

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗГИНАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ПІДСИЛЕНИХ
КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

**RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED
CONCRETE BENT ELEMENTS STRENGTHENED WITH COMPOSITE
MATERIALS**

Терешко А.Р., аспірант, ORCID 0000-0003-1455-973X, **Бліхарський Я.З.**, д.т.н., доц., ORCID 0000-0002-3374 -9195 (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів),

Tereshko A.R., PhD student, ORCID 0000-0003-1455-973X, **Blikharskyi Ya. Z.**, DSc, assoc. prof., ORCID 0000-0002-3374 -9195 (Lviv Polytechnic National University, c. Lviv)

В роботі представлено результати зміни напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсилених системою композитних високоміцних волокон на основі P.B.O. FRCM. Перевагами даних матеріалів є висока статична і втомна міцність, близький до металу модуль пружності, мала власна вага, відсутність розмірних обмежень і стиків, можливість з'єднання з підсилюваною конструкцією тільки за рахунок клею, короткий термін виконання робіт, низька їх трудомісткість і вартість, а також висока корозійна стійкість, довговічність і надійність, оскільки композити є інертними до агресивних середовищ. При тому, оскільки під час підсилення конструкції деколи складно або неможливо розвантажити, то підсилення дослідних залізобетонних балок виконували при рівні 50% від несучої здатності контрольних невідсилених зразків.

The use of new technologies in all areas of production, re-planning and conversion of premises, increasing the load on structures and the load-bearing capacity of structures require special attention to the problems of reconstruction of buildings and structures. The renewal of fixed assets does not involve the replacement of building structures, but leads to the effective use of existing buildings and structures. However, many building structures are subject to physical wear and tear, so during the reconstruction of buildings and structures, building structures are restored or strengthened. One of the modern methods of strengthening is the use of composite materials. The paper presents the results of changes in the stress-strain state of reinforced concrete beams reinforced by a system of composite high-strength fibers based on P.B.O. FRCM. The advantages of these materials are high static and fatigue strength, a modulus of elasticity close to that of metal, low own weight, lack of dimensional restrictions and joints, the possibility of connection with a

reinforced structure only due to glue, a short period of work, low labor intensity and cost, and also high corrosion resistance, durability and reliability, as composites are inert to aggressive environments. At the same time, since it is sometimes difficult or impossible to unload during the strengthening of the structure, the reinforcement of the experimental reinforced concrete beams was carried out at 50% of the bearing capacity of the control unstrengthen samples. The destruction occurred due to the fragmentation of the compressed concrete zone. At the same time, the delamination of the mesh continued in the direction of the supports, but complete delamination did not occur. The crushing of the concrete was smooth and gradual, which indicates the plastic nature of the beam failure. As a result of reinforcement of reinforced concrete beams with the Ruredil X Mesh Gold system, the cross-section is stiffened due to the inclusion of reinforcement elements in the work. The bearing capacity of strengthened reinforced concrete beams has increased by 25% compared to unstrengthened ones.

Ключові слова: залізобетонні балки, натурні розміри, підсилення, композитні матеріали, напружено-деформований стан.
reinforced concrete beams, real size, strengthening, composite materials, stress-strain state.

Вступ. Використання нових технологій в усіх сферах виробництва, перепланування і переобладнання приміщень, збільшення навантаження на конструкції і несучої здатності конструкцій потребують особливої уваги до проблем реконструкції будівель і споруд. Оновлення основних фондів не передбачає заміни будівельних конструкцій, а приводить до ефективного використання існуючих будівель і споруд. Однак багато будівельних конструкцій мають фізичний знос, тому при реконструкції будівель і споруд проводиться відновлення або підсилення будівельних конструкцій. Одним із сучасних методів підсилення є використання композитних матеріалів, саме тому, в даній роботі досліджено ефект підсилення залізобетонних балок композитними матеріалами. Зокрема, досліджено використання високоміцних волокон на основі P.B.O. FRCM для підсилення залізобетонних балок.

Постановка мети досліджень. Метою роботи є порівняння несучої здатності та деформативності залізобетонних балок непідсилених з залізобетонними балками, підсиленими високоміцними композитними матеріалами на основі P.B.O. FRCM волокон.

Аналіз останніх досліджень. Залізобетонні конструкції широко застосовуються в Україні та у всьому світі [1,2]. Проте, протягом часу та різноманітних факторів навколишнього середовища дані конструкції потребують відновлення та підсилення [3-5]. Існує значна кількість методів підсилення залізобетонних конструкцій [6]. В останній час важливе місце в

області підсилення залізобетонних конструкцій, почали займати композитні матеріали [7]. Будівельна галузь досить вчасно звернула увагу на великі можливості, закладені в застосуванні цих матеріалів. Перш за все це висока їх статична і втомна міцність, близький до металу модуль пружності, мала власна вага, відсутність розмірних обмежень і стиків, можливість з'єднання з підсилюваною конструкцією тільки за рахунок клею, короткий термін виконання робіт, низька їх трудомісткість і вартість, а також висока корозійна стійкість, довговічність і надійність, оскільки композити є інертними до агресивних середовищ. Важливим є також можливість локального підсилення пошкоджених або найбільше напружених ділянок, тобто підсилення зон дії максимальних згинальних моментів і поперечних сил, що дозволяє істотно зменшити витрати композитних матеріалів і клею, а відповідно, і здешевити підсилення.

В останні роки відбувається перегляд нормативних документів з проектування залізобетонних конструкцій та розробляються нові Державні будівельні норми України. В них впроваджуються нові підходи до розрахунку залізобетонних конструкцій, які будуються на більш прогресивних та експериментально обґрунтованих нелінійних деформаційних моделях [1]. Якщо для розрахунку непідсилених конструкцій реалізація деформаційних методів має достатнє обґрунтування, то розробка розрахункових положень для розрахунку підсилених залізобетонних елементів на сьогоднішній час недостатня і потребує широких експериментально-теоретичних розробок і обґрунтувань, особливо для залізобетонних елементів, підсилених композитними матеріалами. Саме тому, актуальним питанням є збільшення експериментальної бази досліджень залізобетонних конструкцій, підсилених композитними матеріалами, особливо з врахуванням дії початкового навантаження при підсиленні.

Матеріали та методи досліджень. Для реалізації поставленої мети роботи була виготовлена 4 дослідних залізобетонних балок. В рамках досліджень випробовували 4 балки, з них 2 балка при короткочасному навантаженні без підсилення, і 2 підсилені системою Ruredil X Mesh Gold (рис. 1) (складається з сітки з волокон Р.В.О. (поліпарафенілен бензооксазол) у стабілізованій неорганічній матриці) Через 5 діб після підсилення балки випробовувалась короткочасним навантаженням до руйнування.



Рис. 1. Загальний вигляд підсилення залізобетонних балок системою Ruredil X Mesh Gold

Прийняті наступні умовні позначення: Б – балка; З – випробувана на короткотривале навантаження без підсилення; П – підсилена. В першу групу цифр входять дві цифри, перша з яких вказує серію балок, друга – порядковий номер балки даної серії (1..4). Друга група цифр показує до якого рівня від максимального, прийнятого за текучістю арматури залізобетонних балок при короткотривалому випробуванні, було завантажено балку (0.5).

Всі балки серії були близнюками. Експериментальні зразки були прийняті довжиною 2100 мм, шириною 100 мм і висотою 200 мм. У всіх балках повздовжньою робочою арматурою була стержнева арматура класу А400С діаметром 12 мм, а конструктивна і поперечна класу Вр-І діаметром 5 мм, крок поперечної арматури 75...100 мм. З'єднання арматури у просторовому каркасі виконано в заводських умовах контактним зварюванням. У верхній зоні експериментальних балок бетонували по два металеві стержні діаметром 12 мм на відстані 200 мм один від одного з кріпленнями для приладів замірювання деформацій бетону.

Всі балки бетонувалися в заводських умовах з одного замісу бетону. Паралельно з відповідними балками бетонувались контрольні куби та призми. Для виготовлення зразків склад бетону прийнятий Ц:П:Щ=1:1.14:2.62 при водоцементному відношенні В/Ц=0.35. Цемент марки М-400 Миколаївського цементного заводу. Пісок використано кварцовий Славутського кар'єру Хмельницької області без домішок з модулем крупності $M_c=2.04$, щебінь гранітний Селіщанського кар'єру Рівненської області фракції 5...10 мм – 45%, 10...20 мм – 55%.

Для визначення характеристик міцності, деформативності, тріщиностійкості експериментальних балок без впливу підсилення було проведено їх випробування на згин короткочасним навантаженням.

Завантаження балок відбувалося двома зосередженими силами, прикладеними по верхній грані в третинах прольоту (рис. 2). Навантаження прикладалися ступенями 5% до утворення тріщин і далі 10% з витримкою

після кожної ступені 15 хв. З них 10 хв. – до знімання показів приладів і 5 хв. – під час знімання показів. Прикладання зосереджених сил відбувалося за допомогою гідравлічного домкрату потужністю 500 кН (50 т) та розподільчої траверси. Значення зусилля контролювалося зразковим манометром, протарованим разом з насосною станцією і домкратом, а також двома кільцевими динамометрами, які розташовувались на опорах балок. При цьому один динамометр був рухомим, а другий - нерухомим.

Прогини балок замірювалися за допомогою чотирьох прогиномірів годинникового типу з ціною поділки 0.01 мм. Два з них встановлені на опорах, на верхній грані балки. Два інших індикатора підводилися до нижньої грані балки: в місці забетонованого стержня і посередині балки. Індикатори кріпилися на штативах, що розташовувались на окремих опорах незалежно від балки.



Рис. 2. Загальний вигляд дослідної балки та стенду для випробування

Деформації бетону замірювалися за допомогою 11-ти мікроіндикаторів годинникового типу зі шкалою 0,001 мм. Один індикатор закріплювався у забетонованих металевих стержнях на висоті від грані балки $h=50\text{мм}$ для замірювання деформацій стиснутої зони бетону і ще один у додатково наклеєних тримачах для дублювання показів, ще два індикатори – на арматурних стержнях. Інші 8 індикаторів були наклеєні по бокових гранях балки з базою вимірювання 200 мм. Це давало можливість встановити деформації бетону по висоті перерізу балки. Індикатор, закріплений у верхній точці стержнів давав деформації бетону на висоті $h=50\text{-}55\text{мм}$ (дублюючий індикатор закріплювався на висоті $h=30\text{мм}$). За допомогою, спеціально розробленої методики ці деформації приводилися до рівня верхньої грані стиснутої зони бетону.

Результати та дискусія. Руйнування контрольних зразків відбулось в наслідок текучості робочої арматури. Графіки відносних деформацій арматури та бетону балки БЗ 1.01 подано на рис. 3, 4 та балки БЗ 1.02 на рис. 5, 6.

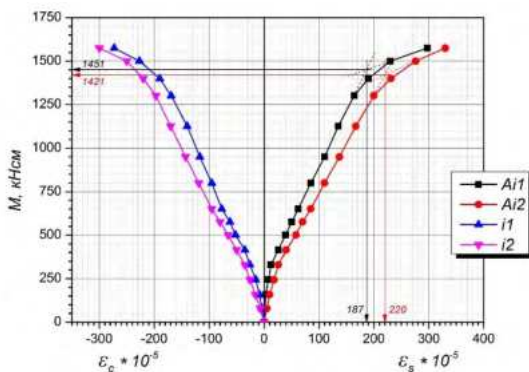


Рис. 3. Балка БЗ 1.01. Деформації арматури та крайніх стиснутих фібр бетону.

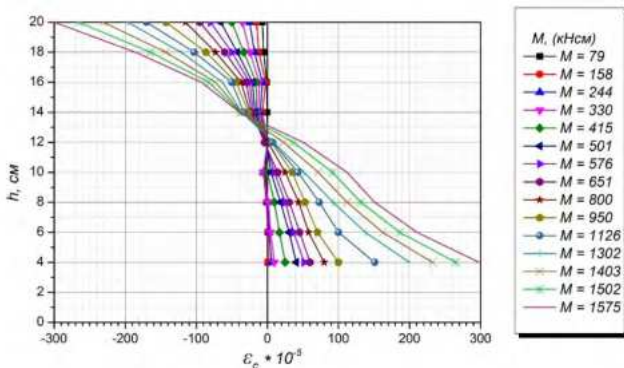


Рис. 4. Балка БЗ 1.01. Деформації фібр бетону по висоті перерізу.

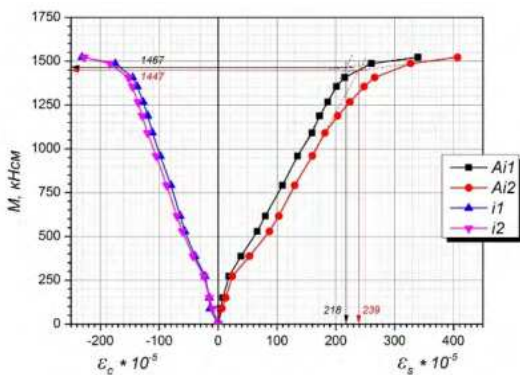


Рис. 5. Балка БЗ 1.02. Деформації арматури та крайніх стиснутих фібр бетону.

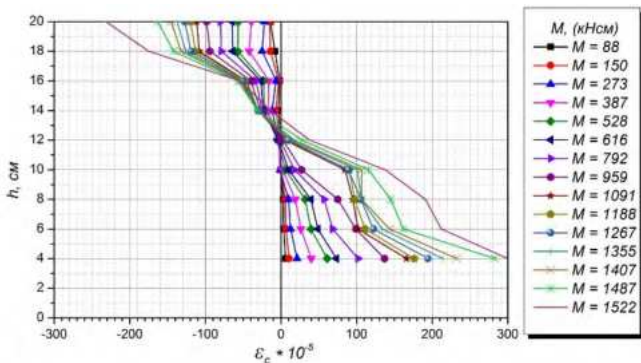


Рис. 6. Балка БЗ 1.02. Деформації фібр бетону по висоті перерізу

За результатами випробувань контрольних зразків визначена фактична несуча здатність балки, що дорівнює середньому значенню моментів текучості робочої арматури ($M_{u,exp}$) = 1447 кНсм (рис. 7).

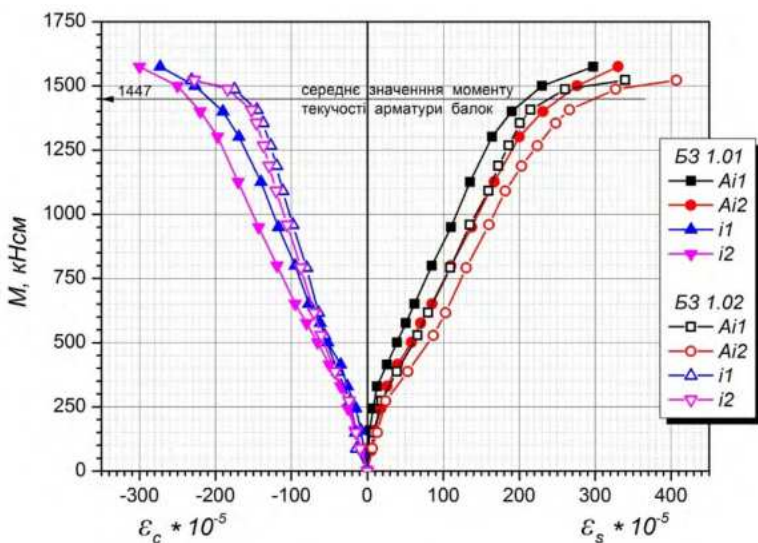


Рис. 7. Балки БЗ 1.01 та БЗ 1.02. Деформації арматури та крайніх стиснутих фібр бетону.

Результати випробування невідсилених дослідних зразків наведено в табл. 1.

Таблиця

Результати випробування невідсиленних дослідних зразків

№	Балка	Прилад	Граничний момент M_u^{exp} , кНсм	Відносні деформації ε_{s0}	Середні значення	
					$\overline{M_u^{exp}}$	$\overline{\varepsilon_{s0}}$
1	БЗ 1.01	$Ai1$	1451	0,00187	1447	0,00204
		$Ai2$	1421	0,00220		
2	БЗ 1.02	$Ai1$	1467	0,00218		
		$Ai2$	1447	0,00239		

На графіках деформацій арматури та бетону підсиленних зразків для порівняння подаємо графіки деформацій арматури та бетону контрольних зразків. Для зручного читання апроксимуємо графіки рис. 7 програмним комплексом (рис. 8, 9).

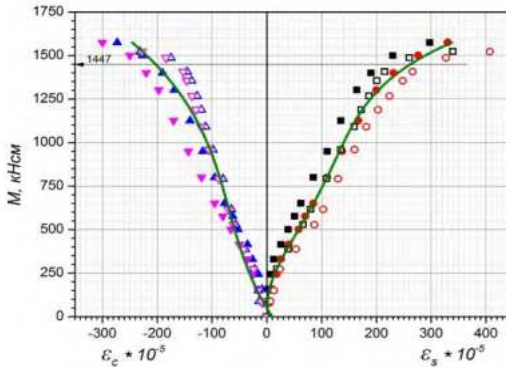


Рис. 8. Множина вихідних значень та апроксимуючі криві.

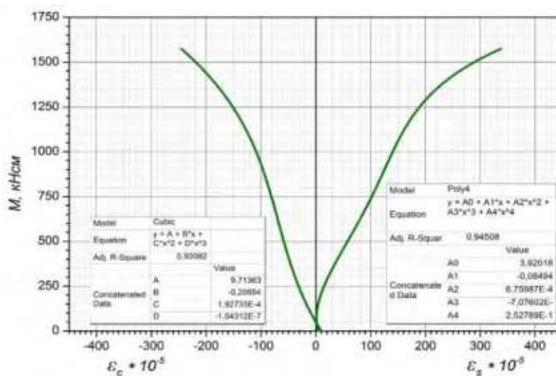


Рис. 9. Параметри апроксимуючих кривих.

Залізобетонні балки БП 1.03-05 та БП-1.04-05, підсилені системою Ruredil X Mesh Gold при 50% від несучої здатності контрольних невідсиленних зразків. Графіки відносних деформацій арматури та бетону балки БП 1.03-0.5 подано на рис. 10, 11.

Графіки відносних деформацій арматури та бетону балки БП 1.04-0.5 подано на рис. 12, 13.

Руйнування контрольних зразків відбулось в наслідок текучості робочої арматури. Середні відносні деформації видовження арматури $\overline{\varepsilon_{s0,rl}}$ були в межах 0,00216...0,00238. Величина цих деформацій узгоджується зі значеннями, отриманими після випробування зразків арматурної сталі ($\varepsilon_{s0} = 0,00150 \dots 0,00260$), а також зі середніми значеннями, отриманими після випробування контрольних балок ($\overline{\varepsilon_{s0}} = 0,00204 \dots 0,00229$).

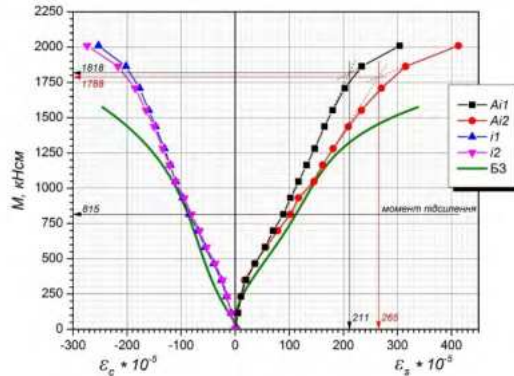


Рис. 10. Балка БП 1.03-0.5. Деформації арматури та крайніх стиснутих фібр бетону.

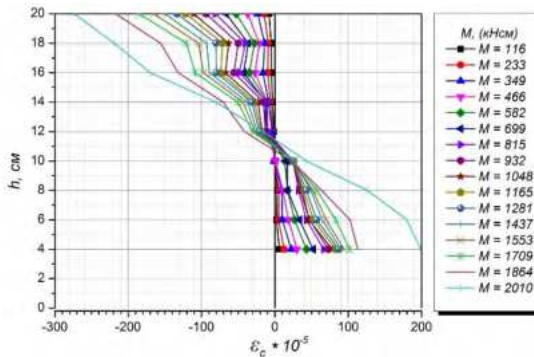


Рис. 11. Балка БП 1.03-0.5. Деформації фібр бетону по висоті перерізу

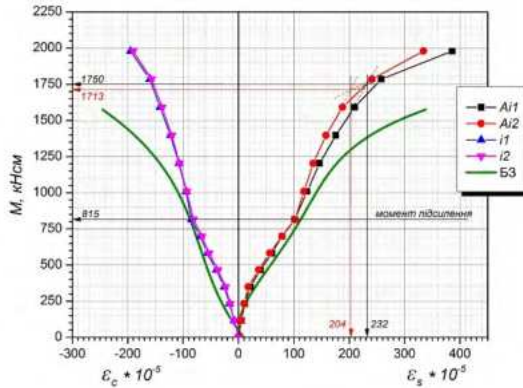


Рис. 12. Балка БП 1.04-0.5. Деформації арматури та крайніх стиснутих фібр бетону.

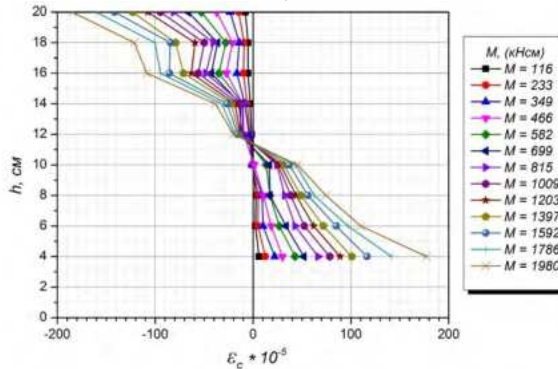


Рис. 13. Балка БП 1.04-0.5. Деформації фібр бетону по висоті перерізу

При цьому деформації арматури балок, підсилених при навантаженні $0.5M_u^{exp}$ досягнули граничних значень при дії моменту на 20...25% більшому за M_u^{exp} .

На графіках відносних деформацій арматури та крайніх стиснутих фібр бетону після моменту підсилення спостерігається зміна кута нахилу графіку. Це відбувається в наслідок збільшення жорсткості перерізу через включення в роботу елементів підсилення.

Після текучості робочої арматури спостерігалосся відшарування сітки від поверхні бетону в зоні чистого згину. Вимірювання контактних напруження на межі зчеплення не проводили, тому межах даного експерименту неможливо точно виявити основні чинники відшарування композиту. Імовірно причиною відшарування можна припустити велику ширину розкриття нормальних тріщин, що привело до розтріскування розчину підсилення.

Через великий приріст прогинів після текучості робочої арматури було неможливо контролювати рівень навантаження аж до фізичного руйнування балки. Руйнування відбулось через роздроблювання стиснутої зони бетону. При цьому відшарування сітки продовжувалося в напрямку до опор проте повного відшарування не відбулося. Роздроблювання бетону було плавним та поступовим, що свідчить про пластичний характер руйнування балки.

Висновки. Внаслідок підсилення залізобетонних балок системою Ruredil X Mesh Gold відбувається жорсткості перерізу через включення в роботу елементів підсилення, а обрана система зчеплення сітки Ruredil X Mesh Gold з поверхнею бетону було досягнуто без додаткових анкених пристроїв. Несуча здатність підсилених залізобетонних балок у порівнянні з непідсиленими зросла на 25%.

1. Бабич Є. М./ Розрахунок і конструювання залізобетонних балок : навч. посіб. / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич. – 2-ге вид. перероб. і доп. – Рівне : НУВГП, 2017. – 191 с.

Babych E.M., Babych E.M./Calculation and construction of reinforced concrete beams: textbook. - 2nd ed. - Rivne: NUVGP, 2017. - 191 p.

2.Ткачук, І. А. Несна здатність залізобетонних згинаних конструкцій при силових, деформаційних та високотемпературних впливах. Дороги і мости, (11), 2009. ст. 349-353.

Tkachuk, I.A/ Carrying capacity of reinforced concrete bent structures under power, deformation and high temperature influences. Roads and Bridges, (11), 2009. pages 349-353.

3. Бліхарський, Я. З., Копійка, Н. С./ Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2019 (37), ст. 316-322.

Blikharskyu Y.Z., Kopyika, N.S./ Research of damaged reinforced concrete elements, basic methods of their restoration and strengthening. Resource-saving Materials, Structures, Buildings and Structures, 2019 (37), pages. 316-322.

4. Воскобійник О.П./Типологічне порівняння дефектів та пошкоджень залізобетонних, металевих та сталезалізобетонних балкових конструкцій Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"- 2010. - № 662. - ст. 97-103.

Voskobiynyk O.P./ Typological comparison of defects and damages of reinforced concrete, metal and steel-reinforced concrete beam structures. Nat. Lviv Polytechnic University Journal - 2010. - № 662. - pages 97-103.

5. Fouzia B., Fouzi H.M., Noureddine F./ Concrete Structures and the Aggressive Environments: Experimental and Numerical Simulation // Conference: International Conference on Water, Informatics, Sustainability, and Environment iWISE2019, At: Carleton University – Ottawa, August 2019

6. Samarai M., Saad R., Amer O., Tahmaz A., Marei Y./ Repair of major faculty concrete structures, 2019. International Operations & Maintenance Conference 2019 17th Edition . At: Dubai - United Arab Emirates, 4 p.

7. Борисюк, О. П., Ю. Ю. Зятюк./ Напружено–деформований стан залізобетонних балок підсилених під навантаженням сталевібробетоном і композитами при дії малоциклових навантажень. Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди № 33 (2016), ст. 303-313.

Borisyk, O.P., Zatiuk Yu. Y./ Stress-deformed state of reinforced concrete beams reinforced under load with steel fiber and composites under the action of low-cycle loads. Resources, Materials, Structures, Buildings and Structures № 33 (2016), pages 303-313.

8. Tryapitsin Y., Pakhomov V., Voinov S./ Analysis and regulation of the stress-strain state of structures with reliability. E3S Web of Conferences, vol. 138, № 01016 (2019), CATPID-2019/URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801016> (last access: 09.02.2020).

9. Вискобійник О.П., Китаєв О.О., Макаренко Я.В., Бугаєнко Є.С. Експериментальні дослідження залізобетонних балок з дефектами та пошкодженнями, які викликають косий згин. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), 2011.- Вип. 1 (29), ст. 87-92.

Vyskobiynyk O.P., Kitaev O.O., Makarenko YA.V., Bugaenko E.S./ Experimental investigations of reinforced concrete beams with defects and damages that cause a sloping bend. Collection of scientific works (industry engineering, construction), 2011. - Issue. 1 (29), pages 87-92.

10. Christodoulou C., Goodier C. I./ Corrosion management of reinforced concrete structures. Loughborough University's Institutional Repository- Concrete (London), UK-2014-pages.37-39.

11. Mongelós. P. D. B. /Maintenance support strategies for reinforced concrete structures under corrosion risk. Doctoral thesis. Universidade de Aveiro Ano, 2018. Departamento de Engenharia Civil.-221 p.

12. Bobalo T., Blicharsky Y., Kopyika N., Volynets M./ Theoretical analysis of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. vol.708-012045

13. Christodoulou, C./ Repair and Corrosion Management of Reinforced Concrete Structures. Loughborough's Research Repository, Loughborough University. EngD thesis, 2019./ URL: <https://hdl.handle.net/2134/13577>.

14. Indeitsev D.A., Porubov A.V., Skubov D. Yu., Lukin A.V., Popov I.A., Vavilov D.S./ On the influence of the microstructure on stress-strain state of the material. Materials Physics and Mechanics, vol. 35, 2018, pages 66-70.

15. Воскобійник О.П./ Класифікація дефектів сталезалізобетонних каркасів. Строительство. Материаловедение. Машиностроение.-Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.- 2012.- Вип. 65.- ст. 155-160.- Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2012_65_25/

Voskobiynyk O.P./ Classification of defects of steel-concrete frames. Construction. Material science. Mechanical Engineering. - Series: Innovative Technologies for the Life Cycle of residential, civil, industrial and transport objects. 2012. Issue. 65.- pages 155-160.- Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2012_65_25

16. Thomas M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J. Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book (No. FHWA-HIF-13-019), 2013, United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.

17. Habita M. F./ Contribution to the Study of the Alkali-Silica-Reaction Effect, on the Mechanical Behaviour of Reinforced Concrete Beams. 1992. PhD Thesis. Thesis for obtaining of doctorate diploma.

18. Christodoulou, C./ Repair and corrosion management of reinforced concrete structures, EngD Thesis, Loughborough University, 2013.

19. Varlamov A., Rimshin V., Tverskoi, S./ A method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures. EDP Sciences. In E3S Web of Conferences, 2019. Vol. 91, pages. 02046.

20. Хміль Р. С., Вашкевич Р. В., Бліхарський Я. З./ Напружено-деформований стан залізобетонних балок, пошкоджених агресивним середовищем. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009. № 655: Теорія і практика будівництва. ст. 278–285.

Khmil R.E., Vashkevych R.V., Blikharsky J.Z./ Stress-deformed state of reinforced concrete beams damaged by the aggressive environment. Bulletin of the "Lviv Polytechnic" National University, 2009. № 655: Theory and practice of construction. pages 278–285.

21. Бліхарський Я.З., Копійка Н.С./ Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2019. Вип. № 77. ст.29-37.

Blikharsky Y.Z., Kopyika N.S./ Investigation of methods of monitoring and modeling of corrosion processes in reinforced concrete elements. Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2019. Vol. 77. pages 29-37.

22. Sidorov D., Dorozhinskiy V./ Comparison of the stress-strain state of the reinforced concrete structure under various mathematical models of concrete. MATEC Web of Conferences 251, 04032. 2018. IPICSE-2018. pages 1-5.

23. Radchenko A., Radchenko P., Batuev S., Plevkov V./ Modeling of fracture of reinforced concrete structures under impact. Architecture and Engineering.2019. Vol. 4, Issue 3, pages 22-29.

24. Tryapitsin, Y., Pakhomov, V., Voinov, S./ Analysis and regulation of the stress-strain state of structures with reliability. In E3S Web of Conferences Vol. 138, pages 01016. EDP Sciences.

25. Zandi, H. K. Structural behaviour of deteriorated concrete structures. Doctor of Philosophy. 2010./ Available through: [http://dx. doi. org/10.1016/j. cemconres. 2010.11. 007](http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.007) (Accessed on 10.02.2020).

26. Dai, L., Bian, H., Wang, L., Potier-Ferry, M., Zhang, J./ Prestress Loss Diagnostics in Pretensioned Concrete Structures with Corrosive Cracking. Journal of Structural Engineering, 2020. Vol. 146, Issue 3, 04020013. pp. 1-11.

27. Geiker M. R., Justnes H./ Prediction of chloride induced corrosion for service life modeling. International Congress on Durability of concrete, 2012. 12 p.

28. A. Küter, M. R. Geiker, J. F. Olesen, H. Stang, C. Dauerschmidt, and M. Raupach./ Chloride Ingress in Concrete Cracks under Cyclic Loading. in Proceedings of Third International Conference on Construction Materials, ConMat'05, Vancouver, Canada. 22nd – 24th of August, 2005.

29. Ayinde O. O., Zuo X. B., Yin G. J./ Numerical analysis of concrete degradation due to chloride-induced steel corrosion. Advances in concrete construction, 2019. Vol. 7- Issue 4, pages 203-210.

30. Webster, M. P. The assessment of corrosion-damaged concrete structures (Doctoral dissertation, University of Birmingham). 2000. 318 p.

31. Teplý B., Novák D./ Limit states of concrete structures subjected to environmental actions. Engineering Mechanics, 2012. Vol. 99, pages 1363–1367.

32. Le D. B., Tran, S. D., Dao, V. T., Torero, J./ Deformation capturing of concrete structures at elevated temperatures. Procedia engineering, 210, 2017 pages 613-621.

33. Elyasigorji A., Rezaee M., Ghorbanpoo, A./ Magnetic Corrosion Detection in Concrete Structures. In International Conference on Sustainable Infrastructure, 2019. p. 175.