

ПРОПОЗИЦІЇ ДО РОЗРАХУНКУ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ШПОНКОВИХ СТИКІВ ЗБІРНО-МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ СПОРУД ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

PROPOSALS FOR CALCULATING THE BEARING CAPACITY OF KEY JOINTS OF PRECAST-CAST-IN-PLACE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF CIVIL PROTECTION BUILDINGS

Довженко О.О., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-2266-2588 (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»); **Каноненко К.В., магістрантка**, ORCID: 0009-0005-3204-407X (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Dovzhenko O.O., Phd, Professor, ORCID: 0000-0002-2266-2588 (National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"); **Kanonenko K.V., master's student**, ORCID: 0009-0005-3204-407X (National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic")

Запропонована залежність для розрахунку несучої здатності шпонкових стиків збірно-монолітних залізобетонних конструкцій, отримана на основі розв'язку задач опору шпонки та шва варіаційним методом у теорії пластичності бетону із урахуванням особливостей напружено-деформованого стану зони руйнування.

Precast-cast-in-place structure of floors (coverings), walls (columns) are widely used in protective structures of civil protection, provided that the members are reliably connected both in their plane and in the perpendicular direction. The joint work of precast and cast-in-place concrete during design is ensured by calculation, constructive and technological measures. The need to calculate the specified joint is assumed. A dependence for calculating the bearing capacity of key joints of precast-cast-in-place reinforced concrete structures, obtained on the basis of solving key and seam resistance problems by the variational method in the theory of concrete plasticity was proposed, taking into account the features of the stress-strain state of the failure zone and determining factors of influence. These include the key and seam parameters found in experimental studies. The parameters of a key include geometric ones (dimensions and their ratio, the angle of inclination of the supporting surfaces, the shape of the working section); strength characteristics (type and class) of concrete; reinforcement (strength, its quantity and location along the shear plane); the presence or absence of compression. The proposed dependence has a regulatory structure, is more accurate compared to it and opens up prospects

for improving constructive solutions of joints with increased shear resistance of load-bearing systems made of reinforced concrete.

Ключові слова: Шпонковий стик, несуча здатність, розрахунок joint, bearing capacity, design.

Вступ. В захисних спорудах цивільного захисту широко застосовуються збірно-монолітні конструкції перекриття (покриття), стін (колон) за умови надійного зв'язку елементів як у своїй площині, так і у перпендикулярному напрямку. Сумісна робота збірного і монолітного бетону при проектуванні забезпечується за допомогою розрахункових, конструктивних і технологічних заходів. Варіанти облаштування контактної стики можуть бути різними та залежать від виду поверхні збірної елементу (гладка, шорстка, шпонкова), також передбачається необхідність його розрахунку. Особливу увагу при проектуванні конструктивних систем із залізобетону необхідно приділяти стикам несучих елементів, які забезпечують їхню сумісну роботу під навантаженням. Серед них істотну роль відіграють шпонкові з'єднання, котрі мають підвищений опір зриву.

Аналіз останніх досліджень. Згідно термінології нормативних документів ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [1] та Eurocode [2] розрахунок «технологічно зазубреного шва» (рис. 1) – контактної шпонкової з'єднання базується на виконанні умови:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}, \quad (1)$$

де V_{Ed} – поперечне зусилля зсуву від зовнішнього навантаження; V_{Rd} – розрахунковий опір зсуву на контактні бетону, укладеного в різний час:

$$V_{Rd} = (c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)) A_{sh} \leq (0,5 v f_{cd}) A_{sh}, \quad (2)$$

тут c і μ – коефіцієнти, які залежать від шорсткості поверхні бетону (для шпонкового профіля приймається $c = 0,5$ і $\mu = 0,9$); A_{sh} – площа з'єднання; f_{ctd} – розрахункова міцність бетону на розтяг; σ_n – напруження, викликане зовнішньою нормальною силою на контактні, яка може діяти одночасно із силою зсуву; ρ – коефіцієнт армування $\rho = A_{sw} / A_{sh}$; A_{sw} – площа арматури, що перетинає контакт при відповідному анкеруванні її з обох сторін контакту; α – кут нахилу до площини з'єднання арматури, котра перетинає контакт, обмежується діапазоном $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$; v – коефіцієнт зниження міцності бетону з тріщинами.

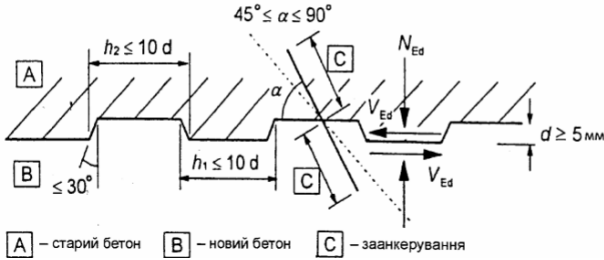


Рис. 1 Технологічно зазубрений шов [1]

До загальних недоліків методики ДСТУ можна віднести суттєве зниження опору при зрізі бетонних шпонок (застосовується коефіцієнт 0,5 до розрахункового опору бетону розтягу); не врахування міцності бетону на стиск, відношення розмірів шпонок, яке обумовлює їх руйнування від зминання або зсуву, а також можливості руйнування з'єднання за швом (у разі його наявності).

Детальний огляд авторських емпіричних і теоретичних залежностей, запропонованих для розрахунку шпонкових з'єднань виконано в [3]. Таким, що заслуговує уваги, виглядає підхід, який базується на загальній теоретичній основі, зокрема теорії пластичності бетону [4 – 9].

Метою роботи є надання пропозицій щодо методики розрахунку несучої здатності контактних стиків збірно-монолітних конструкцій, розробленої на основі отриманих варіаційним методом у теорії пластичності рішень опору шпонок і шва.

Результати дослідження. Використовуючи структуру нормативної розрахункової залежності (1) пропонується здійснювати підрахунок несучої здатності одношпонкового контактного стику за формулою:

$$V_{Rd} = f_{sh} A_{sh}, \quad (3)$$

де $f_{sh} = q_u l_k / h_k = q_u \gamma$, q_u – граничне рівномірно розподілене за площиною прикладання навантаження на шпонку (рис. 2) і $\gamma = l_k / h_k$ – співвідношення її розмірів;

- у разі застосування бетонної шпонки з прямокутним профилем і прямокутним поперечним перерізом (враховано обидві характеристики міцності бетону на стиск і розтяг та співвідношення розмірів шпонки γ (рис. 2, а)) її опір визначається як:

$$q_u = (m \left[2B \sqrt{(k - tg\beta)^2 + 0,25(ktg\beta + 1)^2} - (k - tg\beta) \right] \times \times \frac{tg\alpha}{(tg\alpha + tg\beta)} + f_{ctd} (k + tg\alpha) \frac{tg\beta}{(tg\alpha + tg\beta)}) \frac{1}{\gamma}, \quad (4)$$

тут $m = f_{cd} - f_{ctd}$, $B^2 = (1 + \chi / (1 - \chi)^2) / 3$, $\chi = f_{ct} / f_c$, α і β – кути нахилу ділянок руйнування до вертикалі на кінематичній схемі шпонки; $k = V_x / V_y$ – відношення швидкостей;

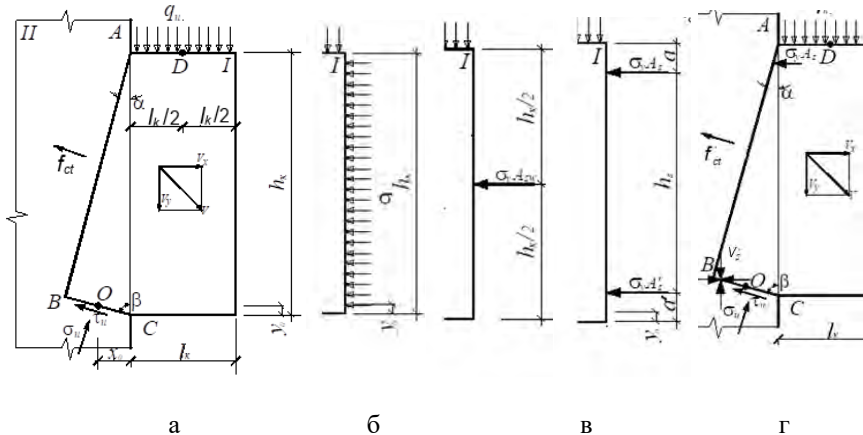


Рис. 2 Кінематично можлива схема руйнування прямокутних шпонок при зрізі: а – бетонних; б – обтиснутих; в – залізобетонних при розташуванні арматури в один і два рівні без врахування нагельного ефекту; г – залізобетонних при двоюрисному розташуванні арматури і врахуванні нагельного ефекту в стиснутій арматурі

- при врахуванні обтиснення (рис. 2, б) в площині перпендикулярній площині зрізу до залежності (3) додається член:

$$\frac{\sigma k}{\gamma}; \quad (5)$$

- у випадку застосування залізобетонних шпонок без урахування нагельного ефекту в арматурі не залежно від її розташування за висотою (в один або два рівня – рис. 2, в) в (3) з'являється додаткова компонента (для одиничного або подвійного армування):

$$\frac{\sigma_y A_{sw} k}{b_k h_k \gamma} \text{ або } \frac{\sigma_y (A_s + A'_s) k}{b_k h_k \gamma}; \quad (6)$$

- у разі врахування нагельного ефекту в арматурі, розташованій у стиснутій зоні залізобетонних шпонок, замість (5) в (3) додається член:

$$\left(\frac{\sigma_y A_s k}{b_k h_k} + \frac{\sigma_y A'_s k_e}{b_k h_k} \left(1 + \frac{k^2}{4k_e^2} \right) \right) \frac{1}{\gamma}, \quad (7)$$

тут $\kappa_\theta=0,338$ у випадку важких бетонів і $\kappa_\theta=0,284$ при бетонах на пористих заповнювачах;

- кругла форма поперечного перерізу шпонок враховується введенням коефіцієнта $2/3$ до формули (3) і коефіцієнта $\pi/2$ до формул (4) – (6);

- трапецієподібний профіль стику враховується додатковим множником до формул (3) – (6):

$$\frac{1}{(\cos \theta - k \sin \theta)}, \quad (8)$$

при цьому пропонується лінійна залежність (в градусах) між кутами θ і ψ :

$$\theta = \psi / 15. \quad (9)$$

Існує можливість визначити несучу здатність стику і у разі його руйнуванні за швом (рис. 3).

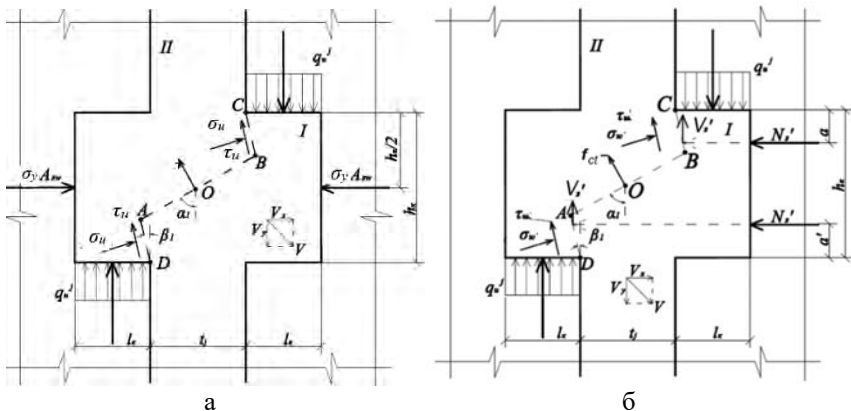


Рис. 3 Кінематично можлива схема руйнування шва в межах шпонки залізобетонних стиків із прямокутним профілем при розташуванні арматури: а – в один рівень; б – в два рівня та врахування нагельного ефекту в усій арматурі

В цьому випадку для бетонного стику в формулі (3) перша компонента замість $tg\alpha$ множиться на:

$$(tg\alpha_1 - t_j / h_k), \quad (10)$$

а друга замість $tg\beta$ на:

$$(tg\beta_1 + t_j / h_k). \quad (11)$$

Для залізобетонного з'єднання у разі неврахування нагельного ефекту потрібно користуватися формулою (5), при його врахуванні замість (6) застосовується складова (так як вся рознесена арматура потрапляє у стиснуту зону):

$$\frac{\sigma_y A'_s (k^2 + 4k_g^2)}{2k_g h_k b_k}. \quad (12)$$

Форма шпонкового профіля і поперечного перерізу враховується аналогічно, як при руйнуванні за шпонкою.

Пропонується на відміну від норм у контактних багатшпонкових стиках враховувати до 5-ти шпонок замість 3, у стиках зі швом необхідно розглядати всі можливі випадки руйнування (за шпонками, швом і комбіноване) та за розрахункове приймати навантаження для випадку із мінімальним значенням несучої здатності.

Для часткового врахування наявності повороту в кінематиці граничного стану шпонки використовуються додаткові умови у вигляді рівнянь моментів сил, які прикладені до частини шпонки, відсіченої поверхнею руйнування, відносно характерних точок В, О і D (рис. 2): $\sum M_B = 0$, $\sum M_O = 0$, $\sum M_D = 0$. При цьому нормальні напруження, що діють на площадці ВС, виражені через розриви швидкостей, записуються у вигляді:

$$\frac{\sigma_u}{m} = 2 \left(0,5 \pm \frac{B(k - tg\beta)}{\sqrt{(k - tg\beta)^2 + 0,25(ktg\beta + 1)^2}} \right), \quad (13)$$

дотичні напруження:

$$\frac{\tau_u}{m} = \pm \frac{B(ktg\beta + 1)}{2\sqrt{(k - tg\beta)^2 + 0,25(ktg\beta + 1)^2}}. \quad (14)$$

У якості додаткових умов при руйнуванні за швом приймаються: $\sum X = 0$ і $arctg k + \alpha_1 \geq 45^\circ$, в яких використовуються параметри розрахункових схем рис. 3.

При розрахунках граничного навантаження функція (3) досліджується на умовний екстремум. Цей процес легко реалізується за допомогою надбудови Пошук рішення Excel.

Висновки. В Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» розроблено варіаційний метод у теорії пластичності бетону, котрий виступає загальною теоретичною основою для створення методики розрахунку несучої здатності шпонкових стиків. Теоретичні розробки дозволили запропонувати залежність за структурою норм, котра дозволяє врахувати: обидві характеристики міцності бетону при стисковій і розтягній; співвідношення розмірів шпонки; форму поперечного перерізу; форму шпонкового профіля; обтиснення шпонок у площині перпендикулярній зрізу; армування (кількість арматури, характер її розташування за висотою

шпонки, можливий нагельний ефект у стиснутій арматурі); руйнування шва, у разі його наявності. На відміну від норм у контактних багатошпонкових стиках запропоновано враховувати при розрахунках 5 шпонок замість 3. Застосування запропонованої методики відкриває перспективи удосконалення конструктивних рішень стикових з'єднань із підвищеним опором зрізу несучих систем із залізобетону.

1. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – К.: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінфор», 2011. – 118 с.

Betonna ta zalizobetonna konstruktssii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia: DSTU B V.2.6-156:2010. – K.: Minrehionbud Ukrainy, Derzhavne pidpriemstvo «Ukrarkhbudinfor», 2011. – 118 s.

2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1-1, (Final Draft, December, 2004). – Brussels: CEN. – 2004. – 225 p.

3. Довженко О.О. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: експериментальні дослідження: монографія. – Полтава: ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2015. – 181 с.

Dovzhenko O.O. Mitsnist shponkovykh ziednan betonnykh i zalizobetonykh elementiv: eksperymentalni doslidzhennia: monohrafiia. – Poltava: PoltNTU im. Yu. Kondratiuka, 2015. – 181 s.

4. Nielsen M.P. Limit Analysis and Concrete Plasticity; 3rd ed./ M.P. Nielsen, L.C. Hoang. – CRC Press, 2016. – 788 p.

5. Braestrup M.W. Concrete plasticity – a historical perspective/ M.W. Braestrup// Structural Concrete. – 2021. – Vol. 22. – Pp. 2508–2525.

6. Гениев Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.

Geniev G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona / G. A. Geniev, V. N. Kissyuk, G. A. Tyupin – M.: Stroizdat, 1974. – 316 s.

7. Jørgensen H. B. Load carrying capacity of keyed joints reinforced with high strength wire rope loops/ H. B. Jørgensen, L. C. Hoang// In Proceedings of fib Symposium Concrete – Innovation and Design, Copenhagen May 18-20, 2015. – Pp. 83 – 84.

8. Митрофанов В.П. Теория идеальной пластичности как элементарная механика псевдопластического предельного состояния бетона: основы, ограничения, практические аспекты, совершенствование /В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов: Сб. науч. тр. – К.: Техника, 2006. – Вып. 72. – С. 6–26.

Mitrofanov V.P. Teoriya idealnoi plastichnosti kak elementarnaya mekhanika psevdoplasticheskogo predelnogo sostoyaniya betona: osnovi, ogranicheniya, prakticheskie aspekti, sovershenstvovanie /V.P. Mitrofanov // Kommunalnoe khozyaistvo gorodov: Sb. nauch. tr. – K.: Tekhnika, 2006. – Vip. 72. – S. 6–26.

9. Погрібний В.В. Методологія розрахунку несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування: монографія / В.В. Погрібний. – Полтава: ПП «Астрая», 2022. – 388 с.

Pohribnyi V.V. Metodolohiia rozrakhunku nesuchoi zdatnosti zalizobetonykh i kamianykh konstruktssii z vykorystanniam umov ekstremumu deformuvannia: monohrafiia / V.V. Pohribnyi. – Poltava: PP «Astraia», 2022. – 388 s.