

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

BASICS OF CALCULATING THE ADHESION OF REINFORCEMENT TO CONCRETE IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Ромашко В.М., д.т.н., доц., ORCID: 0000-0003-3448-7489, **Ромашко-Майструк О.В.,** к.т.н., ст. викладач, ORCID: 0000-0003-3353-2268 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Romashko V.M., D. Sc. (Tech.), Associate Professor, **Romashko-Maistruk O. V.,** PhD (Tech.), senior lecturer (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Розроблено модель та методику розрахунку зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах. Запропоновано критерій, за яким можна розрахувати зусилля зчеплення арматурного стержня з бетоном в момент утворення нормальних тріщин та оцінити ступінь порушення їхньої взаємодії. Запропоновано аналітичну залежність щодо оцінки профілю арматури за індексом зчеплення.

The current state of the creation of a reinforcement to concrete adhesion general theory is estimated. The classification and critical analysis of reinforcement to concrete adhesion models by mathematical solution of specific schemes of their interaction are carried out. Particular attention is paid to the advantages and disadvantages of analytical models: elastic, elastic-plastic, differentiated and variational.

A model and method for calculating the reinforcement to concrete adhesion in reinforced concrete elements have been developed. The model of reinforcement to concrete adhesion is based on the generally recognized dependences of the deformed solid body mechanics, expressed by a system of static, geometric and physical relationships. A criterion is proposed by which it is possible to calculate the reinforcing rod with concrete adhesion force and to assess the violation degree of their interaction at the time of normal cracks formation. This criterion, together with the extreme Fermat criterion, allows you to control the entire process (moment and place) of normal cracks stepwise formation in the tensioned zone of a reinforced concrete element.

It is recommended to calculate the forces of the reinforcing rod with tensioned concrete interaction based on the average stresses of their adhesion in the area between adjacent cracks. A universal dependence of these stresses is obtained,

which is valid for any stage of a reinforced concrete element deformation. Comparison of the experimental values of the reinforcement with concrete average adhesion stresses with the theoretical values calculated for linear and nonlinear dependencies is carried out. It is shown that the function of the average adhesion stresses is nonlinear with respect to the normal stresses in the reinforcement itself.

An analytical dependence for the coefficient characterizing the profile of the reinforcing rod by the adhesion index is proposed. Its substantiation was carried out in a certain confidence interval.

Ключові слова:

Залізобетон, елементи, арматура, бетон, зчеплення, зусилля, індекс
Reinforced concrete, elements, reinforcement, concrete, adhesion, strength, index

Вступ. Загальна теорія зчеплення арматури з бетоном, яка задовольняла б інженерів-проектувальників, досі так і не побудована. І обумовлено це результатами численних досліджень, які показують [1-4], що зчеплення арматури з бетоном залежить від дуже великої кількості різних факторів. Врахувати їх спільний вплив при моделюванні взаємодії арматури з бетоном вкрай складно, а іноді й неможливо. Тому й не дивно, що методи та алгоритми розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій, регламентовані вітчизняними та зарубіжними нормативними документами [5, 6], практично повністю ігнорують взаємодію арматури з бетоном.

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

- визначення основних параметрів, які найбільше впливають на міцність зчеплення [2];
- вивчення загальних закономірностей взаємних переміщень бетону і арматури [1, 4];
- створення і розвиток загальної технічної теорії зчеплення [4];
- моделювання зчеплення арматури з бетоном числовими методами [7].

Однак неоднозначність результатів досліджень за вказаними роботами та відсутність універсальної теорії зчеплення арматури з бетоном спонукають до проведення подальших досліджень задля вирішення окресленої проблеми.

Аналіз останніх досліджень. Всі відомі на сьогодні результати досліджень, спрямовані на моделювання взаємодії арматури з бетоном, не тільки істотно різняться між собою, але й часто суперечать одні одним. Така ситуація цілком природна і зрозуміла, оскільки пов'язана з результатами експериментальних досліджень, в яких були різними: форма та розмір зразків за різних типів і класів бетону та арматури; схеми армування та умови ущільнення бетону, а отже, і характер формування контактного шару; технологічні особливості догляду за бетоном; схеми і умови випробування зразків; гіпотези та передумови теоретичних досліджень тощо. Тому

класифікація моделей зчеплення арматури з бетоном за згаданими ознаками могла б допомогти не тільки систематизувати результати існуючих, але й визначити ефективний напрям подальших досліджень.

Детальний аналіз результатів досліджень вітчизняних та закордонних вчених показує, що такі моделі можна розділити за багатьма ознаками, основними серед яких є:

- масштаб та структура моделі;
- уявлення бетону і арматури в системі їх контактної взаємодії;
- схеми випробувань і характер руйнування бетону на межі контакту «бетон-арматура»;
- математичні рішення конкретних схем взаємодії арматури з бетоном.

Особливої уваги заслуговує остання ознака, за якою всі моделі зчеплення арматури з бетоном можна умовно розділити на аналітичні та числові. В цілому аналітичні моделі представлені у вигляді математичних рівнянь (формул), що характеризують функціональну залежність результатів досліджень від певних вихідних факторів або параметрів. За характером математичних залежностей згадані моделі зчеплення можна розділити на: пружні, пружно-пластичності, диференційовані та варіаційні.

Найширше застосування в дослідженнях зчеплення арматури з бетоном найшли пружні моделі. Вони представлені в основному степеневими, поліноміальними, експоненціальними, дробовими, логарифмічними [4], тригонометричними залежностями і найчастіше сплайн-функціями [2]. Але результати експериментальних досліджень показують, що діаграма напружень зчеплення арматури з бетоном уздовж ділянки їх контакту постійно змінюється, а тому не може бути описана єдиною функцією.

Диференційовані моделі, на відміну від інших, враховують варіативність схем зчеплення арматури з бетоном уздовж їх контакту в перерізах залізобетонного елемента [3, 8]. Однак оцінити зміну напружено-деформованого стану контактної взаємодії арматури з бетоном за такими діаграм в практичних розрахунках, навіть числовими методами, вкрай складно.

У варіаційних моделях [9] бетон навколо арматури розбивається на три характерні зони, що дозволяє досить точно моделювати його напружено-деформований стан (НДС) на основі рішення симетрично-осьової об'ємної задачі механіки деформованого твердого тіла (МДТТ). Однак, з огляду на складність визначення механічних характеристик бетону в кожній зоні, ці моделі не знайшли практичного застосування навіть при розрахунках методом кінцевих елементів.

У числових моделях дослідження завжди проводяться з використанням конкретних числових характеристик - кінцевих елементів в залежності від обраної форми рельєфу (профілю) арматури. Контактний шар бетону моделюється від схеми ідеального зчеплення до схеми пружно пошкодженого матеріалу [7]. Рішення задач зчеплення арматури з бетоном за наведеними схемами є настільки складними, що можуть бути отримані тільки за допомогою

спеціальних комп'ютерних програм. Серед останніх найбільш широко використовуються програмні комплекси ABAQUS, ANSYS, DIANA, NASTRAN та інші. Всі вони наділені досить широкими функціональними можливостями, але для переважної більшості з них опис НДС в зоні зчеплення арматури з бетоном залишається досить складним, що помітно обмежує їх широке використання в практичних розрахунках при вирішенні контактних задач.

Методика досліджень. Дані дослідження спрямовані на розробку моделі зчеплення арматури з бетоном, яка була б прийнятною для будь-якої стадії деформування залізобетонних елементів та задовольняла б основні вимоги інженерів-проектувальників. В основу такої моделі доречно закласти функцію універсального параметра - зусилля зчеплення арматури з бетоном уздовж її умовної циліндричної поверхні. У цьому випадку основним завданням цих досліджень є отримання згаданої функції з урахуванням нелінійної залежності середніх напружень зчеплення від нормальних напружень в самій арматурі.

Тому в цілому дані дослідження спрямовані на математичне моделювання процесів деформування залізобетонних елементів і конструкцій та зокрема на аналітичні і числові методи моделювання параметрів (зусиль, напружень) зчеплення арматури з бетоном уздовж її циліндричної поверхні.

Результати досліджень. В основу моделі зчеплення арматури з бетоном покладено залежності МДТГ, виражені системою статичних, геометричних та фізичних співвідношень [10, 11]. Тому її визначальними елементами є:

- основний параметр, за допомогою якого можна було б достовірно оцінити зусилля зчеплення арматури з бетоном;
- основний критерій, за яким можна було б фіксувати локальне порушення зчеплення арматури з розтягнутим бетоном в момент утворення тріщин;
- найважливіші параметри, за якими можна було б контролювати зчеплення арматури з бетоном на будь-якій стадії деформування залізобетонного елемента.

Основним параметром, за яким можна досить легко оцінити зчеплення арматури з бетоном, є зусилля зчеплення N_{bd} . Цілком очевидно, що вони не можуть перевищувати максимальних зусиль в розтягнутому бетоні N_{ct} . Тобто порушення умови

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

відповідає появі не тільки першої тріщини, але і всіх інших без винятку.

Загалом утворення першої тріщини не пов'язують зі зчепленням арматури з бетоном. Її появу в залізобетонному елементі фіксують за граничними деформаціями розтягнутого бетону ε_{ctu} , які можна визначити за екстремальним критерієм його несучої здатності $dM_{ct}/d(1/r) = 0$ ($dN_{ct}/d\varepsilon_{ct} = 0$). Згідно чинних норм [5, 6] ці деформації можна приймати

рівними $\varepsilon_{ctu} = 2f_{ctk} / E_{c0}$. Використання виразу $dM_w / d\varepsilon = 0$ у якості критерію утворення тріщин [12] є дещо некоректним, оскільки несучу здатність втрачає тільки розтягнутий бетон, а не весь елемент в цілому. До того ж вираз типу $dM / d\varepsilon = 0$ немає якогось фізичного змісту, а тому не може слугувати критерієм взагалі. Зазначений зміст властивий критерію Ферма $dM / d(1/r) = 0$, оскільки він характеризує жорсткість (EA - для центрально навантажених бетонних та залізобетонних елементів, EI - для згинальних та позацентрово навантажених елементів), за якої згадані елементи втрачають свою несучу здатність.

При утворенні будь-якої нової тріщини між уже існуючими зусилля зчеплення досягає граничного значення $N_{bd,cr}$ та згідно (1) зрівнюється з граничним зусиллям в розтягнутому бетоні $N_{ct,cr}$ (рис. 1).

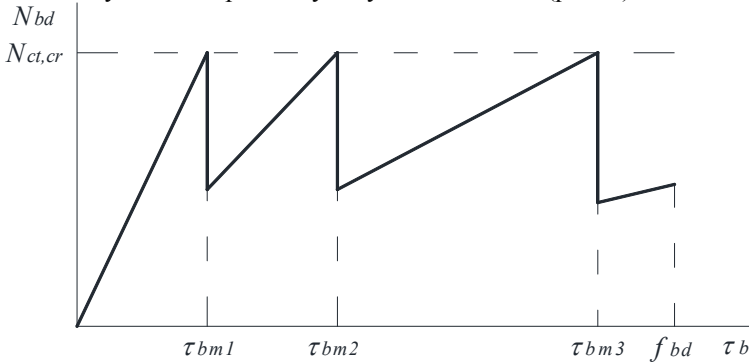


Рис. 1. Зміна зусилля зчеплення арматури з бетоном при багаторівневому утворенні нормальних тріщин в залізобетонному елементі

Тоді для центрально розтягнутого елемента можна записати рівність

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

де s_{r1} і s_{r2} - відстань між тріщинами першого і другого рівнів, відповідно;

τ_{bm1} і τ_{bm2} - середні напруження зчеплення на ділянці між тріщинами першого та другого рівнів, відповідно.

Напруження зчеплення арматури з розтягнутим бетоном на ділянці між тріщинами першого рівня можна розрахувати за простим виразом [13, 14]

$$\tau_{bmi} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\sigma_{si} / \sigma_{s,max})^{1-1/\eta_1}, \quad (3)$$

де σ_{si} - найбільші напруження в арматурі на ділянці її активного зчеплення з розтягнутим бетоном на певному етапі деформування залізобетонного

елемента;

$\sigma_{s,max}$ - максимально можливі напруження в розтягнутій арматурі на ділянці її активного зчеплення з розтягнутим бетоном, що не можуть перевищувати граничних значень ($\sigma_{s,max} \leq f_{yk}$);

η_2 - коефіцієнт, що враховує вплив діаметра арматури, можна прийняти згідно чинних норм [5, 6];

η_1 - коефіцієнт, що характеризує профіль арматурного стержня за індексом зчеплення f_R (рис. 2), слід приймати за виразом [15]

$$\eta_1 = 1 + 35 \cdot f_R - (12 \cdot f_R)^2, \quad (4)$$

який за довірчого інтервалу в 2σ (σ - стандартне відхилення) набуває вигляду [16]

$$\eta_1 = 1 + 29 \cdot f_R - 120 \cdot f_R^2. \quad (5)$$

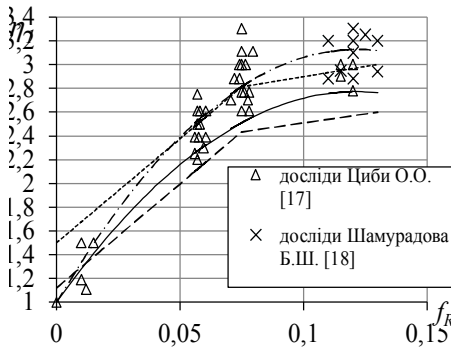


Рис. 2. Зв'язок коефіцієнта η_1 з індексом зчеплення арматури з бетоном f_R

Аналіз результатів експериментальних досліджень різних авторів [19-22] показує, що функція середніх напружень зчеплення арматури з бетоном є ближчою до нелінійної (3). Про це свідчать результати порівняння

експериментальних та теоретичних значень середніх напружень зчеплення (табл. 1), розрахованих у тому числі і за лінійною функцією (6) [12]

$$\tau_{m,i} = f_{ctm} \cdot ((\eta_1 \cdot \eta_2 - 0,4) \cdot \sigma_{si} / f_{yd} + 0,4). \quad (6)$$

Таблиця 1

Порівняння теоретичних та експериментальних значень середніх напружень зчеплення арматури з бетоном

Автори дослідів	Профіль і діаметр арматури, мм	Відхилення від дослідних даних					
		за формулою (3)			за функцією (6)		
		Δ	σ	$v, \%$	Δ	σ	$v, \%$
Кольнер В. [19]	періодичний, 20	1,00	1,73	1,73	1,08	5,27	4,88
Adrouche К. [20]	періодичний, 16	0,99	5	2,00	2,01	2,32	2,30
Rashedul К. [21]	періодичний, 20	0,99	4	2,29	2,30	1,051	4,48
Самошкин А. [22]	періодичний, 16	0,99	8	2,28	2,29	1,023	2,76

Аналогічним чином розраховують середні напруження зчеплення арматури з бетоном на ділянках між тріщинами всіх наступних рівнів. Експериментальні дослідження показують, що їх кількість на експлуатаційній стадії деформування може бути обмежена двома рівнями [23]. Слід зазначити, що рівність (2) залишається справедливою і для згинальних елементів (рис. 3)

$$\tau_{bm2,1} \cdot s_{r2,1} = \tau_{bm2,2} \cdot s_{r2,2}, \quad (7)$$

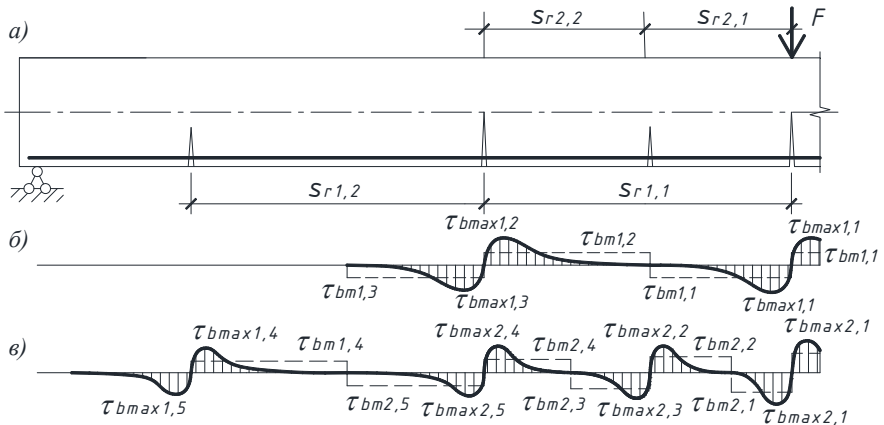


Рис. 3. Схема рівневого утворення нормальних тріщин (а), відповідні епюри напружень зчеплення арматури з бетоном (б, в)

Висновки. Таким чином, взаємодію арматури з бетоном рекомендується

моделювати за допомогою зусиль зчеплення, оскільки їх граничні значення залишаються незмінними в процесі деформування залізобетонного елемента. Загалом зусилля зчеплення пропонується розраховувати найбільш простим способом - за середніми значеннями напружень зчеплення арматури з бетоном на ділянці між суміжними тріщинами. Функція середніх напружень зчеплення є нелінійною відносно напружень в самій арматурі. Утворення тріщин в залізобетонних елементах варто розглядати з позицій локального порушення зчеплення арматури з бетоном. Тому задля побудови універсальної теорії зчеплення в рамках деформаційно-силової моделі опору залізобетонних елементів силовим впливам утворення тріщин [14, 24] доцільно моделювати за допомогою узагальнених параметрів зчеплення арматури з бетоном.

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. 1961. Вып. 4. С. 122-153.

Holmyanskiy M. M. Raschet tsentralno armirovannyih prizmaticheskikh elementov na stseplenie. Sb. tr. NIIB. 1961. Vyip. 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.

DSTU B V.2.6-156: 2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia. [Chynnyi vid 01.06.11]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 123 s.

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.

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., Semënov A. S., Semënov S. G., Melnikov B. E. Matematicheskoe modelirovanie protsessa razrusheniya stsepleniya armatury i s betonom. CHast 1. Modeli s uchetom nesploshnosti soedineniya. Injenerno-stroitelnyy jurnal. 2013. №5(40). S. 86-99.

8. 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.

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

Nazarenko P. P. Kontaktnoe vzaimodeystvie armatury i betona pri kratkovremennom nagruzenii. Samara: SamGUPS, 2012. 171 s.

10. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force

model of concrete and reinforced concrete resistance. MATEC Web of Conf. 2017. Vol. 116. 02028.

11. Romashko V. and Romashko O. Fundamentals of the General Theory of Resistance of Reinforced Concrete Elements and Structures to Power Influences. Materials Science Forum. 2019. Vol. 968. P. 534-540.

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

Kochkarov D. V. Neliniynyi opir zalizobetonnykh elementiv i konstruktсии sylovym vplyvam: avtoref. dys. d-ra tekh. nauk: 05.23.01. Poltava, 2018. 44 s.

13. Romashko O., Romashko V. Evaluation of bond between reinforcement and concrete. MATEC Web of Conf. 2018. Vol. 230. 02027.

14. Romashko O. V. and Romashko V. M. Model of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 708. 012069.

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

Romashko V. M. Deformatsiino-sylova model opogu betonu i zalizobetonu: monohrafiia. Rivne: O. Zen, 2016. 424 s.

16. Ромашко-Майстрок О. В. Опір залізобетонних елементів багаторівневому утворенню нормальних тріщин: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / НУВГП. Рівне, 2021. 217 с.

Romashko-Maistruk O. V. Opir zalizobetonnykh elementiv bahatorivnevomu utvorenniu normalnykh trishchyn: dys. kand. tekh. nauk: 05.23.01 / NUVHP. Rivne, 2021. 217 s.

17. Цыба О. О. Трещиностойкость и деформативность растянутого бетона с ненапрягаемой и напрягаемой стержневой арматурой, имеющей различную относительную площадь смятия поперечных ребер: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2011. 24 с.

TSyiba O. O. Treschinostoykost i deformativnost rastyanutogo betona s nenapryagaemoy i napryagaemoy sterzhevoy armaturoy, imeyushey razlichnyuyu odnositelnyuyu ploschad smyatiya poperechnykh reber: avtoref. diss. kand. tekh. nauk: 05.23.01. Moskva, 2011. 24 s.

18. Шамурадов Б. Ш. Ширина раскрытия нормальных трещин в железобетонных элементах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Киев, 1987. 19 с.

SHamuradov B. SH. SHirina raskryitiya normalnykh treschin v jelezobetonnykh elementah: avtoref. dis. kand. tekh. nauk: 05.23.01. Kiev, 1987. 19 s.

19. Кольнер В. М. Сцепление арматуры с бетоном и прочность заделки стержневой арматуры периодического профиля. Бетон и железобетон. 1965. № 11. С. 25-27.

Kolner V. M. Stseplenie armaturyi s betonom i prochnost zadelki sterzhevoy armaturyi periodicheskogo profilya. Beton i jelezobeton. 1965. № 11. С. 25-27.

20. Adrouche K. Influence of the constitutive parameters for steel-concrete association on bond strength under slow cyclic loading. Materials and Structures: RILEM. 1987. Vol. 20. P. 315-320.

21. Rashedul Kabir Md. Bond stress behavior between concrete and steel rebar: Critical investigation of pull-out test via Finite Element Modeling. International Journal of Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 5, No1. P. 80-90.

22. Самошкин А. С., Тихомиров В. М. Исследование нелинейного деформирования железобетона экспериментально-расчетными методами. Изв. вузов: стр-во. 2017. Т. 5. С. 17-27.

Samoshkin A. S., Tihomirov V. M. Issledovanie nelineynogo deformirovaniya jelezobetona eksperimentalno-raschetnymi metodami. Izv. vuzov: str-vo. 2017. T. 5. S. 17-27.

23. Romashko V., Romashko O. Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation. MATEC Web of Conf. 2018. Vol. 230. 02028.

24. Romashko V. M. General model and the mechanics of concrete elements and structures deformation. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1021. 012026.