

УДК 624.012.45

<https://doi.org/10.31713/vt3202512>

Грищенко О. Д. [1; ORCID ID: 0000-0002-4365-4335],

аспірант,

Кочкаръов Д. В. [1; ORCID ID: 0000-0002-4525-7315],

д.т.н., професор

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПІДДАТЛИВОСТІ ПЕТЛЬОВИХ СТИКІВ

У роботі розроблено аналітичну модель зчеплення арматури з бетоном, що дозволяє визначати залежність дотичних напружень від відносного зміщення арматури з урахуванням нормальних напружень в арматурі. Модель враховує початкову пружну ділянку, стадію проковзування напружень зчеплення, що дозволяє формувати діаграми $\tau-s$, придатні для чисельного моделювання зчеплення методом скінчених елементів. Запропонований підхід дозволяє будувати фізично обґрунтовані діаграми зчеплення-ковзання у всьому діапазоні поведінки арматури під час висмикування. Запропонована методика забезпечить точне оцінювання піддатливості петльових стиків та підвищить достовірність розрахунків залізобетонних конструкцій.

Ключові слова: діаграми зсуву; моделі зчеплення арматури з бетоном; деформації зсуву; параметри зчеплення; середні дотичні напруження зчеплення.

Аналіз досліджень і постановка задачі

Особливо актуальним питанням є врахування зчеплення арматури з бетоном при розрахунку петльових стиків збірних залізобетонних конструкцій, у яких загальна піддатливість стика значною мірою визначається деформаційними властивостями зони анкерування арматури. У таких стиках передача зусиль між елементами відбувається переважно за рахунок роботи зчеплення, а не за рахунок безпосереднього контакту бетонних поверхонь, що зумовлює підвищену чутливість розрахункових параметрів до прийнятого закону взаємодії «арматура – бетон».

У зв'язку з цим дослідження механізму зчеплення арматури з бетоном та побудова адекватних моделей його деформаційної роботи є однією з ключових задач при визначенні піддатливості петльових стиків і стикових з'єднань загалом. У наукових роботах, присвячених проблемі зчеплення, значна увага приділяється



експериментальному вивченню процесу висмикування арматури та побудові емпіричних або напівемпіричних діаграм типу «дотичні напруження – зміщення» [1; 3; 4; 5]. Разом з тим більшість запропонованих залежностей мають спрощений характер та цілу низку емпіричних параметрів які, як правило, не враховують безпосереднього впливу рівня нормальних напружень у арматурі на параметри зчеплення.

Окремі дослідження показують, що середні дотичні напруження зчеплення можуть бути пов'язані з нормальними напруженнями в арматурі лінійною або квазілінійною залежністю до моменту проковзування арматури вздовж довжини анкетування [2; 6]. Проте подальша стадія роботи, яка характеризується зміною форми епюри напружень і переходом до прямокутного розподілу, у наявних моделях неописана.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки аналітичної моделі зчеплення, яка: враховує залежність дотичних напружень від нормальних напружень у арматурі; описує весь процес роботи зчеплення при висмикуванні, включно зі стадією насичення; забезпечує формування фізично обґрунтованих діаграм роботи при зчепленні, придатних для використання у чисельних методах розрахунку піддатливості стиків. Також варто зазначити, що є нормативні діаграми зсуву [9; 10; 11; 12; 13; 14], в яких параметри отримані експериментально-емпіричним шляхом, але вони не дають можливості достовірно оцінювати параметри напружено-деформованого стану розглядуваних елементів.

Мета роботи полягає у розробці та обґрунтуванні аналітичного закону зчеплення арматури з бетоном, який дозволяє визначати залежність між дотичними напруженнями, зміщенням арматури та нормальними напруженнями в ній і може бути використаний для розрахунку деформаційних характеристик петльових стиків залізобетонних конструкцій.

Викладення основного матеріалу

Пропонується вдосконалена аналітична методика побудови діаграми зчеплення арматури з бетоном, яка базується на диференціальному рівнянні рівноваги арматурного стержня. В основу покладено гіпотезу про білінійний характер зчеплення. Висхідна ділянка діаграми описується на основі лінійної залежності дотичних напружень від нормальних напружень в арматурі. Пластична ділянка обмежується граничним зчепленням, що відповідає ідеально-пластичній моделі руйнування контактного

шару бетону. Аналіз напружено-деформованого стану системи дозволяє виділити два принципово відмінні випадки роботи арматурного стержня при висмикуванні, які залежать від співвідношення міцнісних характеристик бетону та границі текучості арматури. Перший випадок характеризується досягненням межі текучості в арматурі на першій ділянці. Цей випадок реалізується, коли міцність зчеплення є достатньо високою, або клас арматури є відносно низьким. Пластична стадія зчеплення може настати лише в зоні зміцнення сталі. Другий випадок є найбільш характерним для сучасних класів високоміцної арматури (A500С, A600) та бетонів звичайних класів. Граничне зчеплення τ_{\max} досягається ще в межах пружної роботи арматури. При напруженні $\sigma = \sigma_{cr}$ відбувається зміна механізму взаємодії: лінійне зростання дотичних напружень припиняється, і формується ділянка пластичного зсуву (зчеплення стає сталим $\tau = \tau_{\max}$).

Особливістю запропонованого підходу є калібрування параметрів моделі (знаходження коефіцієнтів a та b) таким чином, щоб досягнення граничного зчеплення τ_{\max} відбувалося одночасно з досягненням межі текучості арматури f_y . Це відповідає умові $\sigma_{cr} = f_y$. Такий підхід дозволяє сформулювати єдиний алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану, що складається з двох послідовних етапів:

1. Етап пружної роботи арматури ($0-f_y$): Зчеплення зростає за лінійним законом, не досягаючи граничних значень. Проковзування на цьому етапі визначається аналітично за логарифмічною залежністю.
2. Етап зміцнення арматури (f_y-f_u): При переході арматури в пластичний стан зчеплення набуває сталого граничного значення $\tau = \tau_{\max}$. Приріст проковзування на цій ділянці визначається як суперпозиція накопичених деформацій та додаткового зсуву в умовах ідеально-пластичного зчеплення.

Запропонована методика виключає невизначеність у виборі розрахункових схем та забезпечує неперервність функції проковзування у всьому діапазоні навантажень.

На початку розглянемо напружено деформований стан стержня, який висмикується із бетонної призми на основі лінійного закону зчеплення [6]

$$\tau(x) = a \cdot \sigma(x) + b, \quad (1)$$

де $\tau(x)$ – середні дотичні напруження в бетоні, $\sigma(x)$ – напруження у арматурі, a , b – коефіцієнти, які характеризують зчеплення.



Розглянемо елементарну ділянку стержня довжиною dx . Зміна поздовжньої сили в стержні dP повинна дорівнювати силі зчеплення, що діє на бічній поверхні цього елемента, тому запишемо

$$dP = \tau(x) \cdot u \cdot dx, \quad (2)$$

де u – периметр стержня.

З іншого боку сила в стержні дорівнює

$$P(x) = \sigma(x) \cdot A_s, \quad (3)$$

де A_s – периметр стержня.

Після підстановки (3) у (2) отримаємо диференціальне рівняння рівноваги стержня

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{u_p}{A_s} \cdot \tau(x). \quad (4)$$

Підставимо лінійний закон зчеплення (1) у вираз (4), в результаті отримаємо

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{u_p}{A_s} \cdot (a \cdot \sigma + b). \quad (5)$$

Для спрощення введемо позначення

$$k = \frac{u_p}{A_s} = \frac{4}{d}. \quad (6)$$

Запишемо рівняння (5) з урахуванням позначень (6) та відокремимо змінні

$$\frac{d\sigma}{a \cdot \sigma + b} = k \cdot dx. \quad (7)$$

Проінтегрувавши обидві частини рівняння (7) та провівши нескладні перетворення отримаємо

$$\sigma(x) = \frac{C \cdot e^{a \cdot k \cdot x} - b}{a}. \quad (8)$$

Застосуємо до виразу (8) граничні умови до виразу (8). На вільному кінці при $x=0$ напруження відсутні $\sigma(0) = 0$, тоді

$$\sigma(0) = \frac{C \cdot e^0 - b}{a} = 0, \frac{C - b}{a} = 0 \Rightarrow C = b. \quad (8)$$

Остаточно

$$\sigma(x) = \frac{b}{a} (e^{a \cdot k \cdot x} - 1) = \frac{b}{a} (e^{\frac{4 \cdot a}{d} \cdot x} - 1). \quad (9)$$

Середні напруження зчеплення за виразом (1) з урахуванням (9) будуть визначатися за виразом

$$\tau(x) = b \cdot e^{a \cdot k \cdot x} = b \cdot e^{\frac{a}{d} \cdot x}. \quad (10)$$

Визначимо проковзування арматури $s(x)$. Воно визначається як відносне зміщення арматури $u_s(x)$ та бетону $u_c(x)$. У подальшому запропонована модель буде застосована до чисельного моделювання де деформації бетону будуть враховані шляхом моделювання бетону скінченими елементами. У такому випадку ми будемо розглядати деформації зміщення лише арматури

$$s(x) = u_s(x) = \int_0^x \varepsilon_s(x) dx = \frac{1}{E_s} \int_0^x \sigma(x) dx. \quad (11)$$

У вираз (11) підставимо вираз (9) та виконаємо інтегрування

$$\begin{aligned} s(x) &= \frac{1}{E_s} \int_0^x \left[\frac{b}{a} (e^{a \cdot k \cdot x} - 1) \right] dx = \frac{b}{a \cdot E_s} \left[\frac{1}{a \cdot k} e^{a \cdot k \cdot t} - t \right]_0^x = \\ &= \frac{b}{a \cdot E_s} \left(\frac{1}{a \cdot k} (e^{a \cdot k \cdot x} - 1) - x \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Виразимо проковзування арматури $s(x)$ залежно від $\tau(x)$. Для цього скористаємося виразами (10) та (12). Після нескладних перетворень отримаємо залежність

$$s(\tau) = \frac{d}{4 \cdot E_s \cdot a^2} \left[(\tau - b) - b \cdot \ln\left(\frac{\tau}{b}\right) \right]. \quad (13)$$

Запишемо вираз (13) через напруження у робочій арматурі

$$s(\sigma) = \frac{d}{4 \cdot E_s \cdot a^2} \left[a \cdot \sigma - b \cdot \ln\left(1 + \frac{a}{b} \cdot \sigma\right) \right]. \quad (14)$$

Виведені вище вирази справедливі до початку проковзування арматури. З початком проковзування дотичні зусилля стають постійними, це дозволяє доволі просто отримати всі необхідні параметри зчеплення на ділянці проковзування.

Запишемо рівняння рівноваги

$$\frac{d\sigma}{dx} = k \cdot \tau_{\max}. \quad (15)$$

Після нескладних перетворень

$$d\sigma = k \cdot \tau_{\max} \cdot dx \Rightarrow dx = \frac{d\sigma}{k \cdot \tau_{\max}}. \quad (16)$$

З рівняння сумісності деформацій отримаємо

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon_s = \frac{\sigma}{E_s} \Rightarrow ds = \frac{\sigma}{E_s} dx. \quad (17)$$

Підставимо вираз для dx з рівняння (16) у рівняння (17)



$$ds = \frac{\sigma}{E_s} \cdot \left(\frac{d\sigma}{k \cdot \tau_{\max}} \right) = \frac{1}{E_s \cdot k \cdot \tau_{\max}} \cdot \sigma \cdot d\sigma. \quad (18)$$

Тепер проінтегруємо вираз (18) у межах зміни напружень на заданій ділянці. Прийmemo для нижньої межі σ_1 , для верхньої межі – σ_2

$$\Delta s = \frac{1}{E_s k \tau_{\max}} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \sigma d\sigma. \quad (19)$$

Після інтегрування і підстановки меж отримаємо

$$\Delta s = \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{2E_s k \tau_{\max}} = \frac{d}{8E_s \tau_{\max}} (\sigma_2^2 - \sigma_1^2). \quad (20)$$

Повне проковзування s_{ult} буде визначатися за виразом

$$s_{ult} = s + \Delta s. \quad (21)$$

Приведемо порядок отримання діаграм зсуву за розробленою моделлю.

1. Визначаємо параметри лінійної моделі зчеплення за виразами

$$a = f_{ctm} \frac{\eta_1 \eta_2 - \alpha_0}{f_{yd}}. \quad (22)$$

$$b = \tau_0 = \alpha_0 \cdot f_{ctm}. \quad (23)$$

2. Встановлюємо деформації зміщення

$$s_2 = s(f_y) = \frac{d}{4 \cdot E_s \cdot a^2} \left[a \cdot f_y - b \cdot \ln \left(1 + \frac{a}{b} \cdot f_y \right) \right]. \quad (24)$$

$$\Delta s = \frac{d}{8E_s \tau_{\max}} (f_u^2 - f_y^2). \quad (25)$$

3. Визначаємо остаточний зсув

$$s_{ult} = s_2 + \Delta s. \quad (26)$$

4. Будуємо діаграму « $\tau - s$ » згідно з таблицею.

Таблиця

Побудова діаграми « $\tau - s$ »

| № | Дотичні напруження τ | Деформації зміщення s |
|---|------------------------------|----------------------------|
| 1 | τ_0 | $s_1=0$ |
| 2 | τ_{\max} | s_2 |
| 3 | τ_{\max} | s_{ult} |

Виведені вирази дозволяють виконувати три види задач:

1. Визначення максимальної сили висмикування P_L та проковзування $s(l)$ для стержня довжиною l .
2. Визначення необхідної довжини анкерування l для того, щоб стержень витримав задану силу P_L .
3. Побудова графіків розподілу нормальних напружень $\sigma(x)$, напружень зчеплення $\tau(x)$ та проковзування $s(x)$.

Покажемо приклад побудови діаграм зсуву « $\tau - s$ » для двох зразків із такими параметрами:

1. Перший зразок діаметром $d = 10$ мм;
 - клас бетону C20/25, $f_{ctm} = 1.99$ МПа (середня міцність на розтяг).
 - клас арматури A500, $f_{yd} = 435$ МПа, $f_u = 500$ МПа, $E_s = 2 \times 10^5$ МПа.

2. Другий зразок діаметром $d = 12$ мм.
 - клас бетону C25/30, $f_{ctm} = 2.25$ МПа (середня міцність на розтяг).
 - клас арматури A400, $f_{yd} = 365$ МПа, $f_u = 400$ МПа, $E_s = 2 \times 10^5$ МПа.

Параметри діаграми для першого зразка:

1. Параметри лінійної моделі $a=0.0085$, $b=0.80$ МПа;
2. Параметри діаграми $s_2=0.402$ мм, $\Delta s=0.085$ мм.
3. Остаточний зсув $s_{ult} = 0.487$ мм.

Параметри діаграми для другого зразка:

1. Параметри лінійної моделі $a=0.0114$, $b=0.90$ МПа;
2. Параметри діаграми $s_2=0.301$ мм, $\Delta s=0.040$ мм.
3. Остаточний зсув $s_{ult} = 0.341$ мм.

Загальний вигляд діаграм наведено на рисунку. Варто зазначити, що діаграми будуть мати однаковий вигляд для зразків однакових параметрів і різною довжиною.

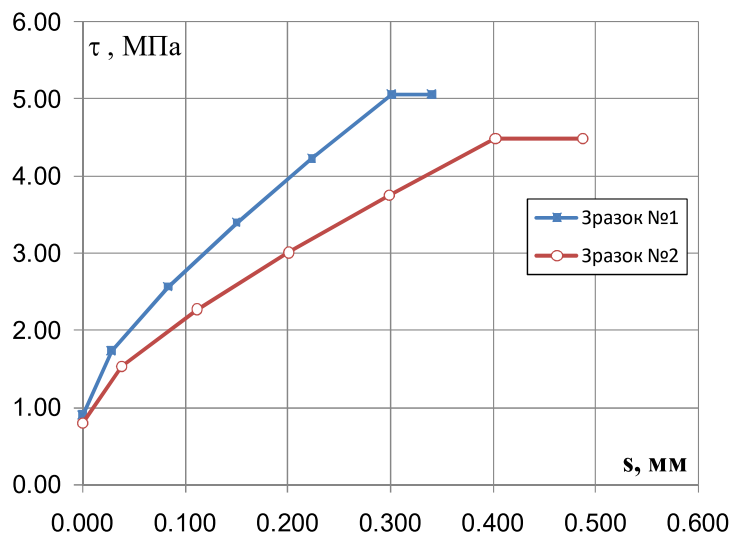


Рисунок. Діаграми залежності середніх дотичних напружень зсуву від деформацій зсуву



Отримані значення граничного проковзування знаходяться в межах 0.5–0.7 мм. Це узгоджується з експериментальними даними для висхідної гілки діаграми « $\tau - s$ » та відповідає точці s_1 згідно з рекомендаціями норм [8; 9] для умов нормального зчеплення, що підтверджує коректність моделювання роботи арматури на стадії ефективного опору, без урахування залишкового тертя зруйнованого бетону. Менші значення деформацій пояснюються прийнятою гіпотезою про спільну роботу матеріалів до моменту розриву арматури, що виключає стадію повного зрізу бетонних шпонок, характерну для проковзувань у 1.0–2.5 мм.

Висновки і перспективи досліджень

Отримані аналітичні вирази дозволяють будувати фізично обґрунтовані діаграми зсуву « $\tau - s$ » для різних умов зчеплення арматури з бетоном з урахуванням особливостей передачі зусиль у зоні анкерування. Наведено приклади формування таких діаграм за розробленою моделлю, що підтверджує можливість її практичного застосування.

Запропоновані діаграми доцільно використовувати при моделюванні параметрів зчеплення арматури з бетоном методом скінчених елементів, зокрема в задачах розрахунку піддатливості стиків залізобетонних конструкцій, де опис взаємодії «арматура–бетон» має визначальний вплив на результати аналізу.

У подальших дослідженнях передбачається виконати верифікацію отриманих діаграм на основі експериментальних даних інших дослідників, зокрема результатів випробувань на висмикування арматури з бетону [7; 11; 12; 13]. На наступному етапі планується визначення параметрів зчеплення петльових стиків та проведення експериментальної перевірки запропонованих методів їх розрахунку, що дозволить оцінити точність і межі використання розробленого підходу.

1. Бабич Є. М., Бабич О. Є., Чапук О. С. Визначення напружень зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю. *Будівельні конструкції* : зб. наук. праць. Київ : ДП НДІБК, 2011. Вип. 74. Кн. 1. С. 285–292.
2. Ромашко О. В., Ромашко В. Н. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 179. С. 92–99.
3. Bernander K. G. An investigation of bond by means of strain measurements in high tensile bars, embedded in long cylindrical pullout specimens. *Rilem Symposium on Bond And Crack Formation in Reinforced Concrete*. 1957. Vol. 1. P. 203–214.
4. Amstutz E. Uber das Zumptnwirken von Bewehrung und Beton in Stahlbetonbauwerken. *Bauingenieur*. 1955. Heft 10. 140 p.
5. Bichara A. Etude du probleme del'adherence dans le beton arme. *Cahier du C.S.T.B*. 1951. № 117/127.
6. Кочкаръов Д. В.

Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам : монографія. Рівне : О. Зень, 2015. 383 с. ISBN 978-617-601-125-5. **7.** R. Eligehausen, E. P. Popov, and V. V. Bertero. Local Bond Stress–Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations. *Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center*. University of California, Berkeley, 1983. **8.** Comité Euro-International du Béton (CEB). *CEB-FIP Model Code 1990: Design Code*. Thomas Telford, London, 1993. **9.** FIB (Fédération internationale du béton). *FIB Model Code for Concrete Structures*. 2010. Ernst & Sohn, Berlin, 2013. **10.** K. Lundgren. Bond between ribbed bars and concrete. Part 1. Modified model. *Magazine of Concrete Research*. 2005. Vol. 57, no. 7. Pp. 371–382. **11.** K. Lundgren. Bond between ribbed bars and concrete. Part 2. The effect of corrosion. *Magazine of Concrete Research*. 2005. Vol. 57, no. 7. Pp. 383–395. **12.** J. Zhao and J. Lin. Bond stress–slip behavior of deformed bars in concrete. *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26, no. 6. Pp. 749–760. **13.** A. D. Červenka, L. Jendele, and J. Červenka. Bond-slip model for reinforced concrete structures. *Structural Concrete*. 2014. Vol. 15, no. 1. Pp. 43–54. **14.** EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1. *General Rules and Rules for Buildings*. CEN, Brussels, 2004. **15.** A. H. Mattock. Effectiveness of Loop Anchorages for Reinforcement in Precast Concrete Members. *PCI Journal*. 1994. Vol. 39, no. 6. Pp. 54–63.

REFERENCES:

1. Babych Ye. M., Babich O. Ye., Chapiuk O. S. Vyznachennia napruzhen zcheplennia z betonom armatury serpopodibnoho profiliiu. *Budivelni konstruktsii* : zb. nauk. prats. Kyiv : DP NDIBK, 2011. Vyp. 74. Kn. 1. S. 285–292. **2.** Romashko O. V., Romashko V. N. Shchodo otsiniuvannia zcheplennia armatury z betonom. *Zb. naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*. 2018. Vyp. 179. S. 92–99. **3.** Bernander K. G. An investigation of bond by means of strain measurements in high tensile bars, embedded in long cylindrical pullout specimens. *Rilem Symposium on Bond And Crack Formation in Reinforced Concrete*. 1957. Vol. 1. P. 203–214. **4.** Amstutz E. Uber das Zummtnwirken von Bewehrung und Beton in Stahlbetonbauwerken. *Bauingenieur*. 1955. Heft 10. 140 p. **5.** Bichara A. Etude du probleme del'adherence dans le beton arme. *Cahier du C.S.T.B*. 1951. № 117/127. **6.** Kochkarov D. V. Neliniinyi opir zalizobetonnykh elementiv i konstruktsii sylovym vplyvam : monohrafiia. Rivne : O. Zen, 2015. 383 s. ISBN 978-617-601-125-5. **7.** R. Eligehausen, E. P. Popov, and V. V. Bertero. Local Bond Stress–Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations. *Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center*. University of California, Berkeley, 1983. **8.** Comité Euro-International du Béton (CEB). *CEB-FIP Model Code 1990: Design Code*. Thomas Telford, London, 1993. **9.** FIB (Fédération internationale du béton). *FIB Model Code for Concrete Structures*. 2010. Ernst & Sohn, Berlin, 2013. **10.** K. Lundgren. Bond between ribbed bars and concrete. Part 1. Modified model. *Magazine of Concrete Research*. 2005. Vol. 57, no. 7. Pp. 371–382. **11.** K. Lundgren. Bond between ribbed bars and concrete. Part 2. The effect of corrosion. *Magazine of Concrete Research*. 2005. Vol. 57, no. 7. Pp. 383–395. **12.** J. Zhao and J. Lin. Bond stress–slip behavior of deformed bars in concrete. *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26, no. 6. Pp. 749–760. **13.** A. D. Červenka, L. Jendele, and J. Červenka. Bond-slip model for reinforced concrete structures. *Structural Concrete*. 2014. Vol. 15, no. 1. Pp. 43–54. **14.** EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1. *General Rules and Rules for Buildings*. CEN, Brussels, 2004.



15. A. H. Mattock. Effectiveness of Loop Anchorages for Reinforcement in Precast Concrete Members. *PCI Journal*. 1994. Vol. 39, no. 6. Pp. 54–63.

Hryshchenko O. D. [1; ORCID ID: 0000-0002-4365-4335],

Post-graduate Student,

Kochkarov D. V. [1; ORCID ID: 0000-0002-4525-7315],

Doctor of Engineering, Professor

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

ANALYTICAL MODEL OF REINFORCEMENT-CONCRETE BONDING FOR CALCULATION OF LOOP STICKS FLEXIBILITY

The paper addresses the problem of modeling the bond between reinforcement and concrete as one of the key factors governing the deformational behavior of reinforced concrete structures, particularly in the analysis of loop joints, whose compliance is largely determined by the properties of the reinforcement anchorage zone. It is shown that existing code-based and empirical bond models are generally based on prescribed bond stress–slip diagrams and do not explicitly account for the direct influence of the level of normal stresses in the reinforcement, which limits their applicability in the numerical modeling of joints.

The objective of this study is to develop an analytical bond law for reinforcement–concrete interaction that establishes a functional relationship between bond shear stresses, relative slip of the reinforcement, and normal stresses in the reinforcement. The proposed approach makes it possible to construct physically substantiated bond–slip diagrams over the entire range of reinforcement behavior during pull-out.

The proposed model is based on the established relationship between average bond shear stresses and normal stresses in the reinforcement. At the initial stage of behavior, a linear relationship between bond shear stresses and normal stresses in the reinforcement is used to describe the stress–strain state. In addition, the ultimate stage of behavior associated with reinforcement slip in concrete is considered in detail. Various options for defining bond–slip diagrams for relatively short and long bars anchored in concrete prisms are examined. Examples of constructing bond–slip diagrams for typical classes of concrete and reinforcement are presented, demonstrating the applicability of the proposed relationships in the finite element method, in particular within engineering analysis software packages. This issue requires further detailed investigation in future studies. The obtained results can be applied to the evaluation of the

compliance of loop joints and to the improvement of methods for their analysis.

Further research should be focused on the verification of the proposed bond–slip diagrams against experimental pull-out test data, as well as on the experimental validation of calculation methods for loop joints using the developed bond model.

Keywords: shear diagrams; reinforcement-concrete adhesion models; shear deformations; adhesion parameters; average shear adhesion stresses.

Отримано: 17 червня 2025 року
Прорецензовано: 02 вересня 2025 року
Прийнято до друку: 25 вересня 2025 року