

УДК 624.012.35:620.173/174

ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ

Старш. викл. О. В. Ромашко, канд. техн. наук В. М. Ромашко (НУВГіП, м. Рівне)

К ОЦЕНИВАНИЮ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Старш. преп. Е. В. Ромашко, канд. техн. наук В. Н. Ромашко

TO EVALUATION OF BOND BETWEEN REINFORCEMENT AND CONCRETE

PhD. tehn. V. Romashko, Senior Lecturer O. Romashko

Проаналізовано найважливіші недоліки відомих способів оцінювання міцності зчеплення арматури з бетоном. Основну увагу зосереджено на оцінюванні зчеплення середніми дотичними напруженнями. Обґрунтовано, чому лінійна залежність вказаних напружень не здатна охопити процеси зчеплення арматури з бетоном у стадії експлуатації залізобетонних елементів. Запропоновано універсальну залежність середніх дотичних напружень для оцінювання зчеплення арматури з бетоном на будь-якій стадії деформування елементів.

Ключові слова: залізобетонні елементи, зчеплення арматури з бетоном, середні напруження зчеплення, стадії деформування.

Проанализированы важнейшие недостатки известных способов оценивания прочности сцепления арматуры с бетоном. Основное внимание сосредоточено на оценивании сцепления средними касательными напряжениями. Обосновано, почему линейная зависимость указанных напряжений не способна охватить процессы сцепления арматуры с бетоном в стадии эксплуатации железобетонных элементов. Предложена универсальная зависимость средних касательных напряжений для оценивания сцепления арматуры с бетоном на любой стадии деформирования элементов.

Ключевые слова: железобетонные элементы, сцепление арматуры с бетоном, средние напряжения сцепления, стадии деформирования.

The importance of addressing the issue of coupling reinforcement with concrete for the modern theory of reinforced concrete is substantiated. The most important drawbacks of the known

methods for evaluating the bond strength of reinforcement to concrete have been analyzed. Particular attention is focused on bond estimating by average tangential stresses. It is substantiated why the linear dependence of these stresses on normal stresses in the reinforcement is not able to cover the processes of reinforcement bonding with concrete in the stage of reinforced concrete elements exploitation. The features of the stress state of the contact layer of concrete when pulling the reinforcing bar out of concrete at different stages of deformation of any reinforced concrete element are indicated. A universal dependence of the average tangential stresses for estimating the reinforcement bond to concrete at any stage of elements deformation is proposed. It is noted that the level of the average tangential tension of the clutch depends not only on the level of the stresses in the reinforcement, but also on the relative area of its active adhesion to the concrete. On the basis of theoretical and experimental values of the average tangential bonding stresses comparison, a statistical evaluation of the obtained dependence was made. The statistical analysis of the obtained dependence of the adhesion of reinforcing rods of different profiles and diameters with concrete of different classes, performed on the results of numerous experimental studies of domestic and foreign scientists, has shown the legitimacy of its use in practical calculations. The area of use of reinforcement bond with concrete average stresses dependence is defined. It seeks to clarify and significantly simplify the calculation of the crack strength of reinforced concrete elements, especially taking into account the level formation of normal cracks.

Keywords: reinforced concrete elements, reinforcement bond to concrete, average bond stress, deformation stage.

Вступ. Питання зчеплення арматури з бетоном завжди були та залишаються нині одними з найважливіших у теорії залізобетону. Адже загальновідомо, що разом із конструктивними заходами анкерування зчеплення забезпечує сумісну роботу арматури і бетону в конструкціях, відображуючи сутність самого залізобетону.

Особливої вагомості набувають питання зчеплення арматури з бетоном у розрахунках залізобетонних елементів за тріщиностійкістю, а також у їхньому конструюванні при визначенні довжини анкерування стержнів. Окремо слід наголосити на тому, що розрахунок попередньо напружених елементів та елементів зі змішаним армуванням, навіть за спрощеними методиками, як і їхнє конструювання, взагалі неможливо здійснити без урахування зчеплення арматури з бетоном.

Загалом на сьогодні запропоновано численні моделі, теорії та способи оцінювання зчеплення арматури з бетоном. Однак, не дивлячись на результати різноманітних експериментально-теоретичних досліджень, згадані моделі,

теорії та способи [1–5] у своїй переважній більшості залишаються доволі складними та малопридатними для використання в інженерних розрахунках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ранні дослідження спрямовувалися переважно на оцінювання міцності зчеплення арматури з бетоном, що було вкрай важливим для розрахунку анкерування арматурних стрижнів. За критерії міцності зчеплення зазвичай приймалися:

- середні значення дотичних напружень зчеплення уздовж умовної циліндричної поверхні арматурного стрижня в граничній стадії деформування τ_{bmu} [6];

- зусилля, що відповідають початку зсуву незавантаженого кінця стрижня $\sigma_{sb} A_s$ чи загальному руйнуванню зразка при висмикуванні арматури з бетону $\sigma_{su} A_s$ [1];

- коефіцієнт повноти епюри напружень, що виникають у стрижні по довжині його закладання в бетоні від дії зовнішнього зусилля в граничній стадії де-

формування $\alpha = \int_0^l \sigma_s(x) \cdot dx / (\sigma_y \cdot l)$ [7];

- максимальні (пікові) дотичні напруження зчеплення τ_{bu} при критичному зміщенні арматури відносно бетону s_1 на діаграмі $\tau_b - s$ [2, 8].

І хоч кожному з наведених методів властиві свої певні недоліки, для них всіх характерним є один спільний недолік – обмеженість застосування перерахованих критеріїв зчеплення лише для граничної стадії деформування залізобетонних елементів.

Помітне розширення сучасних досліджень зчеплення арматури з бетоном значною мірою пов'язується з тріщиностійкістю залізобетонних елементів загалом і з рівнями утворення в них тріщин зокрема [4, 9]. За таких обставин виникає потреба в оцінюванні зчеплення арматури з бетоном не тільки в граничній, але й експлуатаційній стадії деформування залізобетонних елементів. Переважна більшість дослідників подібне завдання пропонує вирішувати за допомогою діаграми «дотичні напруження зчеплення – зміщення арматури відносно бетону» [4, 5]. Однак опис зазначеної діаграми єдиною аналітичною функцією і досі залишається доволі проблематичним.

Відомі також спроби окремих дослідників оцінювати зчеплення арматури з бетоном за допомогою середніх дотичних напружень зчеплення уздовж поверхні арматурного стрижня τ_{bmi} на будь-якій стадії деформування залізобетонного елемента [9]. Однак лінійна функція, запропонована для обчислення зазначених напружень, викликає цілу низку застережень:

- за відсутності нормальних напружень в арматурному стрижні $\sigma_{si} = 0$, середні дотичні напруження зчеплення не дорівнюють нулю ($\tau_{bmi} \neq 0$);

- залежність не здатна описати процеси зчеплення до утворення тріщин та після початку зсуву незавантаженого кінця

арматурного стрижня;

- функція є чисто емпіричною та не може відобразити сутності фізичних закономірностей зчеплення арматури з бетоном на проміжних стадіях деформування залізобетонного елемента.

Таким чином, у теорії та практиці розрахунку залізобетонних елементів зчеплення арматури з бетоном пропонується оцінювати складними математичними залежностями $\tau_b - s$, визначальні параметри яких, однак, необхідно встановлювати експериментальним шляхом. При цьому у більшості випадків не враховується ні вид арматури, ні геометричні характеристики її перерізу, ні вид бетону тощо. Крім того, запропоновані дослідниками моделі, теорії і закони, методи та способи оцінювання зчеплення арматури з бетоном розрізняються між собою не тільки функціонально, але й формально. Обумовлено це як суб'єктивними, так і об'єктивними причинами, у тому числі впливом великої кількості силових, деформаційних, конструктивних і технологічних факторів на закономірності зчеплення арматури з бетоном. Інакше кажучи, оцінювання зчеплення арматури з бетоном через неминуче інтегрування залежності $\tau_b - s$ уздовж ділянки закладання арматурного стрижня й надалі залишається доволі складним завданням навіть при використанні спеціального програмного забезпечення.

Запропонована в роботі [9] лінійна функція середніх напружень зчеплення арматури з бетоном через вищенаведені недоліки теж не може бути рекомендована для інженерних розрахунків. Цілком очевидно, що охопити всі стадії деформування залізобетонного елемента може лише нелінійна функція середніх напружень зчеплення арматури з бетоном.

Визначення мети та задачі досліджень. Дані дослідження спрямовані на розроблення інженерного способу оцінювання зчеплення арматури з бетоном на будь-якій стадії деформування

залізобетонних елементів. З усіх вищеперахованих методів оцінювання зчеплення арматури з бетоном перевага віддана середнім дотичним напруженням зчеплення уздовж умовної циліндричної поверхні арматурного стрижня. Основним завданням даних досліджень є отримання універсальної нелінійної залежності зазначених напружень від нормальних напружень в арматурі при висмикуванні її з бетону.

Основна частина досліджень.

Кожному з вищезгаданих методів оцінювання зчеплення арматури з бетоном властиві свої недоліки, переважно за якими вони і розрізняються між собою. Однак спільним для цих методів є те, що всі вони так чи інакше спрямовані на визначення зусилля зчеплення арматури з бетоном на певній стадії деформування залізобетонного елемента.

Безперечно, найпростіше зусилля зчеплення можна визначити на будь-якій стадії деформування, якщо відома функція середніх дотичних напружень зчеплення арматури з бетоном. Для встановлення її характеру розглянемо схему зміни та особливості напруженого стану контактної шару бетону та арматурного стрижня при висмикуванні його з бетону (рис. 1).

I – умовно-пружна стадія. При невеликому зусиллі бетон і арматура деформуються майже пружно: епюра нормальних напружень у стрижні близька до трикутної, максимальні дотичні напруження зчеплення $\tau_{b\max 2}$ виникають поблизу завантаженого кінця бетонного зразка, а їхні середні значення можна прийняти наближено рівними $\tau_{bm^2} = \tau_{b\max 2} / 2$.

II – пружно-пластична стадія. Поява помітних пластичних деформацій у бетоні призводить до викривлення епюри нормальних напружень в арматурі, максимальні дотичні напруження зчеплення $\tau_{b\max 1^2}$ залишаються близькими до завантаженого

кінця бетонного зразка, але коефіцієнт повноти епюри зазначених напружень $\tau_{bm^2} / \tau_{b\max 2^1}$ починає зростати.

III – стадія зсуву. При значних зміщеннях завантаженого кінця стрижня можуть мати місце не тільки пластичні деформації бетону під його виступами, але й часткові руйнування бетону в контактному шарі. Максимальні дотичні напруження зчеплення $\tau_{b\max 1^2}$ поступово зміщуються до незавантаженого кінця бетонного зразка при постійному зростанні коефіцієнта повноти епюри зазначених напружень $\tau_{bm^2} / \tau_{b\max 2^1}$.

IV – стадія руйнування. Найменше зростання зусилля супроводжується проковзуванням арматурного стрижня по всій його довжині.

Розглянута схема характерна для випадку, коли деформації арматури залишаються пружними до руйнування бетонного зразка без виникнення в ньому тріщин. Деформування ж залізобетонних елементів з тріщинами (з розтягнутим бетоном) відбувається за дещо іншою схемою. Для них основною є друга багаторівнева стадія утворення тріщин з певним наближенням до третьої стадії лише на останньому рівні їхнього розвитку.

Враховуючи сказане, середні дотичні напруження зчеплення арматури з бетоном на проміжних стадіях τ_{bm} будемо описувати аналогічно до граничної стадії f_{bd} за відомою формулою

$$\tau_{bm} = \sigma_s \cdot \varnothing_s / (4 \cdot l_i), \quad (1)$$

де σ_s – найбільші напруження в арматурі на ділянці її зчеплення з бетоном;

\varnothing_s – діаметр арматурного стрижня;

l_i – ділянка активного зчеплення арматури з бетоном.

Нескладно помітити, що рівень середніх дотичних напружень зчеплення

$$\tau_{bm} / f_{bd} = \sigma_s / \sigma_y \cdot l_s / l_i \quad (2)$$

залежить не тільки від рівня крайових напружень в арматурі, але й від відносної ділянки активного зчеплення, яку завдяки обробці експериментальних даних [5, 7, 8,

10–14] рекомендується обчислювати за виразом

$$l_i / l_s \approx (\sigma_s / \sigma_y)^{1/\eta_s}, \quad (3)$$

де σ_y – граничні напруження в арматурі ($\sigma_y = f_y$);

l_s – ділянка активного зчеплення арматури з бетоном у граничній стадії;

$1/\eta_s$ – параметр інтенсивності зчеплення.

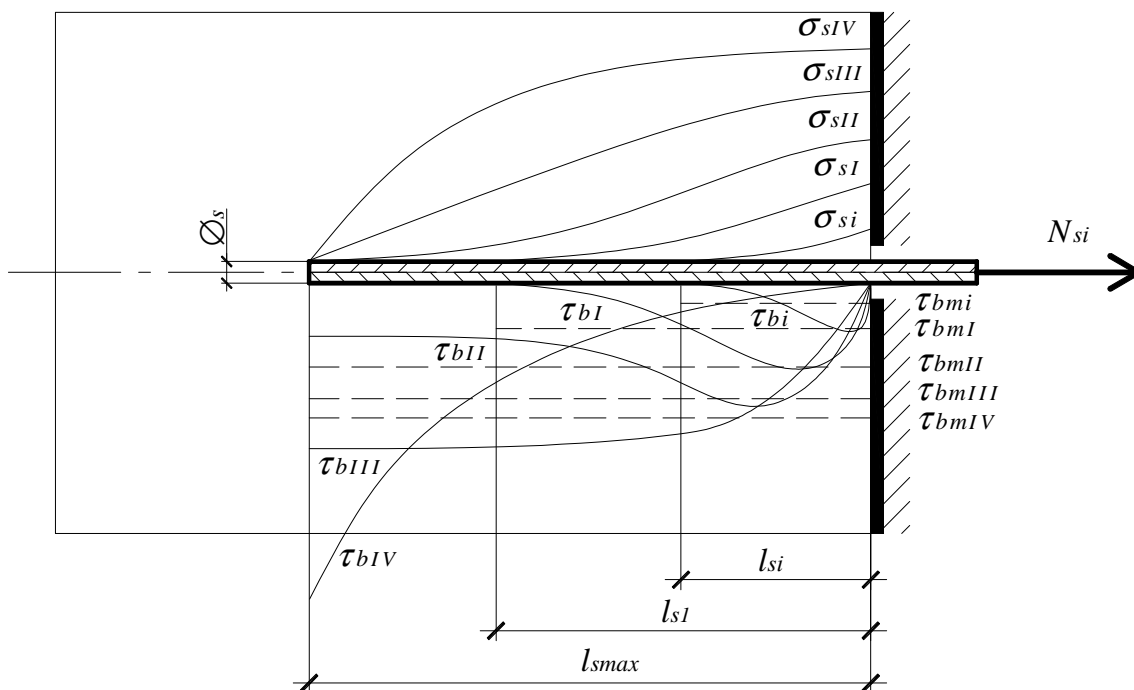


Рис. 1. Схема зміни напруженого стану контактної зони бетону та арматурного стрижня при висмикуванні його з бетону

За результатами обробки експериментальних даних, наведених на рис. 2, 3, коефіцієнт η_s рекомендується приймати рівним: η_1 – для арматури періодичного профілю, $6 \cdot \eta_1$ – для арматури гладкого профілю.

З урахуванням граничних значень середніх напружень зчеплення

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ntk} \quad (4)$$

універсальна залежність середніх дотичних

напружень зчеплення арматури з бетоном набуде остаточного вигляду

$$\tau_{bm} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ntk} \cdot (\sigma_s / \sigma_y)^{1-1/\eta_s}, \quad (5)$$

де η_2 – коефіцієнт, що враховує вплив діаметра арматури [3].

Статистичний аналіз отриманої залежності (5) з оцінювання зчеплення арматури з бетоном, наведений у таблиці, свідчить про правомірність її використання в практичних розрахунках.

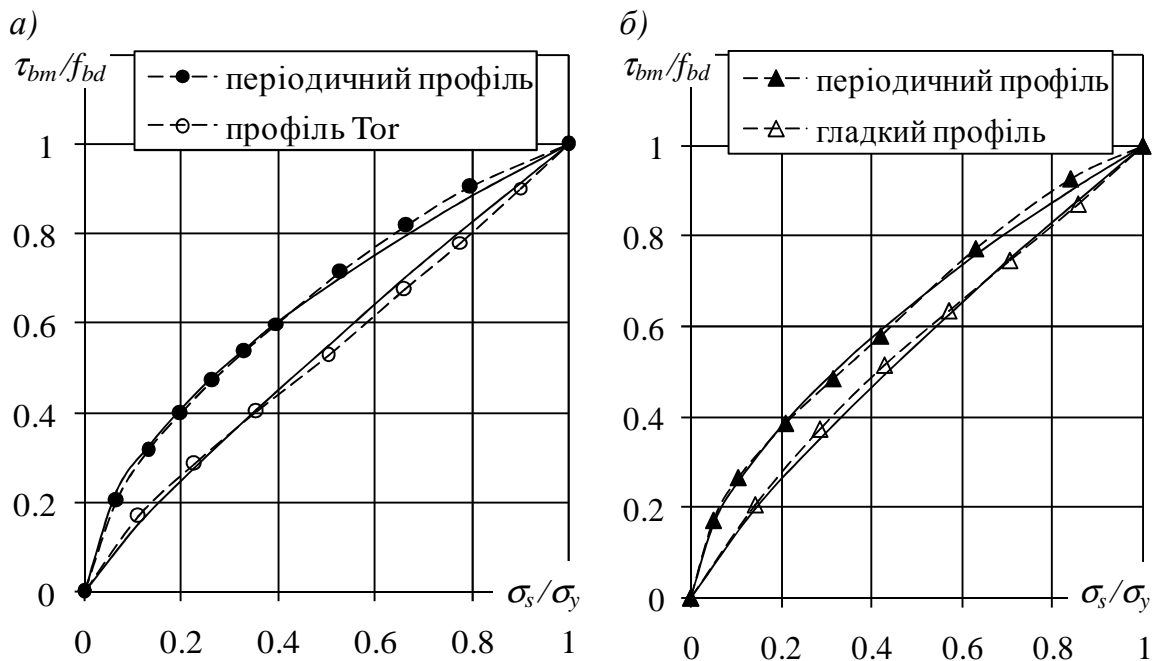


Рис. 2. Теоретичні (—) та експериментальні (---) залежності середніх дотичних напружень зчеплення від нормальних напружень в арматурі за дослідями:
 а – Amstutz E. [11]; б – Bernander K. [12]

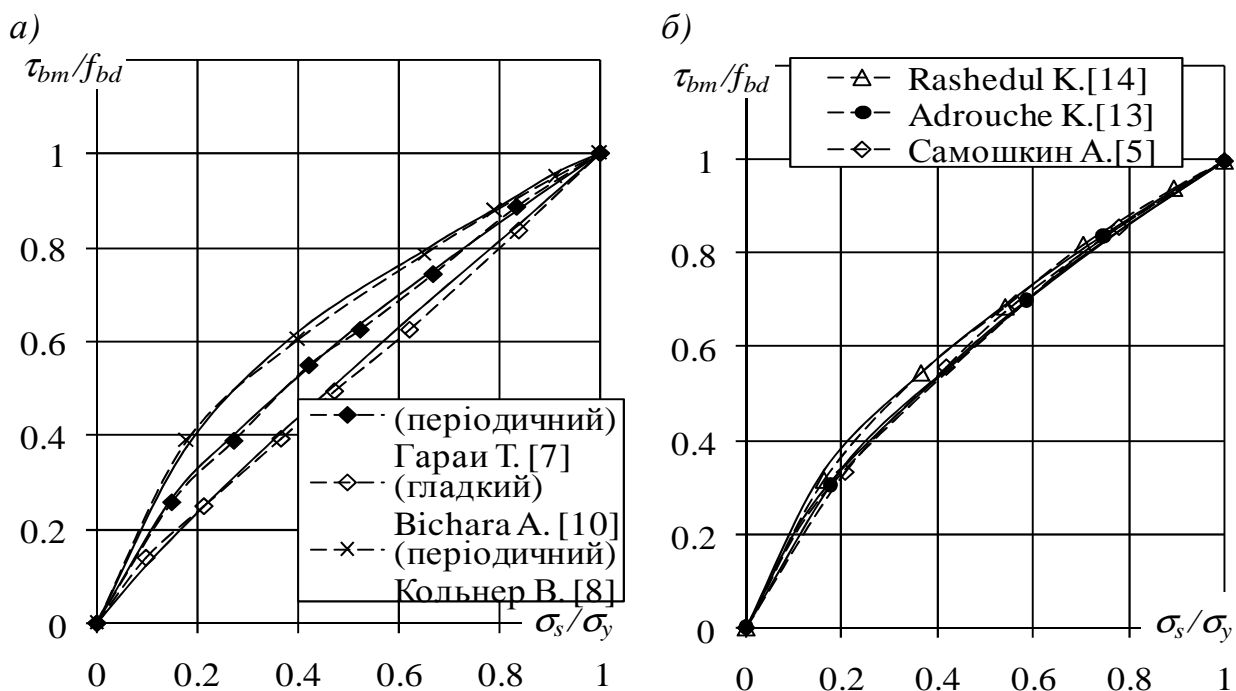


Рис. 3. Теоретичні (—) та експериментальні (---) залежності середніх дотичних напружень зчеплення від нормальних напружень в арматурі:
 а – різного профілю; б – періодичного профілю

Порівняння теоретичних і дослідних значень середніх дотичних напружень зчеплення арматури з бетоном

Автори досліджень	Рік	Профіль та діаметр арматури, мм	Відхилення від дослідних даних,		
			Δ	σ	$\nu, \%$
Bichara A. [10]	1951	гладкий, 39	1,01	5,97	5,94
Amstutz E. [11]	1955	тор, 30	1,00	4,71	4,71
		періодичний, 30	0,99	3,22	3,25
Bernander K. [12]	1957	гладкий, 15	1,02	2,59	2,55
		періодичний, 16	1,01	2,26	2,25
Гараи Т. [7]	1959	періодичний, 20	0,99	1,34	1,35
Кольнер В. [8]	1965	періодичний, 20	1,00	1,73	1,73
Adrouche K. [13]	1987	періодичний, 16	0,995	2,00	2,01
Rashedul K. [14]	2014	періодичний, 20	0,994	2,29	2,30
Самошкин А. [5]	2017	періодичний, 16	0,998	2,28	2,29

Висновки. Виходячи з вищевикладеного, оцінювання зчеплення арматури з бетоном у практичних розрахунках рекомендується виконувати за допомогою нелінійної функції середніх дотичних

напружень зчеплення. Це дозволить не тільки уточнити, але й суттєво спростити розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів [15], особливо з урахуванням рівнів утворення тріщин.

Список використаних джерел

1. Астрова, Т. И. Об оценке прочности сцепления стержневой арматуры с бетоном [Текст] / Т. И. Астрова // Трещиностойкость и деформативность обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций; [под ред. А. А. Гвоздева]. – М. : Стройиздат, 1965. – С. 223-270.
2. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном [Текст] / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с.
3. Eurocode-2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Building: EN 1992-1-1 [Final Draft, December, 2004], Brussels: CEN, 2004. – 226 p.
4. Аналитическая модель сцепления и нелинейная податливость арматурных связей при раскрытии дискретных трещин в железобетонных конструкциях [Текст] / В. И. Колчунов [и др.] // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2016. – Вип. 32. – С. 183-196.
5. Самошкин, А. С. Математическая модель деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия его структурных компонентов [Текст] / А. С. Самошкин, В. М. Тихомиров // Вычислительные технологии. – 2017. – Т.22. – Спец. вып.1. – С. 75-86.
6. Abrams, D. A. Studies of bond between concrete and steel [Text] / D. A. Abrams // Proc. ASTM. – 1925. – V.25. – P. 2-10.

7. Гараи, Т. Исследование анкеровки арматуры в бетоне [Текст] / Т. Гараи // Исследование прочности элементов железобетонных конструкций: сб. тр. НИИЖБ. – М. : Госстройиздат, 1959. – Вып. 5. – С. 78-109.
8. Кольнер, В. М. Сцепление с бетоном и прочность заделки стержневой арматуры периодического профиля [Текст] / В. М. Кольнер [и др.] // Бетон и железобетон. – 1965. – № 11. – С. 15–19.
9. Кочкаръов, Д. В. Про середні напруги зчеплення арматури з бетоном [Текст] / Д. В. Кочкаръов // Вісник НУВГП (тех. науки). – 2014. – Вип. 1(65). – С. 176-185.
10. Bichara, A. Etude du probleme de l'adherence dans le beton arme [Text] / A. Bichara // Cahiere du Centre Scientifique et Technique du Batiment. – Paris: CSTB, 1951. – P. 117-127.
11. Amstutz, E. Über das Zusammenwirken von Beton und Bewehrung in Stahlbetonbauwerken [Text] / E. Amstutz // Bauingenieur, Vol. 30, Heft 10, 1955. – P. 353-359.
12. Bernander, K. G. An investigation of bond by means of strain measurements in high tensile bars embedded in long cylindrical pull-out specimens [Text] / K. G. Bernander // R.I.L.E.M. Symposium on Bond and Crack Formation in Reinforced Concrete, Vol.1, Stockholm, 1957. – P. 203-210.
13. Adrouche, K. Influence of the constitutive parameters for steel-concrete association on bond strength under slow cyclic loading [Text] / K. Adrouche, M. Lorrain // Materials and Structures, RILEM, vol. 20, 1987. – P. 315-320.
14. Rashedul, K. Bond stress behavior between concrete and steel rebar: Critical investigation of pull-out test via Finite Element Modeling [Text] / K. Rashedul, I. Mashfiqul // International Journal of Civil and Structural Engineering, Vol. 5, No1, 2014. – P. 80-90.
15. Ромашко, В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону [Текст] : монографія / В. М. Ромашко. – Рівне : О. Зень, 2016. – 424 с.

Ромашко Олена Василівна, старший викладач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне.

Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василь Миколайович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне. Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Ромашко Елена Васильевна, старший преподаватель кафедры основ архитектурного проектирования, конструирования и графики Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно).

Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры основ архитектурного проектирования, конструирования и графики Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно). Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Romashko Olena, Senior Lecturer of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (096) 131-99-17.

E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko Vasyl, Ph. D. in Engineering, associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne).

Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Статтю прийнято 25.10.2018 р.