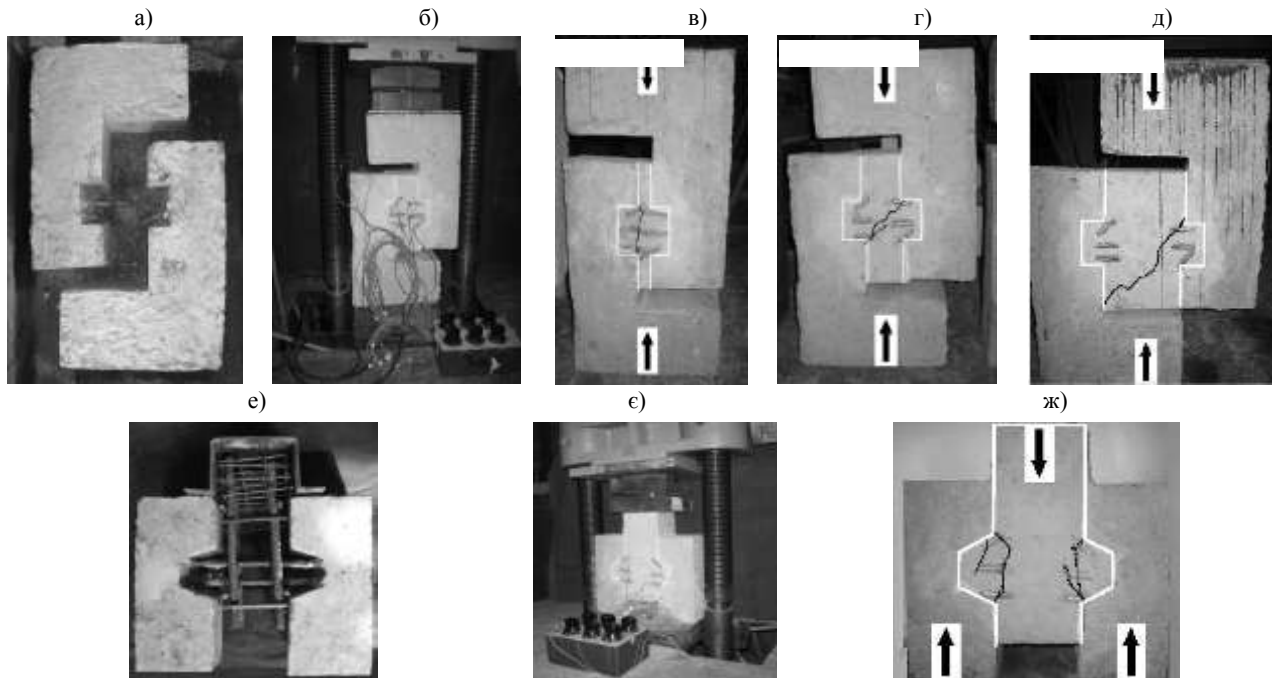


Рис. 1 Реалізація експериментальних досліджень одношпонкових з'єднань (виготовлення, випробування та характер руйнування зразків): в, г, д – другої серії; е, е, ж – третьої серії

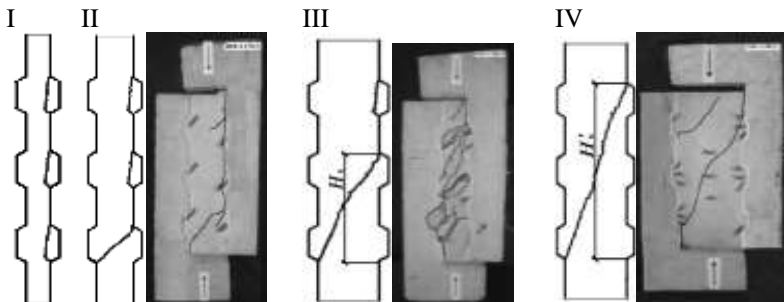


Рис. 2 Випадки руйнування трьохшпонкових стиків

Варіаційний метод у теорії пластичності бетону можна віднести до інженерних методів розрахунку, котрі приводять до простих залежностей і не потребують залучення складних комп'ютерних програм.

Використовується умова міцності бетону Баландіна–Генієва, котра для плоского напруженого стану має вигляд еліпса. Вибір кінематично можливої схеми при визначенні граничного навантаження одношпонкового стику обумовлений випадком руйнування.

При руйнуванні «за шпонкою» (рис. 3) невідомими параметрами виступають: граничне навантаження q_u , співвідношення швидкостей $k = V_x / V_y$ і геометричні параметри поверхні руйнування ABC: кути α , β . Значення граничного навантаження знаходиться шляхом пошуку мінімуму функції (1) методом Ньютона.

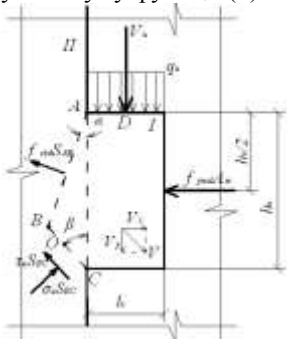


Рис. 3 Кінематично можлива схема руйнування стику «за шпонкою»

$$\frac{q_u}{m} = \left(\frac{B \operatorname{tg} \alpha (\operatorname{tg}^2 \beta + 1)}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} + \frac{f_{cd} \operatorname{tg} \beta}{m} + \frac{f_{yw} A_v \operatorname{tg} \beta}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{\gamma} \quad (1)$$

де

$$B = \sqrt{\left(1 + \chi / (1 - \chi)^2 \right) / 3}, \quad \chi = f_{cd} / f_{cd},$$

$$m = f_{cd} - f_{cd}, \quad \gamma = l_k / h_k.$$

Додатковими умовами виступають:

$$\sum M_B = 0, \quad \sum X = 0, \quad k = \operatorname{tg} \beta.$$

У розрахунках вид бетону (фібробетон) враховуємо шляхом використання відповідних характеристик f_{cd} і f_{ctd} .

Для зручності використання запропонованої методики в практиці проектування теоретична міцність стиків $f_{sh}^{calc} = q_u \gamma$ представлена в табличній формі залежно від їх геометричних параметрів, міцнісних характеристик бетону та відсотка армування (наприклад, для $\gamma = 0,25$ в табл. 2).

Таблиця 2

Теоретичні значення f_{sh}^{calc} / m для випадку руйнування одношпонкових стиків «за шпонкою»

Вихідні параметри		$\rho_w, \%$				
$\gamma = l_k / h_k$	$\chi = f_{ctd} / f_{cd}$	0,7	1,0	1,5	2,0	2,7
0,25	0,08	0,389	0,452	0,505	0,542	0,555
	0,09	0,402	0,462	0,514	0,549	0,560
	0,1	0,415	0,473	0,523	0,556	0,564
	0,11	0,427	0,484	0,532	0,563	0,569

Граничне зусилля зрізу, котре сприймає одношпонковий стик у цьому випадку, дорівнює $V_{sh} = f_{sh}^{calc} b_k h_k$.

Найчастіше в практиці будівництва застосовуються трапецієподібні шпонки, оскільки технологія їх улаштування значно простіша, ніж прямокутних і трикутних, а міцність згідно [4, 6, 7] більша перших. Існує думка, що несуча здатність таких стиків збільшується за рахунок появи горизонтальної складової $q_u l_k b_k \sin \theta$, котра виникає внаслідок відхилення навантаження від вертикалі на кут θ . Ця величина визначається емпіричною залежністю « $\theta - \psi$ », де ψ – кут нахилу опорної поверхні.

Граничне навантаження для таких стиків при руйнуванні «за шпонкою» записується так:

$$\frac{q_u^v}{m} = \left(\frac{B \operatorname{tg} \alpha (\operatorname{tg}^2 \beta + 1)}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} + \frac{f_{ctd} \operatorname{tg} \beta}{m} + \frac{f_{yw} A_w \operatorname{tg} \beta}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{\gamma (\cos \theta - k \sin \theta)}. \quad (2)$$

Кінематично можлива схема при руйнуванні стику «за швом» показана на рисунку 4. Руйнівне навантаження тут визначається за формулою (3).

Для цього випадку руйнування нараховані таблиці теоретичної міцності стику залежно від визначальних факторів (аналогічно табл. 2).

Для кожного із можливих випадків руйнування трьохшпонкових стиків (рис. 2) пропонуються формули для визначення граничного навантаження (4-7).



$$q_u^j = ([2B\sqrt{(k - tg\beta_1)^2 + 0,25(ktg\beta_1 + 1)^2} - (k - tg\beta_1)] \frac{tg\alpha_1 - t_j / h_k}{tg\alpha_1 + tg\beta_1} + \frac{f_{cid}}{m}(k + tg\alpha_1) \frac{tg\beta_1 + t_j / h_k}{tg\alpha_1 + tg\beta_1} + \frac{f_{yw}A_w k}{mh_k b_k}) \frac{1}{\gamma} \quad (3)$$

Додаткові умови:

Рис. 4 Кінематично можлива схема руйнування стику «за швом»
 $\sum X = 0$; $\arctg k + \alpha_1 \geq 45^\circ$.

Вибір випадків розрахунку (руйнування) здійснюється залежно від l_k / h_k і t_j / h_k . Значення граничного навантаження підраховується для усіх можливих випадків руйнування. За остаточне приймається мінімальне значення q_u .

$$I \quad \frac{q_u^1}{m} = 3 \left(\frac{Btg\alpha(tg^2\beta + 1)}{(tg\alpha + tg\beta)} + \frac{f_{cid}tg\beta}{m} + \frac{f_{yw}A_w tg\beta}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{\gamma}; \quad (4)$$

$$II \quad \frac{q_u^2}{m} = 2 \left(\frac{Btg\alpha(tg^2\beta + 1)}{(tg\alpha + tg\beta)} + \frac{f_{cid}tg\beta}{m} + \frac{f_{yw}A_w tg\beta}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{\gamma} + ([2B\sqrt{(tg\beta_1 - k)^2 + 0,25(ktg\beta_1 + 1)^2} - (k - tg\beta_1)] \frac{(tg\alpha_1 - t_j)}{(tg\alpha_1 + tg\beta_1)} + \frac{f_{cid}}{m}(k + tg\alpha_1) \cdot \frac{(tg\beta_1 + t_j)}{(tg\alpha_1 + tg\beta_1)} + \frac{f_{yw}A_w k}{mh_k b_k}) \frac{1}{\gamma}; \quad (5)$$

$$III \quad \frac{q_u^3}{m} = \left(\frac{Btg\alpha(tg^2\beta + 1)}{(tg\alpha + tg\beta)} + \frac{f_{cid}tg\beta}{m} + \frac{f_{yw}A_w tg\beta}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{\gamma} + ([2B\sqrt{(tg\beta_2 - k)^2 + 0,25(ktg\beta_2 + 1)^2} - (k - tg\beta_2)] \frac{(tg\alpha_2 - t_j)}{(tg\alpha_2 + tg\beta_2)} + \frac{f_{cid}}{m}(k + tg\alpha_2) \frac{(tg\beta_2 + t_j)}{(tg\alpha_2 + tg\beta_2)} + \frac{2f_{yw}A_w k}{mH_k b_k}) \frac{1}{\gamma}; \quad (6)$$

$$\frac{q_u^4}{m} = ((2B\sqrt{(tg\beta_3 - k)^2 + 0,25(ktg\beta_3 + 1)^2} - (k - tg\beta_3)) \frac{(tg\alpha_3 - t_j)}{(tg\alpha_3 + tg\beta_3)}) \quad (7)$$

$$IV \quad + \frac{f_{ctd}}{m} (k + tg\alpha_3) \frac{(tg\beta_3 + t_j)}{(tg\alpha_3 + tg\beta_3)} + \frac{3f_{yw}A_w k}{mH_k b_k} \frac{1}{\gamma_2 t},$$

де $\gamma_1 = H_k / l_k$, $\gamma_2 = H'_k / l_k$, $t = \cos\theta - k \sin\theta$.

Для порівняння значень теоретичного та експериментального опору зрізу використовувався параметр $f_{sh}^{calc} / f_{sh}^{test}$. Статистичний аналіз виконано для 15 зразків й отримані наступні значення характеристик: $\bar{x}=0,97$; $\sigma_{n-1}=0,075$; $\nu=7,8$ %.

Висновок

1. Експериментально виявлено вплив на міцність стиків таких визначальних факторів: геометричних розмірів шпонки та їх співвідношення, ширини шва, відсотка армування, характеру розташування арматури за висотою шпонки. 2. Зі збільшенням ширини шва від 25 – 300 мм міцність трьохшпонкових стиків зменшується на 18 %, а для одношпонкових (при $t_j = 50 - 200$ мм) – на 28 %; при зміні ρ_w від 0,64 % до 1,49 % – зростає до 30 %; значення граничного навантаження з'єднань з рознесеною за висотою шпонки арматурою підвищується до 10 % порівняно зі стиками із центральним її розташуванням. 3. Використання фібробетону на поліпропіленових волокнах для замонолічування шпонкового шва підвищило його тріщиностійкість і міцність, руйнування стиків відбувалося не крихко без відривів шматків бетону. 4. При однаковому класі бетону теоретична міцність фібробетонних стиків більша за рахунок підвищеного значення f_{ctd} . Для інженерного розрахунку пропонуються таблиці, в яких теоретична міцність стику визначається залежно від: міцнісних характеристик бетону $\chi = f_{ctd} / f_{cd}$ й арматури f_{yw} , коефіцієнта армування ρ_w , геометричних параметрів шпонки $\gamma = l_k / h_k$ і ψ та ширини стику t_j . 5. Удосконалена методика розрахунку міцності шпонкових стиків на основі варіаційного методу теорії пластичності бетону. При визначенні їх граничного навантаження фібробетон ураховується шляхом використання відповідних значень f_{cd} та f_{ctd} .

Summary

The article presents results of experimental and theoretical studies keyed joints strength of fiber-reinforced concrete with polypropylene fibers. Influence of the fiber-reinforced concrete characteristics, of the joint width, of quantity ultimate and character of the placing depending on keyed height on the keyed joints strength was found. The comparative analysis of the theoretical strength keyed joints to experimental data.

Література

1. Ахмеднабієв Р. М. Вплив поліпропіленових волокон на механічні властивості дрібнозернистого бетону / Р. М. Ахмеднабієв, І. А. Поросюк, П. А. Юрко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2008. – Вип. 30. – С. 9–14.
2. Довженко О.О. Розрахунок міцності одношпонкових стиків із фібробетону на поліпропіленових волокнах / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, І.А. Юрко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 22. – С. 307-313.
3. Довженко О.О. Про доцільність використання фібробетону на поліпропіленових волокнах у дорожньому будівництві / О.О. Довженко, І.А. Юрко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 21. – С. 457-463.
4. Рожко В. Н. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / В. Н. Рожко. – Полтава, 2008. – 182с.
5. Митрофанов В. П. Вариационный метод в теории идеальной пластичности бетона / В. П. Митрофанов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №6. – С. 23–28.
6. Naotaka Y. Study shear behavior of shear key on joints of precast concrete structure (Part 1. Summary and result of experiments) / Y. Naotaka, T. Norimono, K. Katori, S. Hayashi // J. Struct. Constr. Eng. – Architectural Institute of Japan. – 1997. – №10. – P. 441–442.
7. Norimono T. Analytical study on relations between form and shear behavior of shear key on joints of precast concrete structure / T. Norimono, K. Katori, S. Hayashi // J. Struct. Constr. Eng., Architectural Institute of Japan. – 1996. – №9. – P. 835–836.