

УДК 624.012.35:620.173/174

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ

GENERAL MODEL OF ADHESION REINFORCEMENT OF CONCRETE

Ромашко О.В., ст. викладач, ORCID: 0000-0003-3353-2268, **Ромашко В.М.**, д.т.н., доц., ORCID: 0000-0003-3448-7489 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Журавський О.Д.**, к.т.н., доц., ORCID ID: 0000-0001-7065-3312 (Київський національний університет будівництва і архітектури)

Romashko O.V., senior lecturer, **Romashko V.M.**, D. Sc. (Tech.), Associate Professor (National University of Water Management and Nature Recourses Use, Rivne), **Zhuravskiy O.D.**, PhD (Tech.), Associate Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture)

Розроблені основні положення узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном. Визначені найважливіші параметри щодо визначення рівня їх взаємодії на будь-якій стадії деформування залізобетонного елемента. Запропоновано критерій порушення зчеплення арматури з бетоном.

The basic provisions of the generalized adhesion model of reinforcement with concrete have been developed, which remains valid for any deformation stage of reinforced concrete elements. It differs from others in relative simplicity in that it is aimed at meeting the basic requirements of design engineers. This model is based on the function of the universal parameter - the efforts of adhesion the reinforcing rod with concrete along its conditional cylindrical surface. It is proposed to determine these efforts by means of a nonlinear function of the average adhesion stresses of reinforcement with concrete in the areas between the cracks. It is substantiated why the limit values of adhesion forces in the area between normal cracks remain unchanged and equal to the limit force in the stretched concrete. The most important parameters for tracing the adhesion level of reinforcement with concrete at any deformation stage of reinforced concrete element are determined. The violation of the reinforcement with concrete interaction is suggested to be fixed with the help of the strength extreme criterion of the stretched concrete.

The classification and the critical analysis of existing models of reinforcement with concrete adhesion mathematical solutions of their contact interaction schemes are given. The processes of formation and development of normal cracks in reinforced concrete elements are proposed to regulate the determining parameters of reinforcement with concrete adhesion.

The basis of the performed researches is the mathematical modeling of parameters of reinforcing bar with concrete adhesion along its conditional cylindrical surface.

Ключові слова:

Залізобетон, модель, зчеплення, арматура, бетон, критерій, тріщини
Reinforced concrete, model, adhesion, reinforcement, concrete, criterion, cracks

Вступ. Загальну теорію зчеплення арматури з бетоном, яка задовольняла б основним вимогам інженерів-проектувальників, досі так і не побудовано. І обумовлена існуюча ситуація результатами численних досліджень [1, 2, 3, 4], які засвідчують, що зчеплення арматури з бетоном залежить від дуже великої кількості різних факторів. Врахувати їх спільний вплив в моделюванні взаємодії арматури з бетоном вкрай складно, а інколи – навіть неможливо. Тому й не дивно, що методи та алгоритми розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій, регламентовані у вітчизняних та зарубіжних нормативних документах [5, 6], практично повністю ігнорують взаємодію арматури з бетоном.

Загалом всі відомі на сьогодні дослідження зчеплення арматури з бетоном можна умовно розділити за чотирма наступними напрямками:

- виявлення основних параметрів, що найбільше впливають на міцність зчеплення арматури з бетоном [2];
- вивчення закономірностей та особливостей взаємних зміщень бетону і арматури [1,4];
- створення та розбудова технічної теорії зчеплення арматури з бетоном [4];
- моделювання зчеплення арматури з бетоном за допомогою числових методів [7].

Однак, неоднозначність результатів, отриманих в зазначених роботах, та відсутність універсальної теорії зчеплення арматури з бетоном спонукають до продовження досліджень з її побудови. І особливу роль у вирішенні окресленої проблеми варто було б відвести узагальненій моделі зчеплення арматури з бетоном.

Аналіз останніх досліджень. Відомі на сьогодні результати досліджень, спрямовані на моделювання взаємодії арматури з бетоном, не тільки суттєво відрізняються між собою, але й часто вступають у взаємне протиріччя. Зазначена ситуація є цілком природною і зрозумілою, оскільки обумовлена результатами експериментальних досліджень, що мають відмінні: форми та розміри зразків за різних видів та класів бетону і арматури; схеми армування та умови ущільнення бетону, а отже і характер формування контактного шару; технологічні особливості догляду за бетоном; схеми та умови випробування дослідних зразків; гіпотези та передумови щодо теоретичних вишукувань, тощо.

Безперечно, що класифікація моделей зчеплення арматури з бетоном дозволила б не тільки систематизувати самі дослідження, але й певним чином

упорядкувати їх результати. Зазначені моделі можна було б умовно розділити за багатьма ознаками, основними серед яких все ж таки слід вважати:

- масштаб та структуру моделі;
- подання (представлення) бетону та арматури в їх контактній взаємодії;
- схеми випробувань та характер руйнування бетону на межі контакту «бетон-арматура»;
- математичні рішення схем взаємодії арматури з бетоном.

Особливої уваги заслуговує остання ознака, за якою всі моделі зчеплення арматури з бетоном слід умовно розділити на аналітичні та числові. Загалом аналітичні моделі представляють у вигляді математичних рівнянь (формул), що характеризують функціональну залежність результатів досліджень від певних вихідних факторів чи параметрів. За характером математичних залежностей моделі зчеплення можна умовно розділити на: лінійні (пружні), нелінійні (пружнопластичні), диференційовані і варіаційні.

Найбільш широке застосування в дослідженнях зчеплення арматури з бетоном знайшли пружнопластичні моделі. Нині їх представляють переважно степеневими [8], поліноміальними [9], показниковими і експоненційними [10], дробовими [11], логарифмічними [4], тригонометричними залежностями [12], а найчастіше сплайн-функціями [2]. Але результати експериментальних досліджень показують, що епіюра напружень зчеплення арматури з бетоном уздовж ділянки їх контакту постійно змінюється (рис. 1), а тому не може бути описана єдиною функцією.

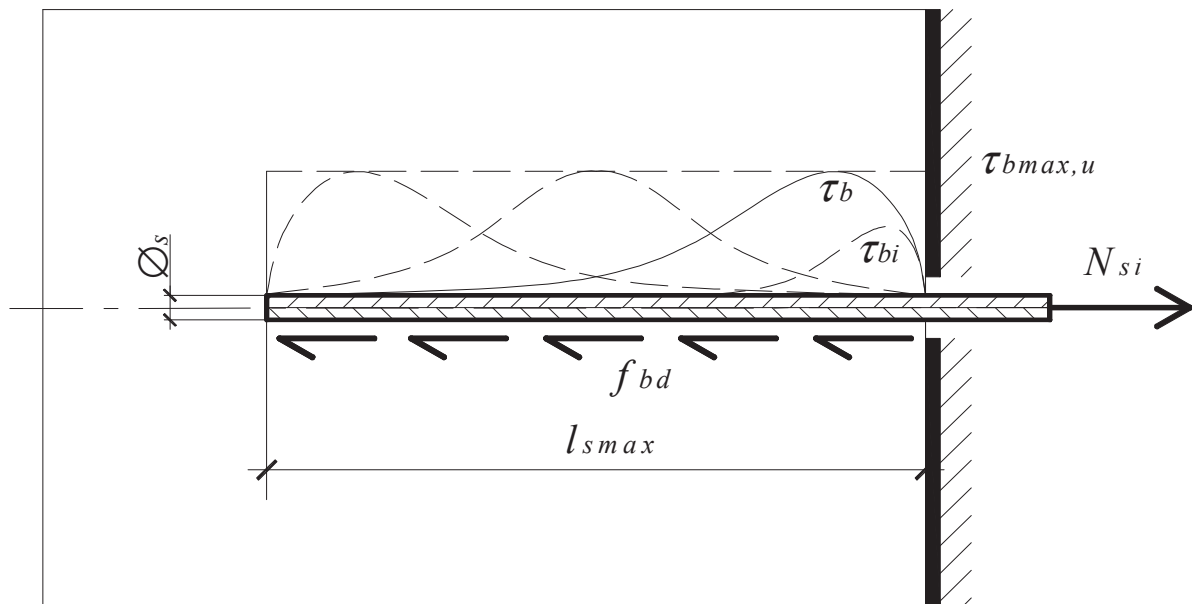


Рис. 1. Схема зміни напружень зчеплення при висмикуванні арматурного стержня з бетону

Диференційовані моделі, на відміну від інших, враховують змінність діаграм зчеплення арматури з бетоном уздовж ділянки їх контакту в перерізах залізобетонного елемента [3, 13]. Однак оцінити зміну напружено-деформованого стану контактної взаємодії арматури з бетоном за допомогою

подібних діаграм (рис. 2) в практичних розрахунках ще нікому не вдавалося навіть числовими методами.

У варіаційних моделях [14] бетон навколо арматури розділяють на три характерні зони, що дозволяє доволі точно моделювати його напружено-деформований стан на основі розв'язку симетрично-осьової об'ємної задачі механіки деформованого твердого тіла. Однак, зважаючи на складність визначення механічних характеристик бетону кожної зони, ці моделі не знайшли практичного застосування навіть у розрахунках за методом скінченних елементів.

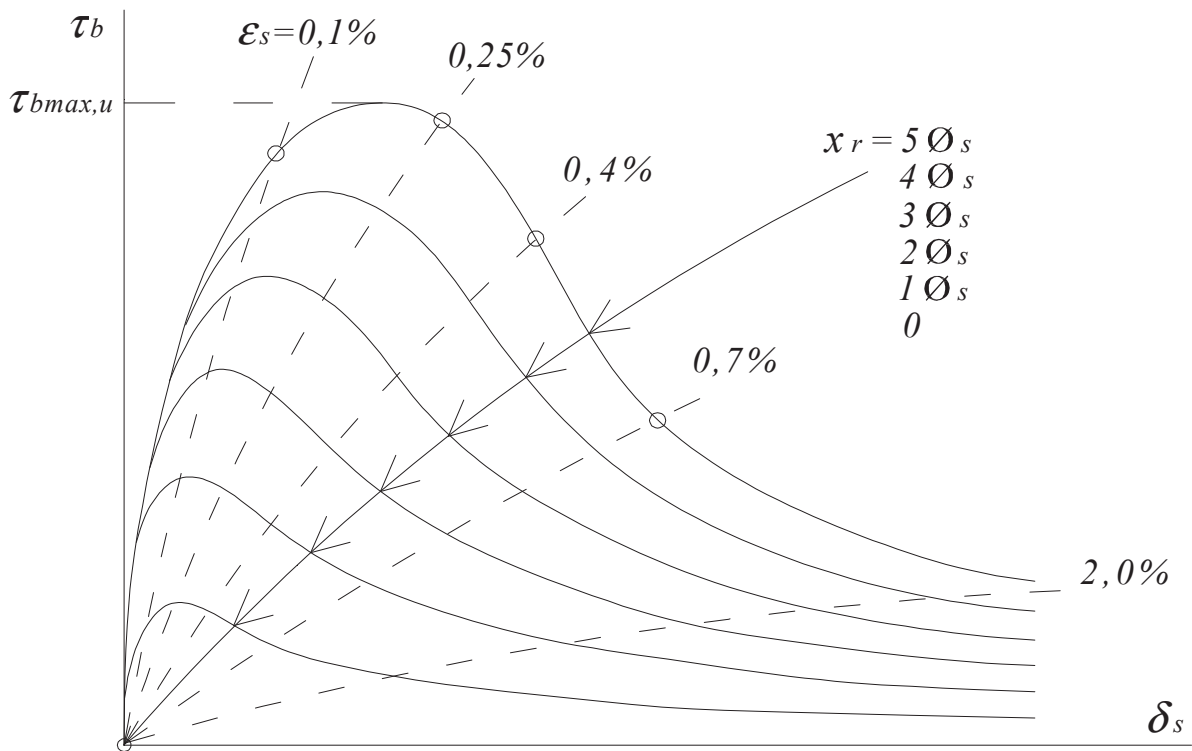


Рис. 2. Диференційовані діаграми зчеплення арматури з бетоном [3]

У числових моделях дослідження завжди виконуються за допомогою конкретних числових характеристик – скінченних елементів, залежно від вибраної форми рельєфу (профілю) арматури. Контактний шар бетону моделюється, починаючи зі схеми ідеального зчеплення аж до схеми пружно-пластичного пошкодженого матеріалу [7]. Розв'язок задач зчеплення арматури з бетоном за наведеними схемами є настільки складним, що може бути виконаний лише за допомогою спеціальних комп'ютерних програм. Серед останніх найбільше поширення отримали такі програмні комплекси, як ABAQUS, ANSYS, DIANA, NASTRAN та інші. Всі вони наділені доволі широкими функціональними можливостями, але для переважної більшості з них опис НДС в зоні зчеплення арматури з бетоном залишається доволі складним, чим помітно обмежується їх широке застосування в практичних розрахунках при вирішенні контактних задач в залізобетоні.

Постановка мети і задач досліджень. Дані дослідження спрямовані на розробку узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном, яка була б

справедливою для будь-якої стадії деформування залізобетонних елементів та задовольняла б основним вимогам інженерів-проектувальників. В основу такої моделі доречно покласти функцію універсального параметра – зусиль зчеплення арматурного стержня з бетоном уздовж його умовної циліндричної поверхні. При цьому основним завданням даних досліджень є отримання зазначеної функції з урахуванням нелінійного зв'язку середніх напружень зчеплення від нормальних напружень в арматурному стержні.

Методика досліджень. В основу даних досліджень покладається математичне моделювання процесів деформування залізобетонних елементів і конструкцій загалом та аналітичні і числові методи математичного аналізу параметрів (зусиль, напружень) зчеплення арматурного стержня з бетоном уздовж його умовної циліндричної поверхні.

Результати досліджень. Відразу зауважимо, що в основу узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном закладаються основні співвідношення механіки деформованого твердого тіла (МДТТ), виражені загальновідомою системою статичних, геометричних та фізичних співвідношень (рівнянь) [15]. Визначальними елементами розроблюваної моделі будемо вважати:

- головний параметр моделювання, за яким можна було б достовірно оцінювати зчеплення арматури з бетоном;
- основний критерій, за яким можна було б фіксувати порушення взаємодії арматури з бетоном;
- найважливіші параметри, за якими можна було б відслідковувати рівень зчеплення арматури з бетоном на будь-якій стадії деформування залізобетонного елемента.

Головним параметром, за яким можна доволі просто оцінювати зчеплення арматури з бетоном, є зусилля зчеплення N_{bd} . За численними результатами експериментальних досліджень можна стверджувати, що вони не можуть перевищувати зусиль в розтягнутому бетоні N_{ct} . Тобто порушення умови

$$N_{ct} = N_{bd} \quad (1)$$

відповідає не тільки появі першої тріщини, але й всіх інших без виключення.

Поява першої тріщини безпосередньо не залежить від зчеплення арматури з бетоном. Тому її виникнення в залізобетонному елементі можна визначити за граничними деформаціями розтягнутого бетону ε_{ctu} , що фіксуються за екстремальним критерієм його міцності $dN_{ct} / d\varepsilon_{ct} = 0$ чи несучої здатності $dM_{ct} / d(1/r) = 0$. Відповідно до чинних норм [5, 6], їх можна прийняти навіть рівними $\varepsilon_{ctu} = 2f_{ctk} / E_{c0}$. Застосування ж критерію $dM_w / d\varepsilon = 0$ для визначення моменту появи тріщин [16] є дещо некоректним, оскільки несучу здатність втрачає тільки розтягнутий бетон, а не елемент в цілому. До того ж, вираз $dM / d\varepsilon = 0$ не наділений якимось фізичним змістом, тому він не може слугувати критерієм взагалі. Подібним змістом наділений лише

критерій Ферма $dM / d(1/r) = 0$, оскільки характеризує жорсткість (E_c – для центрально завантажених бетонних, EA – для центрально завантажених залізобетонних, EI – для згинальних і позacentрово завантажених елементів), за якою зазначені елементи втрачають свою несучу здатність.

За появи будь-якої нової тріщини граничне зусилля зчеплення $N_{bd,cr}$ на ділянці між тріщинами згідно (1) залишатиметься незмінним та рівним граничному зусиллю в розтягнутому бетоні (рис. 3). В такому випадку для центрально розтягнутого елемента матиме місце наступна рівність

$$\tau_{bm1} \cdot s_{r1} = \tau_{bm2} \cdot s_{r2}, \quad (2)$$

де s_{r1} і s_{r2} – відстані між тріщинами першого та другого рівнів відповідно;

τ_{bm1} і τ_{bm2} – середні напруження зчеплення на ділянках між тріщинами тих же рівнів відповідно.

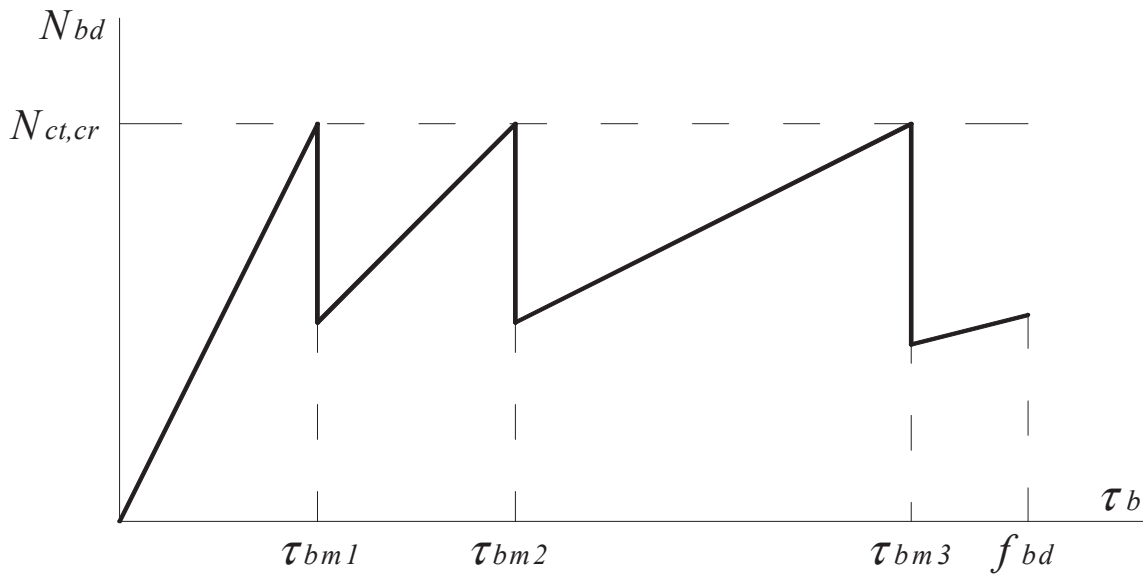


Рис. 3. Зміна зусиль зчеплення арматури з бетоном при багаторівневому утворенні нормальних тріщин в залізобетонному елементі

Напруження зчеплення арматури з розтягнутим бетоном на ділянці між тріщинами першого рівня можна обчислити за доволі простим виразом [17]

$$\tau_{bm1} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\varepsilon_{ctu} \cdot E_s / f_{yk})^{1-1/\eta_s} \quad (3)$$

Аналогічним чином визначають середні напруження зчеплення на ділянках між тріщинами всіх наступних рівнів. Як показують результати експериментальних досліджень їх кількість зазвичай не перевищує 3-х.

Слід зауважити, що рівність (2) у вигляді

$$\tau_{bm2,1} \cdot s_{r2,1} = \tau_{bm2,2} \cdot s_{r2,2} \quad (4)$$

залишається справедливою і для згинальних елементів [18] (рис. 4).

Висновки. Таким чином, завдяки проведеним дослідженням сформовані основні положення узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном. Згідно отриманих результатів взаємодію арматури з бетоном рекомендується

модельовати за допомогою зусиль зчеплення, оскільки їх граничні значення залишаються незмінними в процесі деформування залізобетонного елемента. Зусилля зчеплення пропонується розраховувати у найпростіший спосіб – за допомогою середніх напружень зчеплення. Функція середніх напружень зчеплення є нелінійною відносно напружень в самій арматурі. Процеси тріщиноутворення в залізобетонних елементах доцільно регламентувати параметрами зчеплення арматури з бетоном, що сприятиме побудові універсальної теорії зчеплення в рамках узагальненої деформаційно-силової моделі опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам.

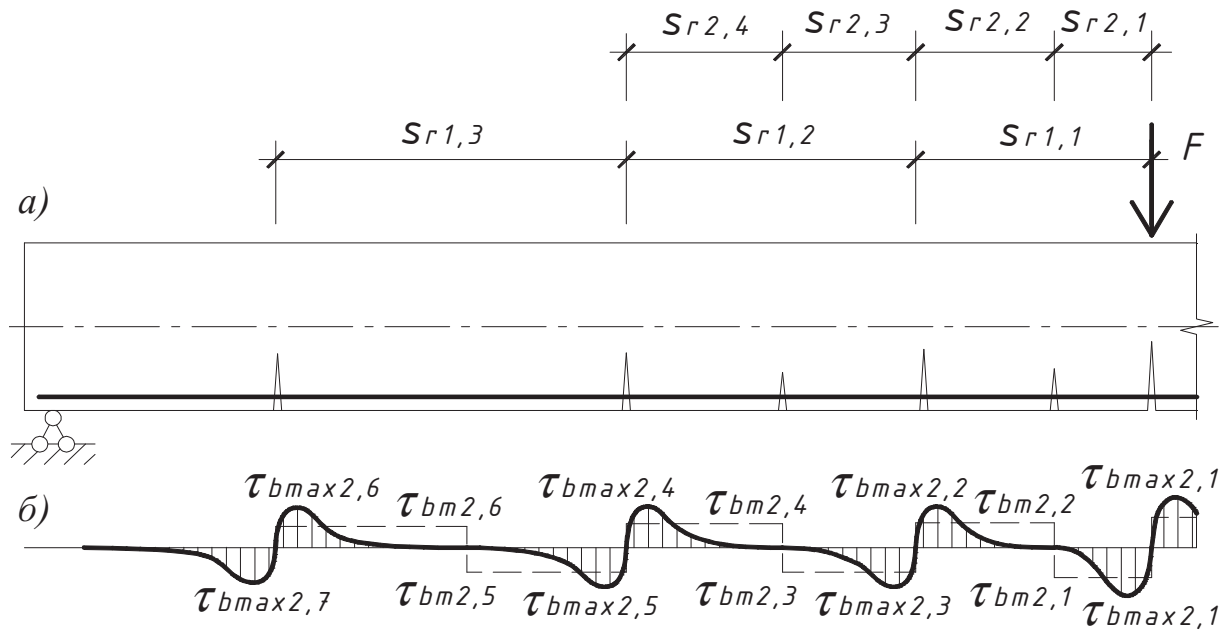


Рис.4. Схема рівневого утворення тріщин (а) з відповідними епорами напружень зчеплення (б) в згинальному елементі

1. Rehm G. The fundamental law of bond. *Proceedings of the symposium on bond and crack formation in reinforced concrete*. Stockholm: RILEM. 1957. Vol. 2. P. 491-498.

2. Eligehausen R., Popov E. P. and Bertero V. V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Report No. UCB/EERC-83/23. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of California University, 1983. 169 p.

3. Shima H., Chou L.-L. and Okamura H. Micro and macro models for bond in reinforced concrete. *Journal of the Engineering Faculty of Tokyo University*. 1987. Vol. XXXIX, No. 2. P. 133-194.

4. Холмянский М. М. Расчет центрально армированных призматических элементов на сцепление. *Сб. тр. НИИЖБ*. Москва: Госстройиздат. 1961. Вып. 4. С. 122-153.

Kholmyanskij M. M. Raschet czentral'no armirovanny'kh prizmaticheskikh e'lementov na szceplenie. *Sb. tr. NIIZhB*. Moskva: Gosstrojizdat. 1961. Vy`p. 4. S. 122-153.

5. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с. (Національний стандарт України).

DSTU B V.2.6-156: 2010. Konstrukciyi budy`nkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstrukciyi z vazhkogo betonu. Pravy`la proektuvannya. [Chy`nny`j vid 01.06.11]. Ky`yiv: Minregionbud Ukrayiny`, 2011. 123 s. (Nacional'ny`j standart Ukrayiny`).

6. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and

Rules for Buildings. [Final Draft, December 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p. (Європейський стандарт).

7. Бенин А. В., Семёнов А. С., Семёнов С. Г., Мельников Б. Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1: Модели с учетом несплошности соединения. Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 86-99.

Benin A. V., Semyonov A. S., Semyonov S. G., Mel'nikov B. E. Matematicheskoe modelirovanie prozessa razrusheniya szcepleniya armatury` s betonom. Chast` 1: Modeli s uchetom nesploshnosti soedineniya. *Inzhenerno-stroitel'ny`j zhurnal*. 2013. No. 5(40). S. 86-99.

8. Avak R., Wille F. Bond Behaviour of Steel Wire Ropes Embedded in Concrete. Proc. Bond in Concrete – from research to standards / Balázs, G. et al. Budapest : University of Technology and Economics, 2002. P. 300-307.

9. Dörr K. Ein Beitrag zur Berechnung von Stahlbetonscheiben unter besonderer Berücksichtigung des Verbundverhaltens. Darmstadt : Technische Hochschule, 1980. 145 p.

10. Malvar L. J., Cox J. V. and Cochran K.B. Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. I: Experimental study. *Journal of Composites for Construction*. 2003. V. 7, No. 2. P. 154-163.

11. Balasz G. L. Connecting Reinforcement to Concrete by Bond. *Beton- und Stahlbetonbau*. September 2007. Vol. 102, No. S1. P. 46-50.

12. Muttoni A., Schwartz J. and Thürlimann B. Design of concrete structures with stress fields. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 1996. 146 p.

13. Mirza S. A. and Houde J. Study of bond-slip relationships in reinforced concrete. *ACI Journal*. January 1979. Vol. 76, No. 1. P. 19-46.

14. Назаренко П. П. Контактное взаимодействие арматуры и бетона при кратковременном нагружении. Самара: СамГУПС, 2012. 171 с.

Nazarenko P. P. Kontaktnoe vzaimodejstvie armatury` i betona pri kratkovremennom nagruzhennii. Samara: SamGUPS, 2012. 171 s.

15. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.

Romashko V. M. Deformacijno-sy`lova model` oporu betonu i zalizobetonu: monografiya. Rivne: O. Zen`, 2016. 424 s.

16. Кочкаръов Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.

Kochkar`ov D. V. Neliniyj`j opir zalizobetonny`x elementiv i konstrukcij sy`lovy`m vply`vam: avtoref. dy`s. ... d-ra tehn. nauk: 05.23.01. Poltava, 2018. 44 s.

17. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 92-99.

Romashko O. V., Romashko V. M. Shhodo ocinyuvannya zcheplennya armatury` z betonom. *Zb. nauk. pracz` UDUZT*. 2018. Vy`p. 179. S. 92-99.

18. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2018. Вип. 181. С. 58-65.

Romashko V. M., Romashko O. V. Rozraxunok trishhy`nostijkosti zalizobetonny`x elementiv z uraxuvannyam rivniv utvorennya normal'ny`x trishhy`n. *Zb. nauk. pracz` UDUZT*. 2018. Vy`p. 181. S. 58-65.