

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ШПОНКОВИХ З'ЄДНАНЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

© Довженко О.О., Погрібний В.В., Чурса Ю.В., 2013

**Викладено передумови та сутність методики розрахунку міцності шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів, яка ґрунтується на варіаційному методі теорії пластичності бетону. Подано алгоритм розрахунку стиків під час руйнування «за шпонкою» та «за швом». Викладено основи розрахунку тришпонкових з'єднань із різною шириною шва. Наведено обмеження, котрі спрощують процедуру розрахунку.**

**Ключові слова:** шпонковий стик, міцність, варіаційний метод, теорія пластичності.

**Expounded pre-conditions and essence of method of calculation of strength of joints of the key of concrete and reinforceconcrete elements, which is based on the variation method of theory of plasticity of concrete. The algorithm of calculation of joints is presented at destruction «after the key» and «after guy-sutures». The expounded bases of calculation of connections of three-keys are with the different width of guy-sutures. Resulted limitations which simplify procedure of calculation.**

**Key words:** key joint, strength, variation method, theory of plasticity.

### Вступ

В Україні достатньо гостро стоїть проблема «доступного» житла. Зрозуміло, що доступним може стати лише те житло, якого вистачає на всіх, і при цьому воно є недорогим.

У СРСР пріоритетного розвитку для масової забудови зазнала технологія великопанельного домобудування. За економічністю й темпами зведення вона перевершує всі інші відомі методи будівництва. І доки існує потреба в доступному житлі ця технологія має право на існування. До того ж вона сприяє розвитку великих підприємств будіндустрії, котрі вижили і на цей час зберегли свій потенціал. Монолітна технологія за її безперечних переваг у частині гнучкості планувальних рішень та архітектурної виразності будівель не може конкурувати за вартістю зі збірною.

Нові ідеологічні підходи до проблеми «масового» будівництва полягають у творчому переосмисленні наявного досвіду. Дуже важливо вилучити архітектурні штампи забудови, розмежовуючи конструкції на дві основні категорії: несучі із номенклатурою міжвидового застосування й огорожувальні, котрі мають формувати архітектурний образ і мікроклімат будівлі [1, 2].

Досвід свідчить, що тільки заводська технологія виготовлення несучих конструкцій забезпечує високу механізацію робіт, знижує енерговитрати і передбачає операційний контроль усіх виробничих процесів, що гарантує високу якість і надійність збірних конструкцій. Безумовно їх номенклатура в нових умовах має значно розширитися та формуватися за принципом багатоваріантної системи міжвидового застосування.

Перспективними у масовій забудові можна вважати каркасні системи, котрі забезпечують можливість вільної трансформації внутрішнього середовища без втручання в несучу систему на будь-якому етапі життєдіяльності будівлі, що створює умови для її морального довголіття.

### Виклад основного матеріалу

Важливим конструктивним елементом будівель (як великопанельних, так і каркасних) є стики. В міру накопичення досвіду великопанельного будівництва (особливо в сейсмічних районах) суттєво змінилося уявлення про роль стиків панельних стін. Якщо на початкових етапах вони були

найслабкішими місцями будівлі та їх намагалися робити якомога міцнішими й жорсткішими, то зараз можна вважати встановленим [3], що стики, в яких справді локалізується частина деформацій при сейсмічному впливі, одночасно є джерелом нелінійної роботи і пластичного деформування стін загалом. У практиці проектування переважно застосовуються замоноличені шпонкові стики, котрі мають низку переваг порівняно стиками з металевими закладеними деталями (відсутність концентрації напружень, зменшення корозії арматури, зниження витрат металу). Їх недоліки пов'язані з необхідністю вкладання бетону у вузькі, насичені арматурою пази та проміжки. Цей процес мало механізований, виконується не завжди якісно, особливо за від'ємних температур. Одним із напрямів розвитку конструктивних рішень замоноличених стиків є застосування беззварних арматурних в'язей та перехід від окремих концентрованих шпонок до розподілених мілких, що дає змогу ефективніше використовувати опір бетону і зменшити витрати арматури.

У сучасних каркасних конструктивних збірно-монолітних системах (АРКОС, Казань – XXI, КУБ–2,5 та ін.) багатопустотні плити спираються на ригелі через бетонні шпонки, утворені замоноличуванням ділянок пустот на торцях плит. Збірні ригелі (надколонні плити) також з'єднуються з колоною за допомогою шпонок.

Однак існує думка [2] про ненадійність зазначених з'єднань і декларується необхідність влаштування переважно «сухих» стиків на болтах (рідше за допомогою зварювання), а монолітний бетон рекомендується використовувати лише для захисту металу.

Розповсюдження шпонкових стиків і обережне ставлення до їх надійності зумовлює необхідність подальшого вивчення.

У Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка застосовано варіаційний метод у теорії ідеальної пластичності бетону для розрахунку міцності бетонних і залізобетонних елементів [4–8], котрий покладено в основу методики розрахунку шпонкових з'єднань. Він ґрунтується на таких положеннях:

– для бетону в стадії руйнування прийнята передумова про ідеальну пластичність. Якісним критерієм можливості її використання при розрахунках міцності можна вважати імовірність існування (протягом хоча б миті) умови пластичності (міцності) у всій області граничного стану, що повністю перетинає тіло та розвиток якої необхідний для перетворення його на кінематичний механізм [9]. Так, зовні крихкий характер руйнування не є перешкодою для застосування теорії пластичності;

– приймається умова пластичності (міцності) бетону Баландіна-Генієва [10]

$$F(s_{ij}) = T^2 + m\sigma - T_{sh}^2 = 0, \quad (1)$$

де  $m = f_{cd} - f_{ctd}$ ;  $T_{sh}^2 = \frac{f_{cd} f_{ctd}}{3}$ ;  $T$  – інтенсивність дотичних напружень;  $\sigma$  – середнє напруження;

– зв'язок між швидкостями деформацій  $x_{ij}$  і напруженнями  $s_{ij}$  випливає з асоційованого закону плинності

$$x_{ij} = I \frac{\partial F}{\partial s_{ij}}. \quad (2)$$

Швидкість об'ємної деформації  $x$  не дорівнює нулю внаслідок дилатації (збільшення об'єму) бетону, що враховується розрахунковою моделлю;

– використовується схема жорстко-пластичного тіла за умови локалізації пластичних деформацій у тонких шарах на поверхні руйнування;

– розглядаються непереармовані залізобетонні конструкції й елементи, котрі мають таку інтенсивність армування, що в стадії руйнування бетону досягається граничний стан арматури.

За відсутності інерційних і масових сил функціонал методу виглядає як

$$J = \int_{S_i} W_{cl} dS - \int f_i^* V_i dS - \int f_i V_i^* dS, \quad (3)$$

де  $W_{cl}$  – питома потужність пластичного деформування бетону;  $f_i^*$ ,  $V_i^*$  – сили та швидкості, що задаються відповідно на ділянках  $S_f$  і  $S_V$  поверхні тіла  $S = S_f \cup S_V$ .

Найпростішим є розв’язок у розривних функціях швидкостей.

Міцність шпонкового з’єднання визначається за алгоритмом, подано на рис. 1.

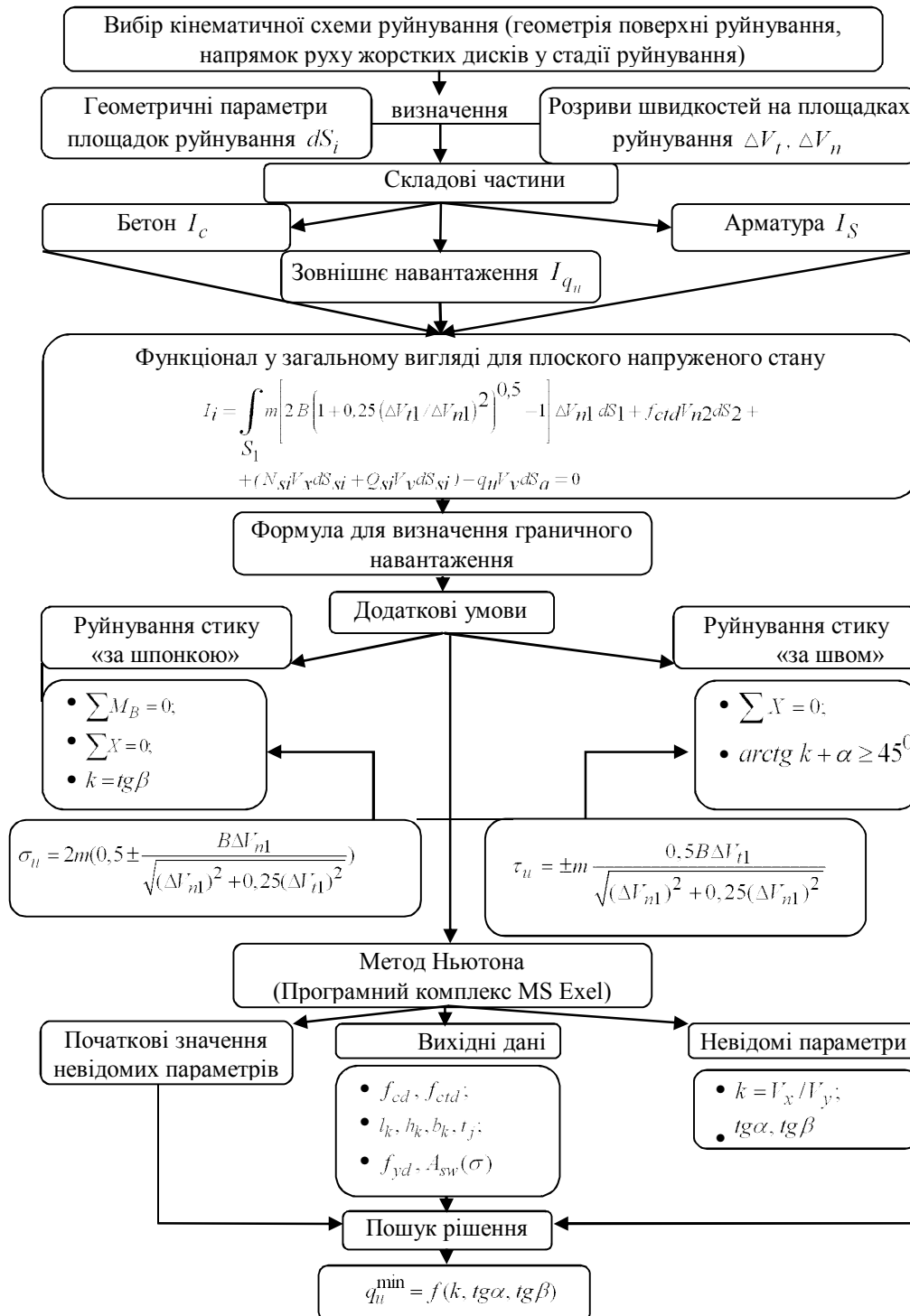


Рис. 1. Послідовність розв’язання задачі міцності шпонкових стиків

Вибір кінематично можливої схеми під час визначення граничного навантаження одношпонкового стику залежить від випадку руйнування.

Під час руйнування «за шпонкою» (рис. 2) невідомими є: граничне навантаження  $q_u$ , відношення швидкостей  $k = V_x / V_y$  і геометричні параметри поверхні руйнування ABC: кути –  $a, b$ .

Значення граничного навантаження знаходять за допомогою пошуку мінімуму функції  $q_u$  (4) методом Ньютона за виконання умов  $\sum M_B = 0, \sum X = 0, k = tg b$ .

$$\frac{q_u}{m} = \left( \frac{B t g a (t g^2 b + 1)}{t g a + t g b} \times \frac{f_{c t d} t g b}{m} + \frac{f_{y d} A_{s w} t g b}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{g}, \quad (4)$$

де  $B = \sqrt{(1 + c / (1 - c)^2) / 3}$ ,  $c = f_{c t d} / f_{c d}$ ,  $g = l_k / h_k$ .

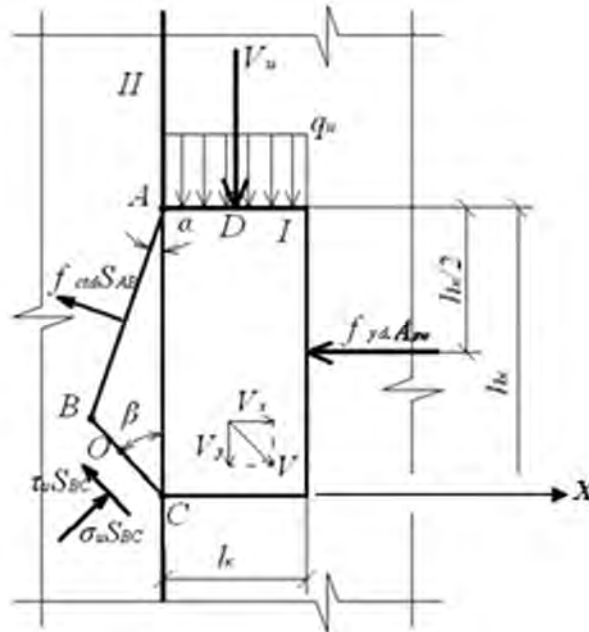


Рис. 2. Кінематично можлива схема руйнування одношпонкового стику «за шпонкою»

Для зручності використання запропонованої методики в практиці проектування теоретична міцність стиків  $f_{k,sh}^{calc} = q_u g$  подано в табличній формі залежно від їх геометричних параметрів, характеристик міцності бетону та відсотка армування (для  $g = 0,25$  див. табл. 1).

Граничне зусилля зрізу, що сприймає одношпонковий стик у цьому разі, дорівнює:  $V_u = f_{k,sh}^{calc} \cdot b_k \cdot h_k$ , де  $b_k$  – товщина стику.

Таблиця 1

Значення  $f_{k,sh}^{calc} / m$  для випадку руйнування одношпонкових стиків «за шпонкою»

Вихідні параметри		$\rho_{sw}, \%$				
$\gamma = l_k / h_k$	$\chi = f_{ctd} / f_{cd}$	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

\*Дані обраховані для арматури класу А 240С

Кінематично можливу схему під час руйнування стику «за швом» показано на рис. 3.

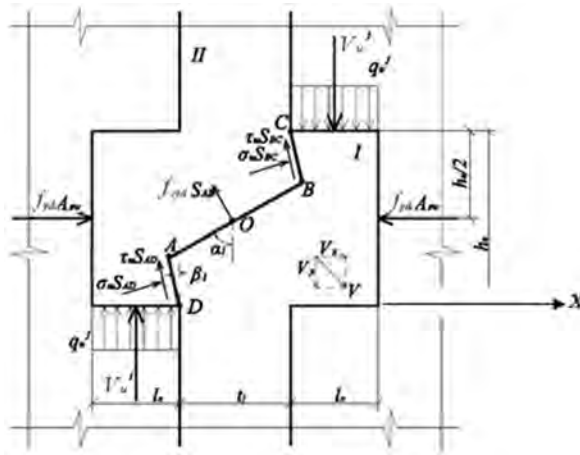


Рис. 3. Кінематично можлива схема руйнування одношпонкового стику «за швом»

Руйнівне навантаження тут визначається за формулою

$$\frac{q_u^j}{m} = \left( \left[ \frac{2B\sqrt{(k - tg b_1)^2 + 0,25(ktg b_1 + 1)^2} - (k - tg b_1)}{tga_1 + tg b_1} \right] \frac{tga_1 - t_j/h_k}{tga_1 + tg b_1} + \frac{f_{ctd}}{m} (k + tga_1) \frac{tg b_1 + t_j/h_k}{tga_1 + tg b_1} + \frac{f_{yd} A_{sw} k}{mh_k b_k} \right) \frac{1}{g}, \quad (5)$$

де  $t_j$  – ширина стику.

При пошуках невідомих параметрів використовуються такі додаткові умови:  $\sum X = 0$ ;  $arctg k + a_1 \geq 45^0$ .

Найчастіше в практиці будівництва застосовуються трапецеподібні шпонки, оскільки технологія їх улаштування значно простіша, ніж прямокутних і трикутних. Існує думка [11], що несуча здатність таких стиків збільшується за рахунок появи горизонтальної складової  $q_u l_k b_k \sin q$ , що виникає внаслідок відхилення навантаження від вертикалі на кут  $q$  (рис. 4). Ця величина врахована емпіричною залежністю « $q - Y$ », де  $Y$  – кут нахилу опорної поверхні.

Граничне навантаження таких стиків під час руйнування «за шпонкою» записується як:

$$\frac{q_u^Y}{m} = \left( \frac{Btga(tg^2 b + 1)}{tga + tgb} + \frac{f_{ctd} tgb}{m} + \frac{f_{sd} A_{sw} tgb}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{g(\cos q - k \sin q)}. \quad (6)$$

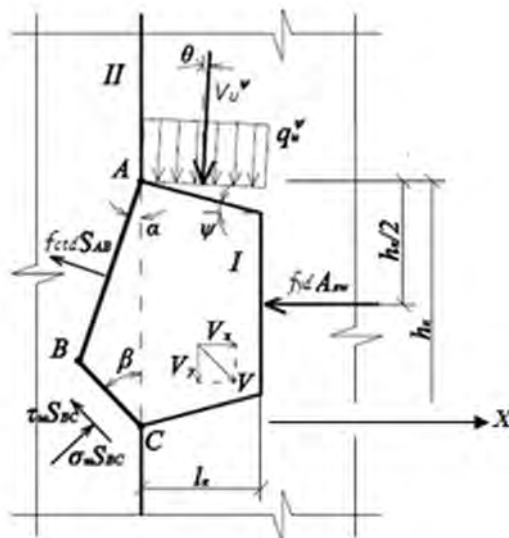


Рис. 4. Кінематично можлива схема руйнування шпонки з трапецеподібним профілем

Згідно з отриманими даними для одношпонкових стиків: при  $l_k/h_k = 0,35 - 0,5$ ,  $t_j/h_k \leq 0,3$  – руйнування відбувається «за шпонкою»; при  $l_k/h_k < 0,5$ ,  $0,3 > t_j/h_k \leq 1,0$  – «за швом»; у разі  $t_j/h_k > 1,0$  – реалізується відривна форма руйнування, котрої треба уникати.

Для тришпонкових стиків розмежовано такі випадки руйнування (за умови, що висота шпонок дорівнює відстані між ними): при  $t_j/h_k \leq 0,3$ : у разі  $0,25 \leq l_k/h_k < 0,35$  – руйнування «за швом», а при  $0,35 \leq l_k/h_k \leq 0,5$  – руйнування «за шпонками»; за виконання умов  $0,25 \leq l_k/h_k \leq 0,5$  і  $0,3 < t_j/h_k < 3,0$  – реалізується змішаний варіант руйнування за шпонками та швом (за розрахункове приймається мінімальне значення граничного навантаження), коли  $t_j/h_k \geq 0,3$  – руйнується шов. Міцність стиків відповідно до форм руйнування (див. рис. 5) визначається за формулами (7–10).

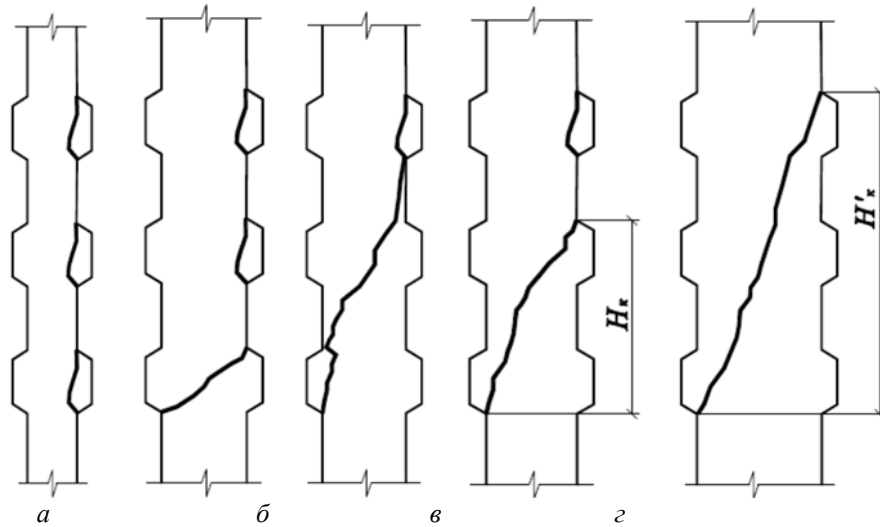


Рис. 5. Можливі форми руйнування тришпонкових стиків

$$a) \quad \frac{q_u^1}{m} = 3 \left( \frac{Btga(tg^2b+1)}{(tga+tg b)} + \frac{f_{ctd}tg b}{m} + \frac{f_{yd}A_{sw}tg b}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{gt} \quad (7)$$

$$b) \quad \frac{q_u^2}{m} = 2 \left( \frac{Btga(tg^2b+1)}{(tga+tg b)} + \frac{f_{ctd}tg b}{m} + \frac{f_{yd}A_{sw}tg b}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{gt} + \left( \left[ \frac{2B\sqrt{(k-tg b_1)^2 + 0,25(ktg b_1 + 1)^2} - (k-tg b_1)}{(tga_1 + tg b_1)} + \frac{f_{ctd}}{m} (k + tga_1) \cdot \frac{(tg b_1 + t_j)}{(tga_1 + tg b_1)} + \frac{f_{yd}A_{sw}k}{m h_k b_k} \right] \right) \frac{1}{gt} \quad (8)$$

$$b) \quad \frac{q_u^3}{m} = \left( \frac{Btga(tg^2b+1)}{(tga+tg b)} + \frac{f_{ctd}tg b}{m} + \frac{f_{yd}A_{sw}tg b}{b_k h_k m} \right) \frac{1}{gt} + \left( \left[ \frac{2B\sqrt{(k-tg b_2)^2 + 0,25(ktg b_2 + 1)^2} - (k-tg b_2)}{(tga_2 + tg b_2)} + \frac{f_{ctd}}{m} (k + tga_2) \cdot \frac{(tg b_2 + t_j)}{(tga_2 + tg b_2)} + \frac{2f_{yd}A_{sw}k}{m H_k b_k} \right] \right) \frac{1}{gt}, \quad (9)$$

$$г) \quad \frac{q_u^4}{m} = \left( \left[ \frac{2B\sqrt{(k - tg b_3)^2 + 0,25(ktg b_3 + 1)^2} - (k - tg b_3)}{(tg a_3 + tg b_3)} + \right] \frac{(tg a_3 - t_j)}{(tg a_3 + tg b_3)} + \right) \frac{1}{g_2 t^2}, \quad (10)$$

$$\left( \frac{R_{bt}}{m} (k + tg a_3) \frac{(tg b_3 + t_j)}{(tg a_3 + tg b_3)} + \frac{3f_{yd} A_{sw} k}{m H'_k b_k} \right)$$

де  $t = \cos \varphi - k \sin \varphi$ ,  $g_1 = \frac{H_k}{l_k}$ ,  $g_2 = \frac{H'_k}{l_k}$ ,  $H_k$  і  $H'_k$ .

### Висновки

Запропонована методика розрахунку шпонкових з'єднань дає можливість врахувати вплив на їх міцність основних визначальних факторів: відношення глибини шпонки до її висоти  $l_k / h_k$ , кута нахилу опорних граней шпонки, армування, рівня обтиснення, виду та класу бетону за монолітування, ширини шва, кількості шпонок у з'єднанні.

Результати порівняння теоретичної міцності з дослідною [5–7, 11] дає змогу стверджувати про достатню точність запропонованої методики і дають можливість рекомендувати її до широкого застосування.

1. Гуров Е.П. Сборное домостроение. Стратегия развития / Е.П. Гуров // СтройПРОФИЛЬ, 2010. – № 4 (82). – С. 10–15. 2. Гуров Е.П. Сборное домостроение. Стратегия развития / Е.П. Гуров // СтройПРОФИЛЬ, 2010. – № 5 (83). – С. 8–11. 3. Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Исследование и основы проектирования / [Г. И. Ашкинадзе, М. Е. Соколов, Л. Д. Мартынова и др.]; под ред. Г. И. Ашкинадзе и М. Е. Соколова. – М.: Стройиздат, 1988. – 504 с. 4. Митрофанов В. П. Вариационный метод в теории идеальной пластичности бетона / В. П. Митрофанов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – № 6. – С. 23–28. 5. Митрофанов В.П. Прочность железобетонных шпонок с различным расположением арматуры / В.П. Митрофанов, О.А. Довженко, О.А. Голов, Л.В. Карабаи, С.И. Арцев // Вісник Одеської державної академії - будівництва та архітектури. - Одеса: ОДАБА, 2009. - Вип. № 34. - С. 436–444. 6. Довженко О.О. Варіаційний метод розрахунку міцності окремих прямокутних залізобетонних шпонок / О.О. Довженко, Л.В. Карабаи // Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. праць. - Полтава: ПНТУ, 2008. - Вип. 21. - С. 54–60. 7. 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. 8. Довженко О.О. До питання визначення межі зсувної форми руйнування бетонних елементів / О.О. Довженко, В.В. Погрібний // Вісник Одеської державної академії - будівництва та архітектури. - Одеса: ОДАБА, 2012. - Вип. 47. - С. 406–417. 9. Митрофанов В.П. Про можливість застосування передумови про ідеальну пластичність до бетону / В.П. Митрофанов, В.В. Погрібний, О.О. Довженко // Вісник Одеської державної академії - будівництва та архітектури. - Одеса: ОДАБА, 2002. - Вип. 7. - С. 118–124. 10. Геніев Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Геніев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с. 11. Рожко В. Н. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції» / В. Н. Рожко; ПНТУ. – Полтава, 2008. – 182 с.