

УДК xxx.xxx.xx

РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ ЗА НАЯВНОСТІ ПОШКОДЖЕННЯ СТИСНУТОЇ ЗОНИ БЕТОНУ

CALCULATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF RC BEAM IN THE PRESENCE OF COMPRESSIVE ZONE DAMAGE

Клим А.Б., аспірант, ORCID: 0000-0001-7871-4773, Бліхарський Я.З. д.т.н., проф., ORCID: 0000-0002-3374-9195, Бобало Т.В. к.т.н., доц., ORCID: 0000-0001-9581-5533 (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

Klym A.B., PhD student, Blikharskyu Y.Z., doctor of technical sciences, professor., Bobalo T.V., candidate of technical sciences, associate professor., (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

В даній статті проведено аналіз апріорних джерел нових методів розрахунку несучої здатності та методик відновлення стиснутої зони бетону. Проведено теоретичний розрахунок несучої здатності залізобетонної балки без пошкодження і за умови пошкодження стиснутої зони бетону.

Research on the calculation of the load-bearing capacity of reinforced concrete beams, taking into account damage to the compressed zone of concrete, along with the consideration of operational influences and external factors, is essential for understanding the behavior of structures. Recent studies indicate significant progress in understanding and approaches to this process, with significant attention being given to the analysis of damage in the compressed zone of concrete. Early restoration of damage allows for reliable operation without the risk of failure. In this article, a theoretical calculation of the stress-strain state of a reinforced concrete beam was performed using the second equilibrium form, and graphs illustrating the relationship between concrete and reinforcement deformation and moment were constructed. The calculation was conducted for two scenarios: an intact reinforced concrete beam with a height of 200 mm and a damaged reinforced concrete beam with a height of 150 mm. The results showed a 35% reduction in load-bearing capacity compared to the operational values according to the first limit state group. Additionally, the occurrence of the allowable deflection limit under the second limit state group was predicted to happen rapidly.

Ключові слова: несуча здатність, залізобетонна балка, пошкодження, стиснута зона бетону, напружено-деформований стан, деформація.

Вступ. Залізобетонні балки використовуються широко в будівництві, як необхідна складова для створення міцних та стійких конструкцій. Однак, внаслідок експлуатації та впливу зовнішніх факторів, бетон може піддаватись пошкодженню, зокрема у стиснутих зонах, що може суттєво знизити несучу здатність балки [1].

Розрахунок несучої здатності залізобетонної балки за наявності пошкодження та відновлення стиснутої зони бетону є важливим етапом проектування та реконструкції будівельних конструкцій. Відновлення стиснутої зони бетону може включати методи, такі як зароблення тріщин, встановлення арматури або застосування ремонтних композитних матеріалів та високоміцних розчинів. Однак, перед застосуванням відновлювальних заходів необхідно здійснити розрахунок несучої здатності залізобетонної балки з урахуванням пошкодження та відновлення стиснутої зони.

Розуміння методів розрахунку несучої здатності залізобетонної балки дозволить ефективно вирішувати завдання, пов'язані з реконструкцією та підсиленням будівельних конструкцій, а також забезпечувати їх безпеку та довговічність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень в галузі розрахунку несучої здатності залізобетонної балки свідчить про значний прогрес у розумінні та підходах до цього процесу. Основи сучасного розрахунку описано в книжках [2,3], де є впроваджено в розрахунок нової нормативної бази в галузі будівництва на основі чинних норм [4-6], що гармонізовані та поєднанні із європейськими нормами [7]. Недавні дослідження зосереджуються на врахуванні пошкоджень та відновленні стиснутої зони бетону, що має велике значення для забезпечення надійності та стійкості балки.

Один з ключових аспектів, який досліджується - це аналіз розміру та ступеня пошкоджень стиснутої зони бетону. Відомо, що найпоширенішими дефектами є тріщини, розтріскування та злушення бетонного шару. Дослідники розробляють методики та алгоритми для точного визначення розміру та ступеня цих пошкоджень, що дозволяє здійснювати більш точний розрахунок несучої здатності залізобетонної балки за таких умов. У статті [8] якраз був проведений детальний аналіз основних видів дефектів, зокрема тріщин, розтріскування та злушення бетонного шару, та їх впливу на міцність та стійкість залізобетонних елементів. Автори вивчили механізми формування цих дефектів, їх поширення та розвиток, а також способи виявлення та діагностики. У результаті дослідження було показано, що наявність дефектів, може значно погіршити несучу здатність залізобетонних елементів. Ці дефекти можуть призводити до зниження міцності, зсуву, деформацій та пошкодження структури елементів. Дослідники також

розробили методику для визначення розміру та ступеня пошкоджень, що дозволяє врахувати ці параметри при розрахунку несучої здатності залізобетонної балки. Це дозволяє інженерам та проектувальникам більш точно оцінювати стан і надійність пошкоджених елементів та визначати необхідні заходи щодо їх відновлення та підсилення.

Реконструкції та підсилення будівель та споруд є дуже актуальною в сучасних умовах. Зростаюча необхідність в збереженні та модернізації існуючого будівельного фонду, який переважно у промислових умовах та житлових будівлях працює за межами експлуатаційного терміну, вимагає розробки ефективних та надійних методів реконструкції та підсилення, щоб забезпечити безпеку, стійкість та тривалість експлуатації будівельних споруд і будівель. У книжці [9] автором З.Я. Бліхарського розглядаються основні аспекти процесу реконструкції та підсилення будівельних та споруджених об'єктів. Книжка є навчальним посібником, де детально розглядаються методи, технології та прийоми, що використовуються для виконання реконструкційних робіт та підсилення будівель з метою покращення їхньої стійкості, надійності та функціональності.

Помітний прогрес також відбувається у використанні нових матеріалів та технологій для відновлення та підсилення стиснутої зони бетону. Дослідження включають в себе застосування композитних матеріалів та високоміцних розчинів, спеціальних армувань та інших інноваційних методів, що забезпечують покращення несучої здатності залізобетонних балок та збільшення їх довговічності. Саме у статті [10] автори Н. Hoshnavis і М. Golsorkhi розглядають метод відновлення стиснутої зони бетону залізобетонних балок за допомогою високоміцного розчину. Головна мета дослідження полягає в оцінці ефективності цього методу та його впливу на несучу здатність балок. Результати їх дослідження дозволяють зробити висновок про ефективність використання даного методу відновлення стиснутої зони бетону залізобетонних балок. Цей метод може бути використаний для покращення несучої здатності балок, збільшення їх жорсткості та покращення загальної структурної надійності.

Важливим напрямом досліджень є також розробка комп'ютерних моделей та програмного забезпечення для розрахунку несучої здатності залізобетонних балок з урахуванням пошкоджень та відновлення стиснутої зони бетону. Це дозволяє інженерам швидше та ефективніше проводити розрахунки, використовуючи різні сценарії пошкоджень та параметрів відновлення.

Загалом, останні дослідження показують, що розрахунок несучої здатності залізобетонної балки з урахуванням наявності пошкоджень та відновлення стиснутої зони бетону є складним і багатоаспектним процесом. Тому дана тема є актуальною, яку необхідним продовжувати дослідження в даному напрямку та розширювати можливості розуміння поведінки конструкції при пошкодженні. Використання новітніх методик, матеріалів та

комп'ютерних інструментів дозволяє підвищити точність розрахунків та забезпечити надійність та довговічність залізобетонних балок.

Постановка мети і задачі досліджень. Мета даної статті полягає в огляді літератури щодо методів розрахунку несучої здатності залізобетонної балки, а також вплив на неї за наявності пошкодження стиснутої зони бетону. Основні аспекти, які будуть розглянуті, включають визначення пошкодження стиснутої зони бетону, метод розрахунку несучої здатності залізобетонної балки з пошкодженням.

Методика дослідження і теоретичний аналіз. Для даного розрахунку несучої здатності використаємо наступні фізичні параметри залізобетонної балки, яка в подальшому буде експериментально випробувана, та порівнюватиметься із результатами теоретичного розрахунку. Залізобетонна балка має геометричний розмір $2100 \times 200 \times 100$ мм. Поздовжня арматура балки складається зі сталевого прокату $\text{Ø}20\text{A}500\text{C}$ в розтягнутій зоні та $2\text{Ø}6\text{A}240\text{C}$ в стиснутій зоні. Поперечна арматура виконана у вигляді U-подібних хомутів $\text{Ø}6\text{A}240$ з кроком 75 мм (Рис. 1). Конструктивну арматуру з'єднували в арматурний каркас із застосуванням контактної зварювання в промислових умовах. Бетон класу міцності $\text{C}30/35$.

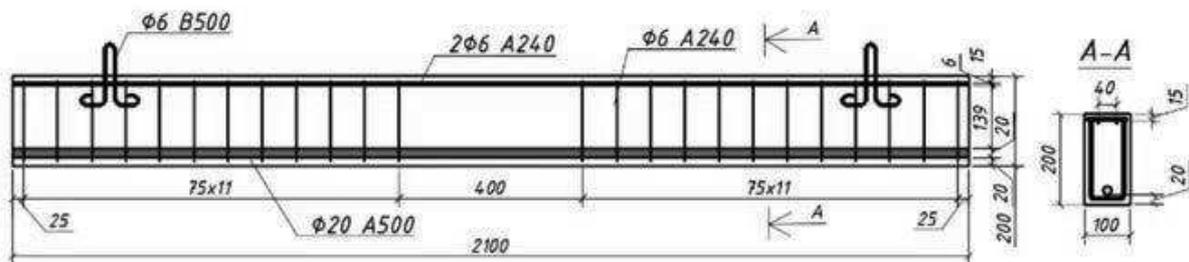


Рис. 1. Загальний вигляд залізобетонної балки

В результаті пошкоджені стиснутої зони бетону висота стиснутої зони бетону зменшується, що призводить до зменшення несучої здатності та раптового руйнування. Загальний вигляд моделі в результаті такого пошкодження показаний на рис. 2, де в лабораторних умовах балка зазнала руйнування стиснутої зони бетону, що в майбутньому буде відновлена високоміцним розчином. Висота пошкодження стиснутої зони бетону $x'=50$ мм, висота балки становить $h=150$ мм.



Рис. 2. Вигляд залізобетонної балки із зруйнованою стиснутою зоною бетону

За умов використання дійсних діаграм деформування бетону « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » та арматури « $\sigma_s - \varepsilon_s$ » за формулою 3.5 [5] визначення напружено-деформованого стану прямокутного перерізу залізобетонної балки за другою формою рівноваги, де в перерізі є зона розтягу для експериментального зразка записується у вигляді:

$$\frac{bf_{ck}\varepsilon_{c1}}{\chi} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0$$

$$\frac{bf_{ck}\varepsilon_{c1}^2}{\chi^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x - z_{si}) - M = 0$$

де a_k – коефіцієнти поліному, які наведені в додатку Д [6] для двох груп граничних станів; $\chi = 1/r = (\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c2})/h$ – кривизна вигнутої осі в перерізі; $\varepsilon_{c(1)}$ – деформація стиснутої фібри бетону; ε_{c2} – осереднені деформації розтягнутої фібри бетону; $\gamma = \varepsilon_{c(1)}/\varepsilon_{c1}$; ε_{c1} – деформації при максимальних напруженнях в бетоні; $x = \varepsilon_{c(1)}/\chi$ – висота стиснутої зони; z_{si} – відстань і-того стрижня арматури від найбільш стиснутої грані перерізу; N , M – значення зовнішньої нормальної сили і згинального моменту відповідно; при відсутності попереднього напруження $N = 0$.

Відповідно до прийнятих передумов при використанні спрощеної діаграми деформування бетону рівняння рівноваги спрощуються і має вигляд в залежності від того в яких межах залишається, а саме:

1. для другої форми рівноваги в межах $x < h$ і $0 \leq \varepsilon_{c(1)} \leq \varepsilon_{c3,ck}$

$$\frac{bE_{ck}\varepsilon_{c(1)}^2}{2\chi} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0$$

$$\frac{bE_{ck}\varepsilon_{c(1)}^2}{3\chi^2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \frac{(\varepsilon_{c(1)} - \chi z_{si})}{\chi} - M = 0$$

2. для другої форми рівноваги в межах $x \leq h$ і $\varepsilon_{c3,ck} \leq \varepsilon_{c(1)} \leq \varepsilon_{cu3,ck}$

$$\frac{bf_{ck}}{2\chi} (2\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c3,ck}) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0$$

$$\frac{bf_{ck}}{3\chi^2} (3\varepsilon_{c(1)}\varepsilon_{c3,ck} - 2\varepsilon_{c3,ck}^2) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \frac{(\varepsilon_{c(1)} - \chi z_{si})}{\chi} - M = 0$$

де $\varepsilon_{c3,ck}$ – деформації бетону при досягненні напруженнями величини f_{ck} ; $\varepsilon_{cu3,ck}$ – граничні деформації стиснутого бетону.

Таблиця 1.

Основні фізичні характеристики бетону і арматури

Арматура			Бетон			a_{ki}	-	Геометрія перерізу		
1 шар (n=1), Ø20			Клас	C30/35		a_{k1}	2,391			
Клас	A500C		γ_c	1		a_{k2}	-1,668	h	200	мм
f_{yk}	500	МПа	f_{ck}	35	МПа	a_{k3}	0,07917	b	100	мм
E_s	210000	МПа	$\epsilon_{c(1)}$	0,00385		a_{k4}	0,2818	Z_{s1}	20	мм
ϵ_{ud}	0,04		$\epsilon_{c1,ck}$	0,00174		a_{k5}	-0,08392	Z_{s2}	170	мм
ϵ_s	0,0024									
A_s	314	мм ²								

Результати досліджень. В результаті виконаного розрахунку за формулами другої форми рівноваги напружено-деформованого стану залізобетонної балки було отримано результати по перерізу за методом ітерації (Табл. 2).

Таблиця 2.

Результати за методом ітерації по перерізу

-	M	ϵ_{s2}	$\epsilon_{c(1)}$	-	M	ϵ_{s2}	$\epsilon_{c(1)}$
0,05	3,132319	-0,00032	0,000163	0,55	22,81309	-0,00294	0,0017875
0,1	6,077326	-0,00061	0,000325	0,6	22,89132	-0,00339	0,00195
0,15	8,834234	-0,0009	0,000488	0,65	22,94144	-0,00384	0,0021125
0,2	11,40288	-0,00116	0,00065	0,7	22,96887	-0,00427	0,002275
0,25	13,78372	-0,00141	0,000813	0,75	22,97618	-0,0047	0,0024375
0,3	15,97788	-0,00164	0,000975	0,8	22,9666	-0,00511	0,0026
0,35	17,98709	-0,00186	0,001138	0,85	23,02372	-0,00511	0,0027625
0,4	19,83079	-0,00206	0,0013	0,9	23,07504	-0,00509	0,002925
0,45	21,49453	-0,00225	0,001463	0,95	23,10908	-0,00506	0,0030875
0,5	22,69779	-0,00249	0,001625	1	23,11847	-0,00504	0,00325

Згідно до даних (Табл. 2) було побудовано графік залежності деформації бетону і арматури до моменту, який виникає від зовнішнього навантаження (Рис. 3.)

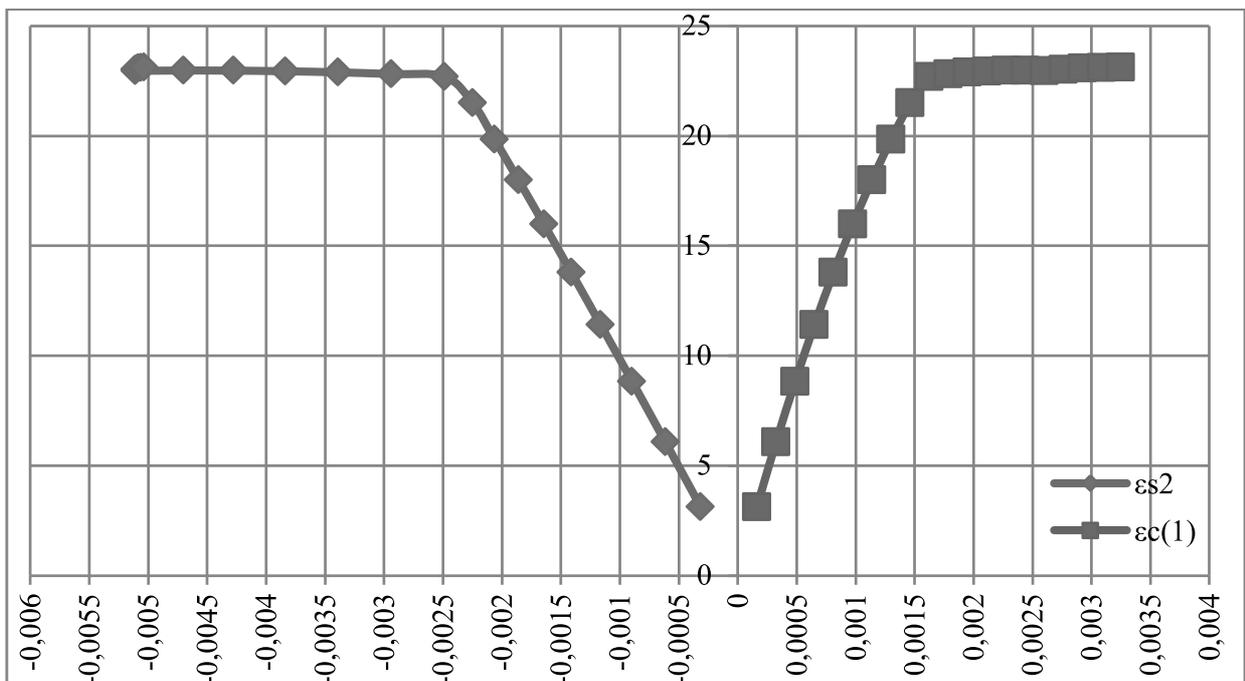


Рис. 3. Графік деформації бетону і арматури (в непошкоджені балці $h=200\text{мм}$)

Побудовано графік залежності деформації бетону і арматури до моменту, який виникає від зовнішнього навантаження при умові коли пошкоджена стиснута зона бетону на 50 мм і виключається з роботи, тому фактичний переріз балки становить $h=150\text{ мм}$, топто висота стиснутої зони зменшена (Рис. 4).

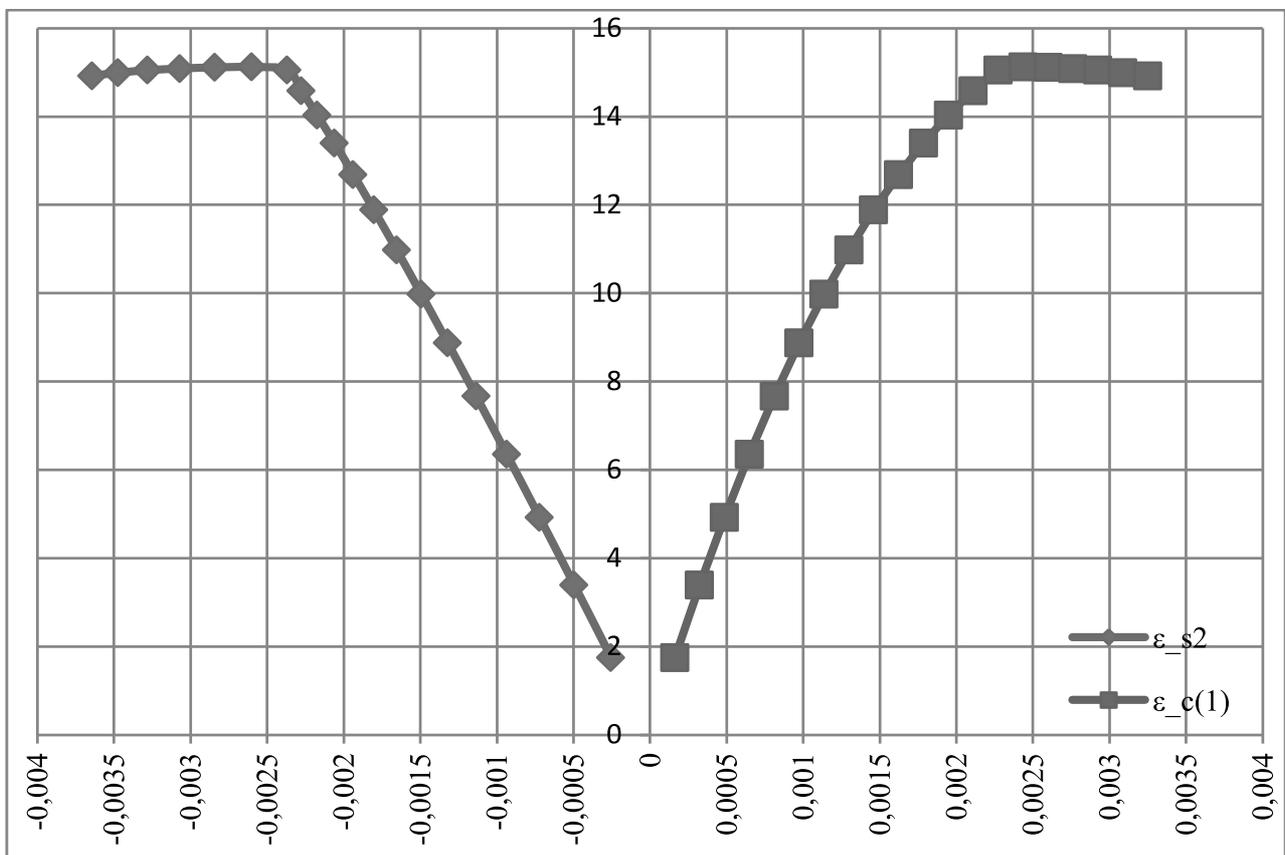


Рис. 4. Графік деформації бетону і арматури (в пошкоджені балці $h=150\text{мм}$)

Досягнення граничних значень деформації в фібрі бетону при меншому моменті в результаті зменшення висоти стиснутої зони бетону призводить до того що арматура бере на себе більшу частину моменту і в ній виникають швидкий приріст деформації. Згідно до отриманих даних графічних і табличних при пошкодженні стиснутої зони несуча здатність зупиняться при моменті у 15,02 кНм, де деформація фібри бетону стиску наближається до граничного значення 0,00325 в той же час деформації в арматурі складають 0,00364. При не пошкодженні стиснутій зоні бетону за дії моменту у розмірі 15,02 кНм значення деформації в арматурі сягають 0,00157 це майже у 2,5 рази менше ніж при пошкодженні стиснутій зоні. Такий швидкий приріст деформації в арматурі призводить до утворення шийки та миттєвий розрив, а також результатом цього буде велике значення прогину яке в рази перевищуватиме допустиме значення граничного прогину та стане на багато швидше не придатною до експлуатації за другою групою граничних станів ніж за першою.

Висновки. Згідно до отриманих графіків залежності деформації бетону і арматури до моменту за теоретичного розрахунку показали, що несуча здатність залізобетонної балки зменшилася ($M_{max}^{пошкод.} / M_{max}^{непошкод.} = 15,02/23,12$) на 35%. Зменшення несучої здатності 35% за характеристичним значенням являється суттєвою загрозою руйнування її при на багато менших навантаженнях від експлуатаційних, тому необхідним є відновлення стиснутої зони бетону.

В результаті аналізу при такому пошкодженні стиснутої зони балка втратить експлуатацію за другою групою граничних станів швидше першої, тому зменшення несучої здатності балки буде більше за 35%.

Для відновлення стиснутої зони пропонується використати високоміцний розчин Sika MonoTop-412-Eco із вмістом полімерної структури що забезпечить високу адгезію та зчеплення із основою бетону та повинен із своїми фізичними характеристиками міцності забезпечить відновлення орієнтовно до 90% від експлуатаційного навантаження.

1. Бліхарський, Я. З.; Копійка, Н. С. Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2019, 37: 316-322. doi:[10.31713/budres.v0i37.300](https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.300)

Blikharskyi, Ya. Z.; Kopyika, N. S. Doslidzhennia poshkodzhenykh zalizobetonnykh elementiv, osnovni metody yikh vidnovlennia ta pidsylennia. Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy, 2019, 37: 316-322. doi:[10.31713/budres.v0i37.300](https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.300)

2. Бліхарський З.Я. Реконструкція і конструювання згинаних залізобетонних елементів: Навчальний посібник / З.Я. Бліхарський, І.І. Кархут. – Львів: Видавничий дім Національного університету "Львівська політехніка", 2018 – 188 с. УДК 624.012.35(075.8)

Blikharskyi Z.Ia. Rekonstruktsiia i konstruiuvannia zghynanykh zalizobetonnykh elementiv: Navchalnyi posibnyk / Z.Ia. Blikharskyi, I.I. Karkhut. – Lviv: Vydavnychiy dim Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika", 2018 – 188 s. UDK 624.012.35(075.8)

3. Бабич Є. М., Бабич В. Є. Розрахунок і конструювання залізобетонних балок. Навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2017. 182 с.

Babych Ye. M., Babych V. Ye. Rozrakhunok i konstruiuvannia zalizobetonnykh balok. Navchalnyi posibnyk. Rivne : NUVHP, 2017. 182 s.

4. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Міністерство будівництва України, 2006. 77 с.

DBN V.1.2-2:2006 Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Kyiv : Ministerstvo budivnytstva Ukrainy, 2006. 77 s

5. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 97 с.

DBN V.2.6-98:2009 Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia proektuvannia. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 97 s

6. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. к Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 118 с.

DSTU B V.2.6-156:2010 Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia. k Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 118 s.

7. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Загальні правила для споруд (EN 1992-1-1: 2004)

Evrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii. Zahalni pravyla dlia sporud (EN 1992-1-1: 2004)

8. Лободанов М.М., Вегера П.І., Бліхарський З.Я./Аналіз впливу основних видів дефектів та пошкоджень на залізобетонну здатність залізобетонних елементів /Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Теорія і практика будівництва»-2018-№ 888, 2018. ст. 93-100/ УДК 624.046.2:539

Lobodanov M.M., Vehera P.I., Blikharskyi Z.Ia./Analiz vplyvu osnovnykh vydiv defektiv ta poshkodzhen na zalizobetonnu zdatnist zalizobetonnykh elementiv /Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika», seriia «Teoriiia i praktyka budivnytstva»-2018-№ 888, 2018. st. 93-100/ UDK 624.046.2:539

9. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель та споруд: Навчальний посібник – Львів: Видавничий дім Національного університету "Львівська політехніка",2008 – 108 с.

Blikharskyi Z.Ia. Rekonstruktsiia ta pidsylennia budivel ta sporud: Navchalnyi posibnyk – Lviv: Vydavnychiy dim Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika",2008 – 108 s.

10. Hoshnavis, N., & Golsorkhi, M. A.. Strengthening of reinforced concrete beams using high-strength concrete overlay. International Journal of Concrete Structures and Materials, 6(3), 2012. S. 155-163. doi: 10.1007/s40069-012-0028-6

Hoshnavis, N., & Golsorkhi, M. A.. Strengthening of reinforced concrete beams using high-strength concrete overlay. International Journal of Concrete Structures and Materials, 6(3), 2012. S. 155-163. doi: 10.1007/s40069-012-0028-6