ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК З ПОШКОДЖЕННЯМИ

З. Бліхарський, аспірант

ORCID ID: 0000-0002-4823-6405

П. Вегера, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-3437-1825

Т. Шналь, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-4226-9513

*Інститут будівництва та інженерії довкілля
Національного університету «Львівська політехніка»*

<https://doi.org/10.31734/architecture2019.20.038>

Бліхарський З., Вегера П., Шналь Т. Експериментальні дослідження несучої здатності залізобетонних балок з пошкодженнями

Під час експлуатації всі залізобетонні конструкції піддаються різноманітним впливам. Унаслідок цього в елементах виникають дефекти та пошкодження. Описано вплив пошкоджень розтягнутої арматури на несучу здатність залізобетонних балок. Пошкодження залізобетонних балок виконували за експлуатаційного рівня навантаження – 0,5 від несучої здатності контрольних зразків. Загалом було випробувано десять зразків. Змінними параметрами був діаметр розтягнутої арматури, який набував значень 16, 20 та 22 мм і тип пошкодження у вигляді одного отвору та п'яти отворів по центру розтягнутої арматури. Усі інші параметри (робоча висота, поперечний переріз елементів, розрахункова довжина, міцність бетону) були незмінними. Наведено результати експериментальних випробовувань, вказано вичерпання несучої здатності та фізичне руйнування зразків, побудовано графіки деформування розтягнутого армування та стиснутої зони бетону. За результатами випробування, суттєво менша несуча здатність зразків КБ-2.13 та КБ-2.14 з робочою арматурою діаметром 16 мм, і відхилення – 30,2%. У зразках, пошкоджених при рівнях навантаження, несуча здатність приблизно однакова – в межах 3,7...13,2%. Більшу несучу здатність пошкоджених зразків за рівнів навантаження з пошкодженою арматурою діаметром 20 мм (площа пошкодженої відповідає площі діаметра 16 мм) порівняно зі зразками з робочою арматурою діаметром 16 мм можна пояснити гіпотезою про термічнозмцнений шар. Аналізуючи отримані дані, встановлено, що рівень навантаження, за якого виконується пошкодження, впливає на несучу здатність залізобетонних зразків. У такому разі залишкова несуча здатність є меншою, ніж у зразках із непошкодженою арматурою аналогічного діаметра. На зміну несучої здатності впливають початковий діаметр арматури та наявність термічно зміцненого зовнішнього шару в розтягнутій арматурі. Також тип пошкодження впливає на розподіл деформацій та несучу здатність згинаних елементів. За більшої кількості дефектів за довжиною знижується концентрація напружень в одній точці, а відповідно, і її несуча здатність. Також згідно з результатами випробовувань встановлено, що початковий діаметр арматури не впливає на залишкову несучу здатність зразків.

Ключові слова: залізобетонні балки, пошкодження, дефекти.

Blikharkyi Z., Vehera P., Shnal T. Experimental researches of the bearing capacity of reinforced concrete beams with damages

In the process of exploitation, all reinforced concrete structures are exposed to various influences. As a result, defects and damages occur in the elements. This article describes influence of the damaged tensile reinforcement on the bearing capacity of reinforced concrete beams. Damage is applied to reinforced concrete beams with operating load level – 0,5 from the bearing capacity of control beams. The experiment tested 10 samples. Variable parameters included the diameter of tensile reinforcement, which acquired values 16, 20, and 22 mm, and a type of damage in the form of one or five holes in the center of tensile reinforcement. All other parameters (effective depth, cross section of elements, effective length, and strength of concrete) stayed unchanged. The article presents results of the experimental tests, shows the exhaustion of the bearing capacity and the physical destruction of the samples, the graphs of deformation of tensile reinforcement, and the compressed zone of concrete. According to the test results, samples DB-2.13 and DB-2.14 are significantly less capable to carrying capacity with the working reinforcement, having the diameter of 16 mm and a deviation is 30.2%. In the samples, damaged at load levels, the load carrying capacity is approximately the same and is within the range of 3.7 ... 13.2%. A greater load bearing capacity of damaged samples at the load levels with damaged reinforcement of 20 mm in diameter (damaged area corresponds to the diameter of 16 mm) was compared to the samples with working rebar, having the diameter of 16 mm due to the hypothesis of a thermally strengthened external layer of reinforcement. Analyzing the obtained data, one can confirm that the load level, at which the damage is performed, effects the load carrying capacity of reinforced concrete samples. In that case, the residual bearing capacity is lower than in the samples with undamaged reinforcement of the similar diameter. The replacement of the bearing capacity is influenced by the initial diameter of the valve and the presence of a thermally strengthened outer layer in the stretched armature. Moreover, the type of damage effects distribution of deformations and the bearing capacity of the flexural elements. Under increased number of defects and the length,

the stress concentration reduces at one point and thus, its carrying capacity decreases. According to the test results, it is established that the initial diameter of the reinforcement does not influence the residual bearing capacity of the samples.

Key words: reinforced concrete beams, damages, defects.

Постановка проблеми. Під час експлуатації залізобетонні балки отримують різні пошкодження та дефекти. Характерними дефектами є зменшення поперечного перерізу бетону чи розвиток корозії металевого армування. Розвиток недовіків спричинює зміну напружено-деформованого стану конструкції. Тому при визначенні залишкової несучої здатності та параметрів експлуатаційної придатності необхідно враховувати параметри цих дефектів. Особливу увагу треба звернути на те, що дефекти виникають за дії певного навантаження: починаючи від власної ваги і завершуючи експлуатаційним рівнем, що становить 0,5-0,7 від несучої здатності елемента. Таким чином цей фактор впливає на визначення залишкової несучої здатності при розрахунку, проте вимог у сучасних нормах чи рекомендацій щодо його врахування немає. Дослідження залізобетонних балок з пошкодженнями, які виникли за дії навантаження різного рівня інтенсивності, є актуальною темою та має істотне практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із напрямків дослідження дефектів залізобетонних балок, які зумовлюють зміну напружено-деформованого стану, є настання косого згину [1]. Дефекти залізобетонних конструкцій виникають від впливу одного, або декількох факторів, де «фактор» – це відхилення якості, форми або фактичних розмірів елементів та конструкцій від вимог нормативно-технічної чи проектної документації, які виникають при проектуванні, виготовленні та монтажі. Автори поділяють фактори на дві групи: ендегенні (характеризують внутрішній стан елемента) та екзогенні (спричинені зовнішніми чинниками). У дослідженні розглянуто ендегенні фактори, вплив яких призводить до виникнення в залізобетонних конструкціях складних видів деформацій. Робоча програма передбачала дослідження двох серій балок: у першій серії дефектом слугує неточність монтажу арматурного каркаса, у другій – руйнування захисного шару та корозія робочої арматури. На основі отриманих даних одержано епюри перерозподілу деформацій по перерізу, з настанням косого напружено-деформованого стану. Дослідження [2] стосувались імітації виникнення дефектів на межі з'єднання армування і бетону. На першому етапі аналізували дефекти під час виготовлення залізобетонних колон, із

застосуванням різних типів бетонів (як за міцністю, так і за типом вкладання). Інші дослідження стосувались виникнення додаткових зусиль унаслідок корозії арматури. Для імітації цього процесу було використано додаткові стрижні, які викликали зсуваюче зусилля. Отримані результати показали виникнення трьох типів дефектів: власних (наприклад, ніздрюватість бетону); видимих (розвиток тріщин); невидимих (порушення зчеплення бетону і арматури, ніздрюватість і неоднорідність міжфазного переходу між матеріалами). Дослідження згинаних залізобетонних елементів без і зі сталеву фібру, коли імітувався корозійний вплив 3% розчину натрію хлориду, за вже наявних нормальних тріщин, наведені у праці [3]. Відповідно до дослідних даних запропонована модель на основі методу скінчених елементів, яка враховує розкриття тріщин та вплив агресивного середовища.

Дослідження залізобетонних елементів, в яких наявні дефекти і пошкодження від різних чинників, є актуальною темою, проте кількість таких праць недостатня.

Постановка завдання. Наше завдання – визначити експериментальним шляхом несучу здатність та деформативність залізобетонних балок з пошкодженою робочою арматурою за дії навантаження експлуатаційного рівня.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення мети досліджень було запроектовано та виготовлено в заводських умовах десять залізобетонних балок.

Прийняті такі умовні позначення: Б – балка; К – контрольна; П – пошкоджена. Всі балки були пошкоджені одиночним отвором, окрім балок із позначенням «*», що позначає балки, пошкоджені 5-а отворами. Перша цифра означає серію балок, яких є три: 1-ша серія – балки з робочою арматурою діаметром 20 мм, 2-га серія – балки з робочою арматурою діаметром 16 мм, та 3-тя серія – з робочою арматурою діаметром 22 мм. Друга цифра – це порядковий номер зразків (1...16). Третя цифра вказує, до якого рівня навантаження перед пошкодженням попередньо доводили зразки відносно руйнівного зусилля непідсилених зразків КБ-1.1 та КБ-1.2.

Програма експериментальних досліджень подана в табл. 1.

Програма експериментальних досліджень

10 балок	→	Серія 1 (робоча арматура діаметром 20 мм)	→	Контрольні непошкоджені зразки (2 балки)	→	КБ-1.1 КБ-1.2
				Пошкоджені за початкового рівня навантаження $0.5 \cdot M_{ult}^{exp}$	→	ПБ-1.7-0.5 ПБ-1.8-0.5 ПБ-1.9-0.5* ПБ-1.10-0.5*
		Серія 2 (робоча арматура діаметром 16 мм)	→	Контрольні непошкоджені зразки (2 балки)	→	КБ-2.13 КБ-2.14
		Серія 3 (робоча арматура діаметром 22 мм)	→	Пошкоджені за початкового рівня навантаження $0.5 \cdot M_{ult}^{exp}$	→	ПБ-3.15-0.5 ПБ-3.16-0.5

Дослідні зразки армовані робочою арматурою класу А500С, діаметр відрізнявся залежно від серії: Ø20, 16 та 22 мм. Арматура, яка розташована в стиснутій зоні, та поперечне армування, виконані у вигляді Ø5 В 500. Поперечна арматура В500С Ø5 із кроком 75 мм.

Детальніше конструкцію та методику проведення досліджень описано в статті [4].

У зразках, позначених вкінці «*» (ПБ-1.9-0.5* та ПБ-1.10-0.5*), виконано п'ять отворів з тими самими діаметрами, за описаною методикою.

Експериментальні дослідження. Критеріями вичерпання несучої здатності слугували чинні нормативні норми ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування» [5].

За критерій вичерпання несучої здатності, згідно з [5], приймають:

- втрату рівноваги між зовнішніми та внутрішніми зусиллями (досягнення максимуму на діаграмах «момент-кривизна (прогин)» або «стискаюча сила – деформація бетону найстиснутішої фібри»);

- руйнування стиснутого бетону при досягненні фібровими деформаціями граничних значень деформації бетону, або розрив усіх розтягнутих стрижнів арматури внаслідок досягнення в них граничних деформацій.

Характер деформацій стиснутого бетону та розтягнутої робочої арматури непошкоджених контрольних зразків з робочою арматурою Ø20 мм КБ-1.1 та КБ-1.2 подано на рис. а. Деформації

розтягнутої арматури та бетону найстиснутішої фібри наростали плавно з однаковим кроком відносно навантаження. При досягненні деформацій у розтягнутій арматурі початку межі текучості $\epsilon_{s,y} = 285 \cdot 10^{-5}$ за навантаження $M_{s,y} = 24,2$ кНм вичерпується несуча здатність зразків і спостерігається різкий приріст деформацій стиснутого бетону та арматури.

За випробування контрольних зразків 2-ї серії з робочою арматурою діаметром 16 мм спостерігаємо плавний приріст деформацій розтягнутої арматури та бетону найстиснутішої фібри (рис., б). За навантаження $M_{s,y} = 16,9$ кНм досягнуто деформації розтягнутої арматури, що відповідають початку текучості $\epsilon_{s,y} = 285 \cdot 10^{-5}$ і відповідно вичерпання несучої здатності.

Зразки ПБ-1.7-0.5 та ПБ-1.8-0.5 пошкоджували аналогічно, проте за рівня навантаження 50% від несучої здатності контрольних непошкоджених зразків. Момент, за якого виконували пошкодження, відповідав $M = 16,3$ кНм.

Під час рівномірного пошкодження робочої арматури при моменті $M = 16,3$ кНм деформації зростали за сталого рівня навантаження (рис., в). Після $M = 16,3$ кНм та зі зменшенням робочої арматури внаслідок пошкодження спостерігається більший приріст деформацій. Деформації арматури досягли початку текучості та, відповідно, зразки досягли вичерпання несучої здатності за $M_{s,y} = 21,5$ кНм.

Особливість дослідження зразків БП-1.9-0.5* та БП-1.10-0.5* полягає в тому, що зразки пошкоджували за рівня навантаження 50% від

несучої здатності непошкоджених зразків не 1-м отвором, а 5-м. Такий спосіб пошкодження дав змогу оцінити вплив довжини пошкодження на несучу здатність цих зразків. Аналогічно (рис., г), до пошкодження робочої арматури деформації бетону найстиснутішої фібри та розтягнутої арматури спостерігаємо рівномірний приріст лінійного характеру. Під час пошкодження відбувається

приріст деформації робочої арматури та бетону найстиснутішої фібри за сталого рівня навантаження. За досягнення деформацій арматури початку текучості за моменту $M_{s,y} = 18,4$ кНм відбулося вичерпання несучої здатності зразків. Фізичне руйнування зразків відбулось унаслідок розриву робочої арматури за моменту $M = 23,5$ кНм.

Рис. Усереднений графік деформацій розтягнутої арматури (ліворуч) та стиснутого бетону (праворуч) непошкодженої балки:
а) КБ-1.1 та КБ-1.2; б) КБ-2.13 та КБ-2.14;
в) ПБ-1.7-0.5 та ПБ-1.8-0.5; г) ПБ-1.9-0.5* та ПБ-1.10-0.5*; д) БП-3.15-0.5 та БП-3.16-0.5

Несуча здатність дослідних зразків

Шифр зразка	Текучість основної арматури		Зменшення несучої здатності порівняно зі зразком КБ- 1		Фізичне руйнування зразків		Зменшення рівня фізичного руйнування порівняно зі зразком КБ- 1	
	зразка	середнє	зразка	середнє	зразка	середнє	зразка	середнє
КБ-1.1	24,9	24,2	-	-	32,9	31,1	-	-
КБ-1.2	23,5		-	-	29,3		-	
КБ-2.13	16,3	16,9	32,6	30,2	20	21,1	35,7	32,2
КБ-2.14	17,5		27,7		22,2		28,6	
ПБ-1.7-0.5	23,3	21,5	3,7	11,2	26,9	25,5	13,5	18,0
ПБ-1.8-0.5	19,7		18,6		24,1		22,5	
ПБ-1.9-0.5*	17,5	18,4	27,7	24,0	21,9	23,5	29,6	24,4
ПБ-1.10-0.5*	19,3		20,2		25,1		19,3	
ПБ-3.15-0.5	23,9	21,8	1,2	9,9	27,1	25,9	12,9	16,7
ПБ-3.16-0.5	19,7		18,6		24,7		20,6	

У процесі випробування зразків БП-3.15-0.5 та БП-3.16-0.5 перед пошкодженням, аналогічно, спостерігаємо плавний приріст деформацій бетону найстиснутішої фібри та розтягнутої арматури (рис., г). При моменті $M = 16,3$ кНм виконували пошкодження робочої арматури. Спостерігаємо приріст деформацій бетону та арматури за сталого рівня навантаження.

Із результатів випробування (табл. 2) бачимо суттєво меншу несучу здатність зразків КБ-2.13 та КБ-2.14 з робочою арматурою діаметром 16 мм, і відхилення становить 30,2%. У зразках, пошкоджених за рівнів навантаження, несуча здатність приблизно однакова, в межах 3,7...13,2%. Більшу несучу здатність пошкоджених зразків за рівнів навантаження з пошкодженою арматурою діаметром 20 мм (площа пошкодженої відповідає площі діаметра 16 мм) порівняно зі зразками з робочою арматурою діаметром 16 мм можна пояснити гіпотезою про термічно зміцнений шар. Тобто під час пошкодження отвором значно зменшується площа перерізу серцевини (незміцненого перерізу арматури) та несуттєво зменшується зовнішній термічно зміцнений шар, що й пояснює вищі результати несучої здатності. Також впливає кількість отворів на несучу здатність таких зразків. Отже, зразки БП-1.9-0.5* та БП-1.10-0.5* мали більшу кількість отворів (п'ять отворів порівняно з іншими зразками, які мають один отвір), що зменшило несучу здатність і відповідно збільшило відхилення відносно контрольних не-

пошкоджених зразків з робочою арматурою 20 мм до 24,0%.

Аналізуючи отримані дані, встановлено, що рівень навантаження, за якого виконується пошкодження, впливає на несучу здатність залізобетонних зразків. У такому разі залишкова несуча здатність є меншою, ніж у зразках з непошкодженою арматурою аналогічного діаметра. На зміну несучої здатності впливають початковий діаметр арматури та наявність термічно зміцненого зовнішнього шару в розтягнутій арматурі. Також тип пошкодження впливає на розподіл деформацій та несучу здатність згинаних елементів. За більшої кількості дефектів за довжиною знижується концентрація напружень в одній точці, відповідно, і знизилась її несуча здатність. Також згідно з результатами випробувань встановлено, що початковий діаметр арматури не впливає на залишкову несучу здатність зразків.

Висновки. Згідно з результатами експериментальних досліджень можна дійти таких висновків:

- початковий рівень навантаження, за якого залізобетонні балки отримали пошкодження, збільшує залишкову несучу здатність (БП 1.7 та БП 1.8) порівняно з несучою здатністю зразків з таким самим діаметром арматури (КБ 1.1 та КБ 1.2);
- початковий діаметр арматури не впливає на залишкову несучу здатність пошкодженої бал-

ки, якщо пошкодження відбулося до однакової площі розтягнутої арматури;

- за збільшення довжини пошкодження робочого армування несуча здатність залізобетонних балок ПБ-1.9-0.5* та ПБ-1.10-0.5* знижується порівняно з точковим пошкодженням у зразках ПБ-1.7-0.5 та ПБ-1.8-0.5.

Бібліографічний список

1. Воскобійник О.П., Кітаєв 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). С. 87-92.
2. Soylev T.A., Francois R. Corrosion of reinforcement in relation to presence of defects at the interface between steel and concrete. *Journal of materials in civil engineering*. 2005. Vol. 17, Issue 4. P. 447-455.
3. Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete / Mitchel A. et al. *Corrosion Science*. 2013. Vol. 77. P. 308-321.
4. Турчин Б. Р., Бліхарський З. З., Вегера П. І., Шналь Т. М. Методика досліджень залізобетонних балок з пошкодженнями, отриманими за дії навантаження. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Теорія і практика будівництва. 2017. Вип. 877. С. 212-217.
5. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону: ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. [чинний від 2011-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 118с. (Національний стандарт України).

Стаття надійшла 23.04.2019.