



УДК 624.012



БЛИХАРСЬКИЙ З.З.

Аспірант, Національний
університет «Львівська
політехніка»,
м. Львів, Україна,
e-mail: zinovii.z.blikharskyi@lpnu.ua,
тел.: +38 (097) 603-80-88,
ORCID: 0000-0002-4823-6405



ВЕГЕРА П.І.

Канд. технічних наук, асист.,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна,
e-mail: pavlo.i.vehera@lpnu.ua,
тел.: +38 (068) 137-89-41,
ORCID: 0000-0002-3437-1825



ШНАЛЬ Т.М.

Канд. технічних наук, доц.,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна,
e-mail: Taras.M.Shnal@lpnu.ua,
тел.: +38 (063) 561-05-55,
ORCID: 0000-0002-4226-9513

МІЦНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ІЗ ПОШКОДЖЕННЯМИ, ОТРИМАНИМИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОМУ РІВНІ НАВАНТАЖЕННЯ

АНОТАЦІЯ

У статті представлено результати експериментальних досліджень залізобетонних балок із пошкодженнями розтягнутої арматури, отриманими за дії експлуатаційного рівня навантаження. Для проведення таких досліджень запроєктовано та виготовлено 8 дослідних зразків: 4 контрольні і 4 пошкоджені. Пошкодження виконано у вигляді одного отвору діаметром 5,6 мм, що імітує корозію арматури діаметром 20 мм до діаметру 16 мм. Для порівняння також виконали пошкодження арматури одним отвором аж до моменту вичерпання несучої здатності балок, внаслідок збільшення отвору. При рівні навантаження рівному 0,5 від очікуваного руйнівного, граничне значення діаметра отвору становить 9,5 мм. Несуча здатність залізобетонних балок, в яких наявні точкові пошкодження за рівня навантаження, є вища ніж для залізобетонних елементів із аналогічним армуванням. При навантаженні, рівному 0,5 від їх несучої здатності, пошкоджені залізобетонні балки мають запас міцності вищий на 18%, ніж дослідні зразки з непошкодженим армуванням такого ж діаметра.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: залізобетонні балки, міцність, пошкодження, дефекти, корозія, дія, навантаження

ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ УРОВНЕ НАГРУЗКИ

БЛИХАРСКИЙ З.З. Аспирант, Национальный университет „Львовская политехника”, г. Львов, Украина, e-mail: zinovii.z.blikharskyi@lpnu.ua, тел.: +38 (097) 603-80-88, ORCID: 0000-0002-4823-6405

ВЭГЭРА П.И. Канд. технических наук, ассистент, Национальный университет „Львовская политехника”, г. Львов, Украина, e-mail: pavlo.i.vehera@lpnu.ua, тел.: +38 (068) 137-89-41, ORCID: 0000-0002-4823-6405

ШНАЛЬ Т.М. Канд. технических наук, доц., Национальный университет „Львовская политехника”, г. Львов, Украина, e-mail: Taras.M.Shnal@lpnu.ua, тел.: +38 (063) 561-05-55, ORCID: 0000-0002-4226-9513



АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных балок с повреждениями растянутой арматуры, полученными за действия эксплуатационного уровня нагрузки. Для проведения таких исследований запроектировано и изготовлено 8 опытных образцов: 4 контрольные и 4 поврежденные. Повреждение выполнено в виде одного отверстия диаметром 5,6 мм, имитирующее коррозию арматуры диаметром 20 до диаметра 16. Для сравнения также выполнили повреждения арматуры одним отверстием до момента исчерпания несущей способности балок, вследствие увеличения отверстия. При уровне нагрузки равном 0,5 от ожидаемого разрушительного, предельное значение диаметра отверстия составляет 9,5 мм. Несущая способность железобетонных балок, в которых имеются точечные повреждения при уровне нагрузки выше, чем для железобетонных элементов с аналогичным армированием. При нагрузке равной 0,5 от их несущей способности, поврежденные железобетонные балки имеют запас прочности выше на 18%, чем опытные образцы с неповрежденным армированием такого же диаметра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные балки, прочность, повреждения, дефекты, коррозия, воздействие, нагрузка

STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH DAMAGES RECEIVED AT THE OPERATIONAL LOAD LEVEL

BLIKHARSKYI Z.Z. PG student, Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine, e-mail: zinovii.z.blikharskyi@lpnu.ua, tel.: +38 (097) 603-80-88, ORCID: 0000-0002-4823-6405

VEHERA P.I. PhD, Ass., Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine, e-mail: pavlo.i.vehera@lpnu.ua, tel.: +38 (068) 137-89-41, ORCID: 0000-0002-4823-6405

SHNAL T.M. PhD, Ass. Prof., Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine, e-mail: Taras.M.Shnal@lpnu.ua, tel.: +38 (063) 561-05-55, ORCID: 0000-0002-4226-9513

ABSTRACT

One of the most common defects is corrosion of internal reinforcement, which occurs during the continuous building maintenance. Corrosion of working reinforcement in bending elements is

especially dangerous, since it assumes all tensile strengths. In this case, the influence of environment is insignificant until damaging of integrity of concrete protective layer (the exposure of reinforcement). After that, all the influences shall change the stress-strain state of structures as well as their load carrying ability. The purpose of this study was to investigate the influence of tension reinforcement damages, which occur due to operating load level, on the strength of reinforced concrete beams. To achieve this goal, we have designed and produced two series of prototypes: 2 reinforced concrete beams of the first series and 6 prototypes of the 2-nd series. Two prototypes of the 1-st and two prototypes of the 2-nd series were tested as control prototypes (without damages). The following two samples were damaged in the form of single hole of 5.6 mm in diameter, under 0.5 loading level as compared with the destructive load value, after which the beams were destroyed. The last two samples were brought to the 0.5 loading level as compared with the destructive load value, after which a hole of 3 mm in diameter was drilled. The drill diameter was gradually increased the 0.5 mm, until the load carrying ability of the prototype is exhausted. The prototypes having tension reinforcement with a hole of 5.6 mm in diameter, the diameter was reduced by 35%, while the bearing capacity was reduced by 25%. The prototypes with a maximum hole of 9.5 mm in diameter were destroyed due to marginal reduction of area reinforcing steel of working reinforcement, which makes 65% of the initial value, while the carrying ability was reduced by 50%. The research of carrying ability of reinforced concrete beams with different types of damages is an important issue that needs further research. The carrying ability of reinforced concrete beams with pinpoint abnormalities at the load level, is higher than carrying ability of reinforced concrete elements with similar reinforcement. Under loading of 0.5 as compared to carrying ability, the damaged reinforced concrete beams have excess strength 18% higher as compared to carrying ability of prototypes with undamaged reinforcement of the same diameter. The reduction of reinforcement area, which leads to exhaustion of carrying ability, shall be less by 10-15% than reduction of carrying ability of the damaged prototype.

KEY WORDS: reinforced concrete beam, damages, defects, corrosion, loading

ВСТУП

З кожним роком збільшуються об'єми використання залізобетонних конструкцій в будівництві. Це пов'язано з дешевизною матеріалів, розвитком технологій їх виготовлення, вкладання та проектування. Усі конструкції, що експлуатуються, на момент виготовлення мають незначні відхилення фізико-механічних та геометричних характеристик, що закладені при проектуванні. Проте під час



експлуатації технічний стан об'єктів змінюється, внаслідок впливу зовнішнього середовища (характерно для адміністративних та цивільних споруд), або впливу агресивного середовища, зміною режиму експлуатації внаслідок технічного переозброєння, або зміни технологічного процесу (характерно для промислових споруд). Ці впливи призводять до зміни напружено-деформованого стану конструктивних частин, що може обумовлювати вихід із безпечної експлуатації споруди в цілому. Одним із найбільш типових та поширених дефектів є корозія внутрішнього армування, що виникає в процесі тривалої експлуатації будівлі. Особливо небезпечною є корозія робочого армування в згинаних елементах, оскільки усі розтягуючі зусилля сприймаються нею. В такому випадку вплив зовнішнього середовища є незначним до моменту порушення цілісності захисного шару бетону (оголення арматури). Після цього усі впливи змінюють напружено-деформований стан конструкцій і, як наслідок, їх несучу здатність.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Беручи до уваги поширеність залізобетонних конструкцій, дослідження залізобетонних елементів із пошкодженнями є актуальними. Дослідження несучої здатності таврових залізобетонних балок проводили для зразків з пошкодженою стиснутою полицю [1]. Як дефекти моделювали часткову та повну корозію центральної частини стиснутої полицки. Руйнування контрольних зразків проходило по похилому перерізу: розкришування стиснутої зони бетону над похилою тріщиною. Для зразків із частково пошкодженою стиснутою полицю перші тріщини виникли в точках прикладання сил, проте характер руйнування не змінився. Таврові балки без стиснутої полицки руйнувались у відносному прольоті зрізу з суттєвим відлущуванням бетону в зоні, де відсутня полицка. У статті [2] досліджено роботу пошкоджених залізобетонних конструкцій, шляхом моделювання пошкодження бетону стиснутих елементів. У дослідгах змінним параметром був коефіцієнт пошкодження поперечного перерізу зразка, що становив 0,1, 0,3 та 0,5. Таким чином визначали вплив дефектів бетонування (з непошкодженою арматурою) на напружено-деформований стан залізобетонних колон. У роботі [3] наведено результати експериментальних досліджень 111 залізобетонних балок із різним ступенем корозії арматури. Ступінь корозії арматури становила від 1,25 до 10% з швидкістю корозії 1, 2, 3 і при струмі 4 мА/см². Автори встановили значне зменшення несучої здатності за рахунок не лише зменшення поперечного перерізу арматури, але і внаслідок погіршення зчеплення арматури і бетону.

Вплив корозії арматури на рівновагу внутрішніх сил та на сумісну деформацію бетону та армату-

ри досліджено в [4]. Корозію арматури імітували таким чином, щоб було руйнування внаслідок руйнування нормальних та похилих перерізів, роздроблення бетону на кінцях елементів і проковзування розтягнутої арматури. Дослідження корозії армування і його вплив на модель вичерпання несучої здатності проводили в роботі [5]. Встановлено, що корозія арматури зменшує пружну стадію в залізобетонних балках. Якщо корозія робочого армування перевищує 10%, то значно збільшується пластична стадія та ймовірність раптового вичерпання несучої здатності.

В елементах із корозією поздовжнього армування розвиваються поздовжні тріщини, змінюється характер та розподіл нормальних та похилих тріщин у залізобетонних балках [6]. Метою дослідження було визначення впливу корозії арматури на загальну поведінку конструктивних елементів у граничних станах.

Виконання корозії моделювали за допомогою додавання розчину хлориду кальцію до води замішування при виготовленні конструкцій та прикладання струму 100 мА/см² [7]. Таке значення посилює інтенсивність корозії в 10 разів, порівняно із звичайними умовами. В статті показано, що корозія збільшує прогини і ширину розкриття тріщин, а також змінює характер руйнування залізобетонних балок із зменшенням їх несучої здатності. Тобто, корозія призводить до зменшення несучої здатності за першою і другою групою граничних станів.

Дослідження корозії залізобетонних елементів є актуальним питанням, проте досліджень залізобетонних елементів з пошкодженнями за дії навантаження є недостатньо. Особливо це підкреслює те, що більшість дефектів залізобетонних елементів виникають саме під навантаженням.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

В даній роботі було поставлено мету: дослідити вплив пошкодження розтягнутої арматури, що виникло за експлуатаційного рівня навантаження, на міцність залізобетонних балок.

Поставлена мета дослідження досягалась виконанням таких завдань:

- випробувати залізобетонні балки без пошкодження, як контрольні зразки;
- дослідити залізобетонні балки з пошкодженнями розтягнутої арматури, при рівні навантаження 0,5 від очікуваного руйнівного навантаження контрольних зразків;
- аналіз та порівняння отриманих результатів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

Конструкція дослідних зразків. Дослідні зразки – залізобетонні балки, прямокутного поперечного перерізу, розмірами 200×100 мм, довжиною 2100 мм. Запроектовано та виготовлено зразки двох серій: 2 залізобетонні балки 1-ї



серії та 6 зразків 2-ї серії. Зразки 1-ї та 2-ї серій виготовлені ідентичних геометричних розмірів, відхилення становило менше 2%. Для зразків 1-ї серії робоче армування виконане у вигляді 1Ø16 А 500С (площею поперечного перерізу $A_s=2,0 \text{ см}^2$), і для зразків 2-ї серії 1Ø20 А 500С (площею поперечного перерізу $A_s=3,1 \text{ см}^2$). Стиснута та поперечна арматура виконані з дрітної арматури Ø5 В 500, і є ідентичними для зразків обох серій. Залізобетонні балки виготовлені з бетону класу С30/35 [8]. Основні геометричні розміри, розміщення арматури та арматурних каркасів представлено на рис. 1.

Усі дослідні зразки маркуються наступним чином: БЗ – контрольна балка, або БП – балка пошкоджена; перша цифра – номер серії, друга цифра – номер дослідного зразку. Для прикладу БЗ 1.2 означає, що випробувано другу контрольну балку з 1-ї серії. Індекс 0.5 означає рівень, при якому виконувалось пошкодження, прийнятий від отриманого руйнівного, для звичайних балок, а скорочення пп – означає пошкодження до повного руйнування; чп – часткове пошкодження розтягнутого армування.

Таблиця 1. Програма експериментальних досліджень

№	Шифр дослідної балки	Клас бетону	Робоче армування	Опис дослідного зразка
1.	БЗ 1.1	С30/35	1Ø16 А500С	контрольні зразки (без пошкодження)
2.	БЗ 1.2			
3.	БЗ 2.3			контрольні зразки (без пошкодження)
4.	БЗ 2.4			
5.	БП 2.5-0.5чп		1Ø20 А500С	зразки з одним отвором Ø 5,6 мм у розтягнутій арматурі
6.	БП 2.6-0.5чп			
7.	БП 2.7-0.5пп			зразки з одним отвором у розтягнутій арматурі, при якому відбувається руйнування елемента
8.	БП 2.8-0.5пп			

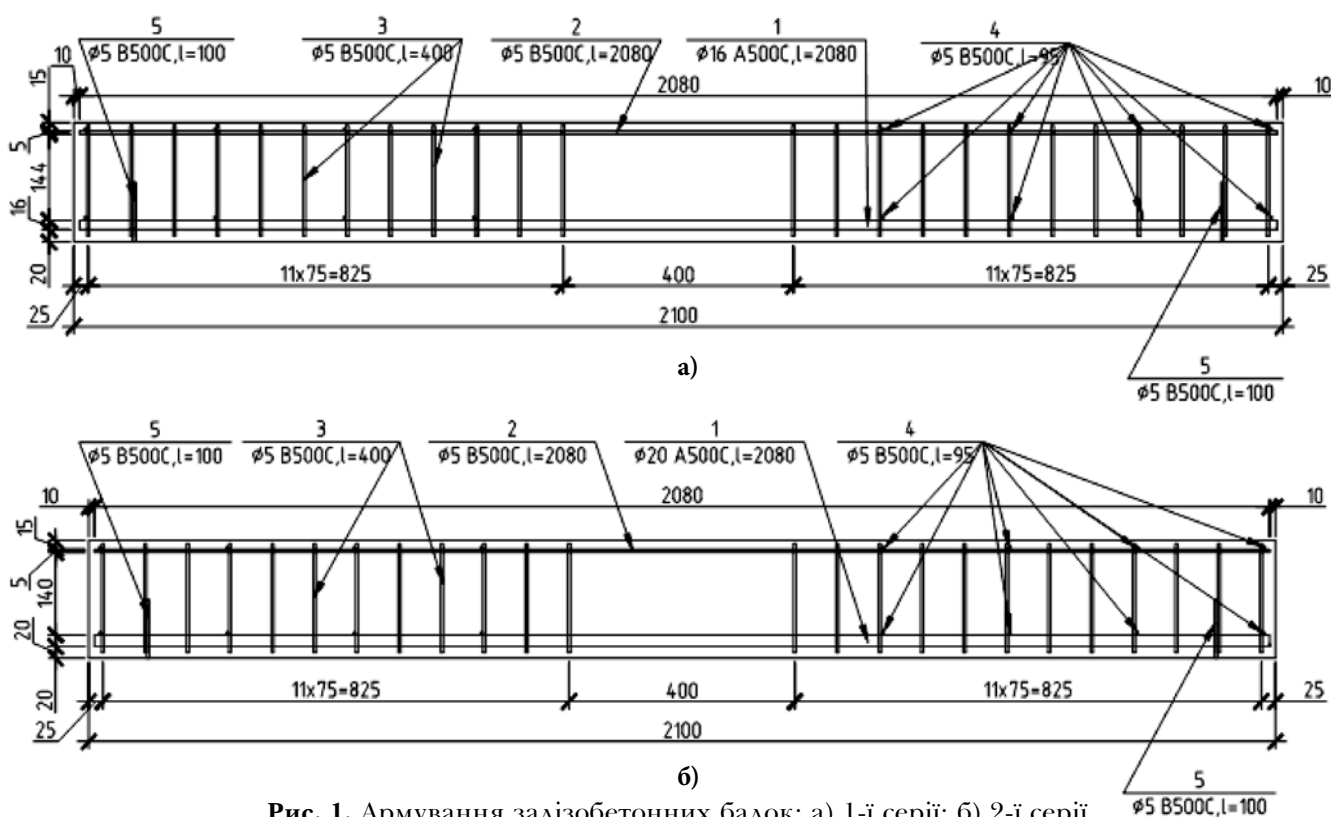


Рис. 1. Армування залізобетонних балок: а) 1-ї серії; б) 2-ї серії



Для виконання поставлених задач досліджень було розроблено таку програму досліджень. По два зразки 1-ї та 2-ї серій випробовували як контрольні (без пошкоджень). Наступні два зразки з 2-ї серії випробовували наступним чином:

- поетапно, згідно з методикою дослідження, зразки доводили до рівня навантаження 0,5 від очікуваного руйнівного значення;
- виконували пошкодження шляхом висвердлювання одного отвору $\varnothing 3$ мм. Збільшували діаметр отвору по 0,5 мм до $\varnothing 5,6$ мм. При такому пошкодженні залишковий діаметр арматури відповідає $\varnothing 16$ мм;
- зразки навантажували аналогічно навантаженню 1 етапу, до настання фізичного руйнування.

Останні два зразки випробовували в такій послідовності:

- завантажували зразки до рівня навантаження 0,5 від очікуваного руйнівного значення;
- висвердлювали отвір $\varnothing 3$ мм і поетапно збільшували діаметр свердла на 0,5 мм до моменту вичерпання несучої здатності дослідних зразків.

На кожному етапі, після збільшення діаметра отвору фіксували покази приладів, розташованих, як показано в роботі [9].

Експериментальні дослідження. Дослідні зразки випробовували шляхом прикладання статичного одноразового навантаження.

Контрольні зразки 1-ї та 2-ї серії руйнували шляхом викришування стиснутої зони бетону в центральній частині балки. Загальний вид випробуваних зразків представлено на рис. 2.

Зразки 2-ї серії, що випробовували з пошкодженнями, змінили характер руйнування. Залізобетонні балки БП 2.5-0.5чп та БП 2.6-0.5чп руйнувались різко з розривом арматури (рис. 3).

Руйнування супроводжувалось розломом залізобетонних балок на

дві частини. (рис. 4). Пошкодження поздовжньої арматури імітувало корозію робочого армування зразка. Характер руйнування буде типовим і для реальних дослідних зразків, що працюють під певним рівнем навантаження.

Результати експериментальних досліджень. За критерій вичерпання несучої здатності прийнято такі умови [10]:

- втрата рівноваги між внутрішніми і зовнішніми зусиллями;
- руйнування стиснутого бетону при досягненні фібровими деформаціями граничних значень ε_{cul} , ε_{cu2} або розрив усіх розтягнутих стрижнів арматури внаслідок досягнення в них граничних деформацій ε_{ud} .

Для контрольних зразків 1-ї та 2-ї серій вичерпання несучої здатності відбулось за рахунок досягнення стиснутою зоною бетону граничних



Рис. 2. Характер руйнування контрольних балок серії 1, зразки № 1 (а), № 2 (б) та серії 2, зразки № 1 (в), № 2 (г)



Рис. 3. Характер руйнування зразків серії 2 № 5 (а) та № 6 (б) з частковим пошкодженням розтягнутого армування отвором діаметром 5,6 мм, при рівні навантаження 0,5 від очікуваного руйнівного значення



Рис. 4. Руйнування зразків серії 2 № 7 (а) та № 8 (б) з отвором діаметром 9,5 мм в арматурі, пошкодженими (до повного руйнування) при рівні навантаження 0,5 від очікуваного руйнівного значення

значень. Для зразків із пошкодженою арматурою вичерпання несучої здатності відбулось за рахунок розриву розтягнутої арматури внаслідок досягнення нею граничних значень.

Для зразків БП 2.5-0.5чп та БП 2.6-0.5чп зменшення діаметру арматури становило 35% тоді як несуча здатність зменшилась на 25% (табл. 2).

Зразки БП 2.7-0.5пп та БП 2.8-0.5пп руйнувались внаслідок граничного зменшення площі поперечного перерізу робочого армування, і становить 65% від початкового значення, тоді як несуча здатність зменшилась на 50% (табл. 2).

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що несуча здатність залізобетонних балок, в яких отримано пошкодження за рівня навантаження є вища, ніж для залізобетонних елементів з аналогічним армуванням. Це означає,

таційного рівня навантаження вичерпання несучої здатності відбувається при зменшенні площі робочої арматури до 35% від початкового значення, при рівні навантаження 0,5 від очікуваного руйнівного контрольних зразків.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБЛЕНЬ

1. Дослідження несучої здатності залізобетонних балок із різними типами пошкоджень є важливим питанням, що потребує подальших досліджень.

2. Несуча здатність зразків, в яких наявні точкові пошкодження за рівня навантаження, є вищою, ніж для залізобетонних елементів з аналогічним армуванням. При навантаженні, рівному 0.5 від їх несучої здатності, пошкоджені

що балки які отримали пошкодження при навантаженні, рівному орієнтовно 0,5 від їх несучої здатності, мають запас ще 18% порівняно з балкою з аналогічним армуванням. Відсоток зменшення площі арматури, при якій настає вичерпання несучої здатності, є менший на 10-15% від зменшення несучої здатності пошкодженого зразка.

При пошкодженні зразків за експлуа-

Таблиця 2. Несуча здатність дослідних зразків

Шифр зразка	Несуча здатність зразка, M_{Ed} , кН·м	Середнє значення несучої здатності, M_{Ed} , кН·м	Відношення параметрів дослідних зразків до контрольних зразків першої серії		Відношення параметрів дослідних зразків до контрольних зразків другої серії	
			площі поперечного перерізу розтягнутої арматури, $\frac{A_s}{A_s^{B31}}$	несучої здатності $\frac{M_{Ed}}{M_{Ed}^{B31}}$	площі поперечного перерізу розтягнутої арматури, $\frac{A_s}{A_s^{B32}}$	несучої здатності $\frac{M_{Ed}}{M_{Ed}^{B32}}$
БЗ 1.1	19.00	18.91	-	-	0.65	0.63
БЗ 1.2	18.82					
БЗ 2.3	31.14	29.91	1.55	1.58	-	-
БЗ 2.4	28.67					
БП 2.5-0.5чп	21.45	22.34	1.00	1.18	0.65	0.75
БП 2.6-0.5чп	23.23					
БП 2.7-0.5пп	15.00	15.00	0.55	0.50	0.35	0.50
БП 2.8-0.5пп	15.00					



залізобетонні балки мають запас міцності, вищий на 18%, ніж дослідні зразки з непошкодженим армуванням такого ж діаметра.

3. Відсоток зменшення площі арматури, при якій настає вичерпання несучої здатності є менший на (10-15) % від зменшення несучої здатності пошкодженого зразка.

Дослідження запасу несучої здатності за інших рівнів початкового навантаження, з іншими типами пошкодження та різними діаметрами робочого армування є перспективним та актуальним питанням. Дослідження, що моделюють виникнення дефектів під час експлуатації згинаних конструкцій, мають практичне значення для інженерів.

НУ "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. – 2017. – № 877. – С. 213–218.

10. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. - [Чинний від 2011-06-01]. - Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – V, 118 с. - (Національний стандарт України).

Стаття надійшла до редакції 21.12.2017 р.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Клименко Є.В. Характер руйнування пошкоджених таврових балок / Є.В. Клименко, О.С. Чернєва, А.М. Ісмаєл // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка» Теорія і практика буд-ва. - 2013. – 755. – С. 179-183.
2. Клименко Є.В. До питання про роботу пошкоджених залізобетонних конструкцій / Є.В. Клименко, М.В. Мельник // Вісн. Одеської державної акад. буд-ва та архітектури. – 2010. – Вип. 39, ч. 1. – С. 337-342.
3. Mangat, P.S. & Elgarf, M.S. (1999). Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. Structural J. – Vol. 96. Iss. 2. – P. 149-158.
4. Cairns, J. & Zhao, Z. (1993). Behavior of concrete beams with exposed reinforcement. Proc. of the institution of civil engineers: structures and bridges. – Vol. 99, Iss. 2. – P.141-154.
5. Du, Y., Clark, L.A. & Chan, A.H. (2007). Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams. ACI structural J. — Vol. 104, # 3. – P. 285-293.
6. Castel, A., Francois, R. & Arliguie G. (2000). Mechanical behavior of corroded reinforced concrete beams — Part 1: experimental study of corroded beams. Materials and Structures. – Vol. 33, # 9. – P. 539 - 544.
7. Rodrigues, J., Ortega, L.M. & Casal J. (1997). Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. Construction and building materials. – Vol. 11, # 4. – P. 239 - 248.
8. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинні від 2011-06-01]. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 71 с. – (Буд. норми України).
9. Методика досліджень залізобетонних балок з пошкодженнями отриманими за дії навантаження / [Б. Р. Турчин., З. З. Бліхарський, П. І. Верера, Т. М. Шналь] // Вісн.