

*О.А. Шкурупий, к.т.н., доцент  
Д.М. Лазарев, к.т.н., доцент  
Ю.О. Авраменко, к.т.н., старший викладач  
О.М. Лазарева, аспірант*

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗО- БЕТОННИХ БАЛОК ПРИ КОРОТКОЧАСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

*Наведено результати експериментальних досліджень роботи нерозрізних залізобетонних балок при короткочасному навантаженні. Установлено вплив процента армування нормального перерізу та класу бетону на граничну деформацію найбільш стиснутої грані бетону й міцність нерозрізних залізобетонних балок.*

**Ключеві слова:** *міцність, напружено-деформований стан, гранична деформація стиснутого бетону, деформаційна модель, екстремальний критерій.*

*А.А. Шкурупий, к.т.н., доцент  
Д.Н. Лазарев, к.т.н., доцент  
Ю.А. Авраменко, к.т.н., старший преподаватель  
Е.Н. Лазарева, аспирант*

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЧНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ**

*Приведены результаты экспериментальных исследований работы неразрезных железобетонных балок при кратковременной нагрузке. Установлено влияние процента армирования нормального сечения и класса бетона на предельную деформацию наиболее сжатой грани бетона и прочность неразрезных железобетонных балок.*

**Ключевые слова:** *прочность, напряженно-деформированное состояние, предельная деформация сжатого бетона, деформационная модель, экстремальный критерий.*

*O. Shkurupiy, PhD, Asistent Professor  
D. Lazariev, PhD, Asistent Professor  
Yu. Avramenko, PhD, senior lecturer  
O. Lazarijeva, post-graduate  
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

## **EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE ULTIMATE STRESS-STRAIN STATE OF CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE BEAMS TO TRANSIENT LOAD**

*The results of experimental research work of continuous reinforced concrete beams in short-term load are presented. The influence of the normal section of the reinforcement ratio and concrete class in the maximum deformation of the most compressed edge of concrete and strength of continuous reinforced concrete beams is set.*

**Keywords:** *strength, the stress strain state, the maximum deformation of compressed concrete, deformation model, extreme criterion.*

**Вступ.** Балки є найбільш розповсюдженим видом залізобетонних конструкцій. Надання їм нерозрізності дозволяє зменшити переріз і знизити витрати матеріалів та вагу конструкції, оскільки багатопрогінні нерозрізні балки значно вигідніші системи, ніж однопрогінні елементи, внаслідок більш сприятливого перерозподілу внутрішніх зусиль. Вони використовуються як у складі різноманітних надземних частин, так і в елементах нульового циклу будівель та споруд. Сьогодні наявна тенденція до розвитку будівництва й застосування високоміцних бетонів для виготовлення залізобетонних конструкцій (ЗБК) і їх елементів, розрахунок міцності та несучої здатності яких потребує вдосконалення й напрацювання експериментальних даних з урахуванням властивостей і характеру їх роботи. Такі дослідження є актуальними та будуть доповненням до діючих норм [1, 2].

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** З існуючих методик розрахунку міцності та несучої здатності ЗБК і їх елементів на основі деформаційних моделей (ДМ) можна виділити ДМ з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ) [3 – 6]. Вона має значні переваги над існуючими ДМ, особливо для розрахунку статично невизначуваних ЗБК, а також є суттєво новим підходом щодо розрахунку їх міцності та несучої здатності; ґрунтується на рівняннях механіки деформівного твердого тіла і, завдяки врахуванню низхідної гілки повної діаграми стиску бетону [7] й зон зміцнення діаграм арматурних сталей та використанню чисельних та оптимізаційних методів, дає змогу розраховувати міцність залізобетонних елементів у нормальному перерізі, визначати характеристики НДС елемента ЗБК у будь-якому нормальному перерізі в граничному стані, включаючи і  $\varepsilon_{cu1}$ , при застосуванні широкого спектра класів міцності бетону ( $f_{ck, cube}$ ) від C8/10 до C115/120 і більше, у тому числі й високоміцних бетонів.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Нові норми України для проектування ЗБК та їх елементів [1] містять низку принципово нових підходів до розрахунку їх несучої здатності. За основу розрахунків бетонних і залізобетонних елементів на дію згинальних моментів та поздовжніх сил прийнята ДМ з емпіричним критерієм міцності, яка, крім рівнянь рівноваги, використовує умову деформування у вигляді гіпотези плоских перерізів і повні діаграми стану бетону.

ДМ з ЕКМ є альтернативною моделлю стосовно існуючих ДМ з емпіричним критерієм міцності [1, 2, 9 та ін.].

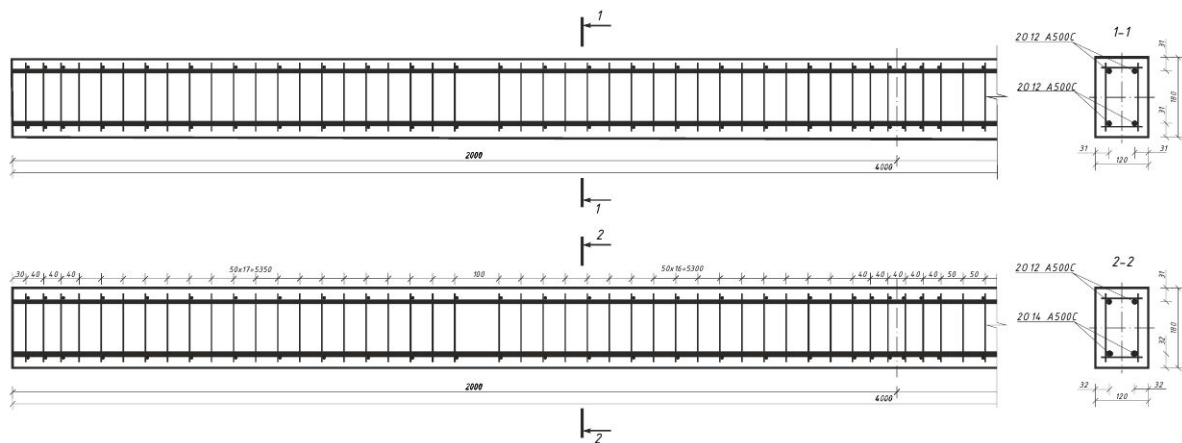
Для підтвердження теоретичних розрахунків важливу роль відіграють експериментальні дослідження та їх дані на основі статистичного аналізу. Тому експериментальні дослідження роботи нерозрізних балок із високоміцних бетонів з урахуванням перерозподілу зусиль при утворенні в

характерних перерізах умовних пластичних шарнірів [8] і визначення значень згинальних моментів, які їм відповідають, а також граничного навантаження є актуальним завданням.

**Метою** експериментальних досліджень є вивчення роботи статично невизначуваних залізобетонних балок на різних рівнях навантаження, включаючи й граничний стан з аналізом перерозподілу внутрішніх зусиль.

**Основний матеріал і результати.** Для досягнення поставленої мети було випробувано 18 нерозрізних залізобетонних балок із різними процентами армування  $\rho_s = 2,37...2,99\%$  та класами бетону.

Призмова міцність бетону на стиск зразків серії Б-1-12-1...3, Б-1-14-1...3 дорівнювала 41,03 МПа, Б-2-12-1...3, Б-2-14-1 – 46,22 МПа, а серій Б-3-12-1...3, Б-3-14-1 – 48,21 МПа. За даними експериментальних досліджень був виконаний аналіз граничних характеристик стиснутої зони бетону та міцності нормальних перерізів випробовуваних зразків.

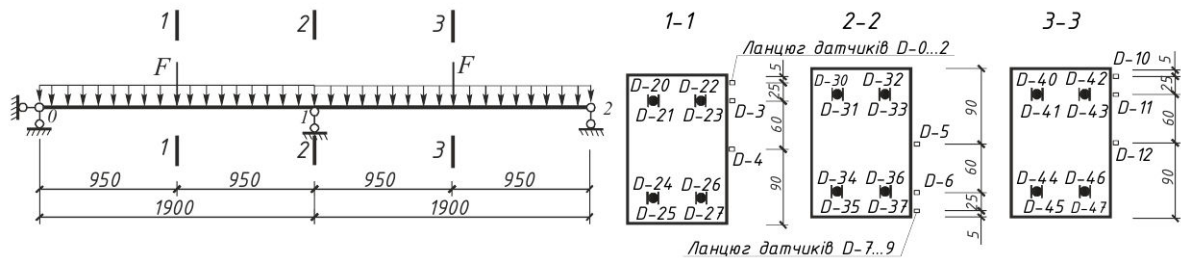


**Рис. 1. Схема армування та геометричні розміри експериментальних зразків залізобетонних балок**

Експериментальні зразки по довжині мали прямокутні поперечні перерізи. Висота та ширина їх була постійною й дорівнювала  $180 \times 120$  мм (рис. 1), а співвідношення довжини прольоту до висоти перерізу  $l/h \geq 10$ .

Армування нерозрізних двопрогінних балок було постійним по довжині й виконувалося стержнями класу А400С  $\varnothing 12$  та  $14$  мм, а також звареними хомутами з арматури класу А240С,  $\varnothing 6,5$  мм із кроком  $50$  мм в опорних зонах для запобігання виникненню похилих тріщин і з кроком  $100$  мм посередині прольоту (рис. 1).

Для вимірювання деформації на арматурних стержнях електротензодатчики базою  $5$  мм були розташовані з двох діаметрально протилежних сторін, а на бетоні в характерних перерізах – базою  $50$  мм (рис. 2).



**Рис. 2. Розрахункова схема та схема розташування електротензодатчиків на бетоні й арматурних стержнях балок**

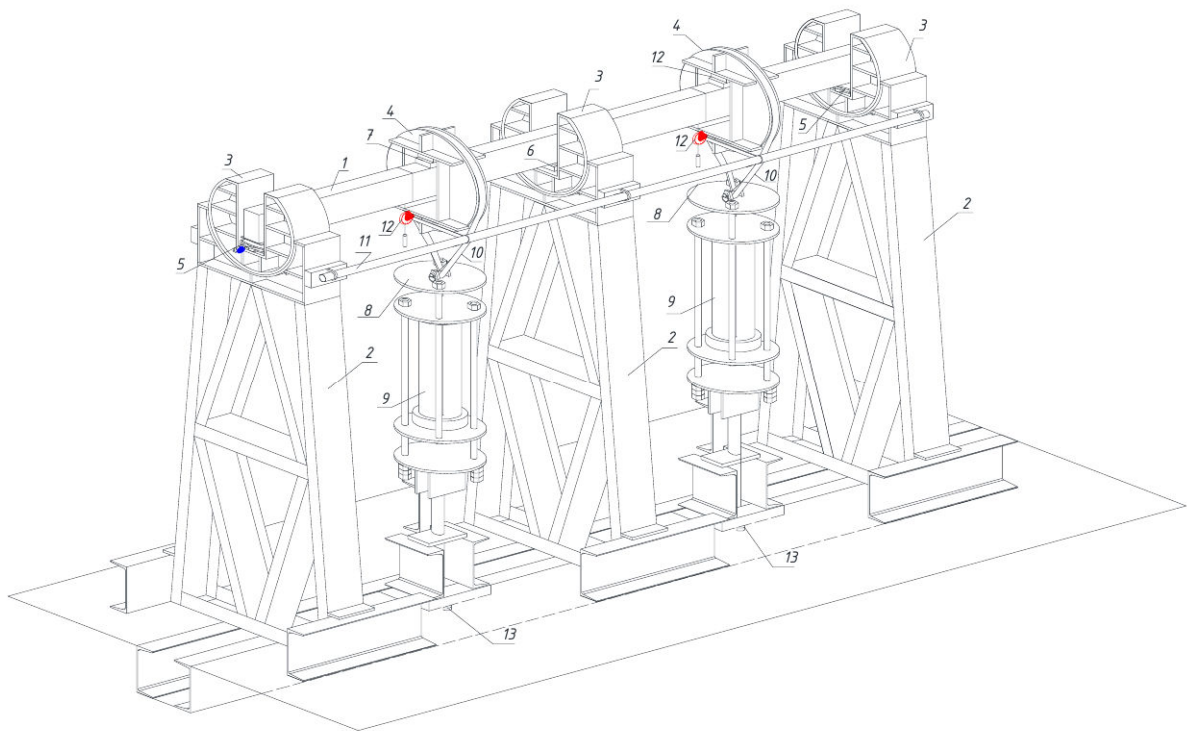
Експериментальні зразки балок випробовувалися в установці, зображеній на рисунку 3. Навантаження прикладалося через два шарніри за допомогою двох паралельно підключених п'ятдесятитонних домкратів. Для розкриття статичної невизначуваності та визначення внутрішніх зусиль у зразках на крайніх опорах улаштовувалися силові динамометри ДОСМ-5. Прогини в характерних перерізах балок фіксувалися прогиномірами ПАО-6 „ЛИСИ”. Відносні деформації на бетоні й арматурі вимірювалися багатоканальною тензометричною системою для статичних випробувань об'єктів ВВП-8М. На кожному ступені навантаження знімалися показання за приладами та здійснювався огляд зразка, в процесі якого спостерігали за появою й розкриттям тріщин. Особливу увагу приділяли визначенню граничних деформацій бетону та арматури в характерних перерізах балок.

Усі зразки мали схожий характер руйнування та тріщиноутворення (рис. 4). Початкові тріщини з'являлися спочатку на середній опорі при рівнях навантаження  $0,1-0,3F_u$ . Руйнування зразків балок починалося з роздроблення бетону в стиснутих зонах у характерних перерізах і мало крихкий характер. Першою ознакою початку руйнування була поява лещадок у цих перерізах на стиснутих гранях елемента та досягнення розтягнутою арматурою напружень, що відповідають межі текучості.

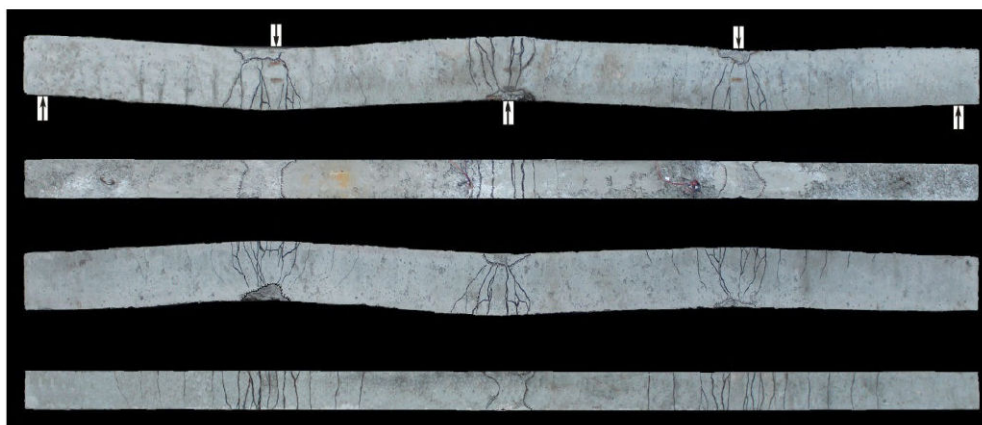
Напруження в арматурі у наведених перерізах після перерозподілу зусиль на стадії руйнування досягали межі текучості.

Характер зміни відносних деформацій бетону й арматури в перерізах 1, 2 та 3 (рис. 2), одержаних за результатами випробувань експериментальних балок залежно від рівня навантаження, наведено на рис. 5 та 6.

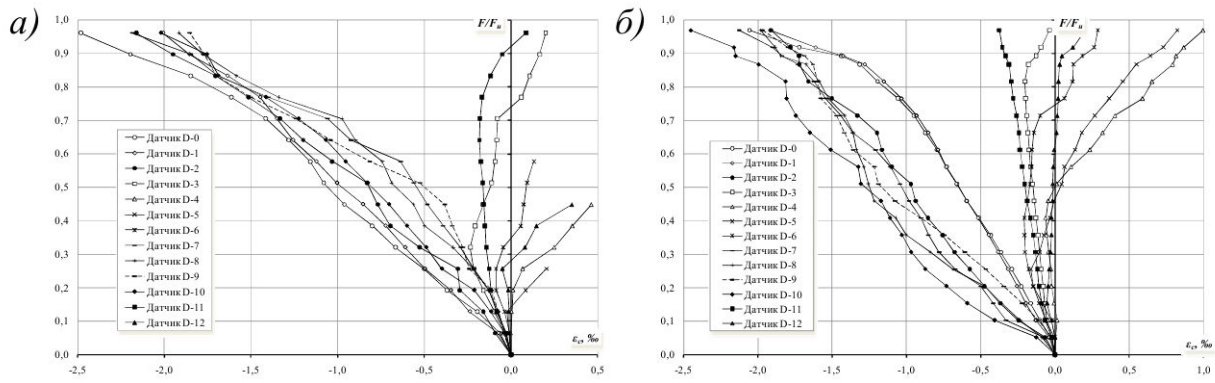
Експериментальні значення згинальних моментів у характерних перерізах балок на рівнях навантаження  $0,1 \dots 0,3F_u$  відповідали їх роботі у пружній стадії та були близькими до даних теоретичних розрахунків. Далі спостерігаються їх відхилення, зумовлені утворенням та розвитком тріщин. Після утворення тріщин та досягненням розтягнутою арматурою границі текучості в характерних перерізах зростання згинальних моментів пришвидшувалося, що характеризує суттєвий перерозподіл внутрішніх зусиль (рис. 7).



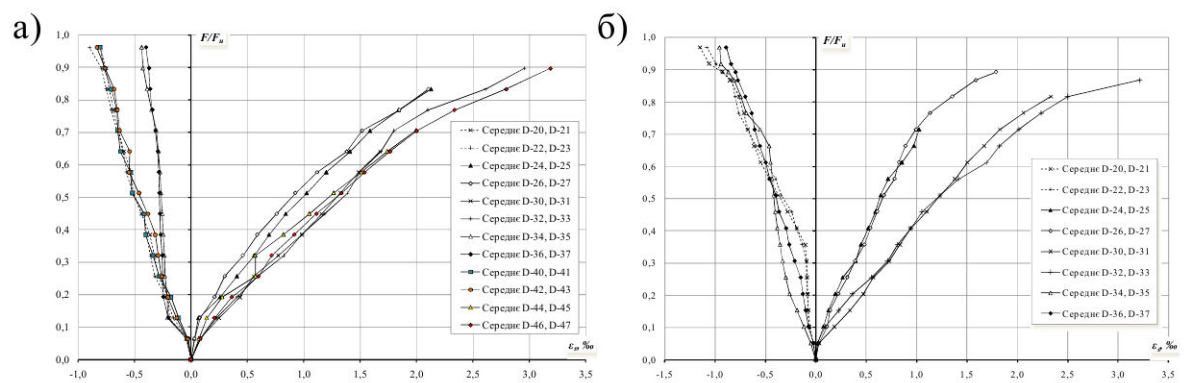
**Рис. 3. Схема установки та розміщення вимірювальних приладів:**  
 1) дослідний зразок балки; 2) опорна рама; 3) опорне кільце;  
 4) завантажувальне кільце; 5) силовий динамометр; 6) шарнірно  
 нерухома опора; 7) шарнір, який передає навантаження на зразок;  
 8) перетворювач зусиль стиску в зусилля розтягу; 9) гідравлічний  
 домкрат; 10) металевий трос; 11) штанга для закріплення приладів;  
 12) прогиномір; 13) анкери силової підлоги



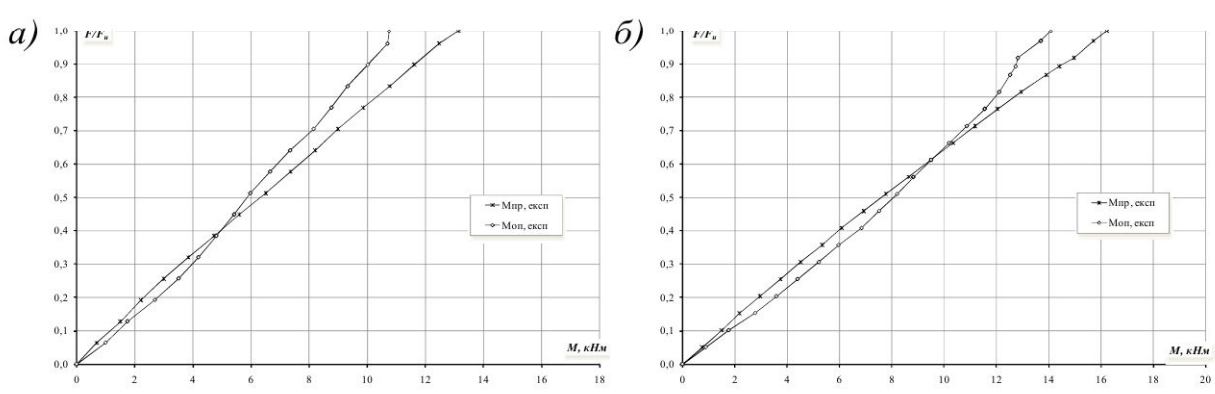
**Рис. 4. Характер тріщиноутворення та руйнування зразків**



**Рис. 5. Зміна відносних деформацій бетону в характерних нормальних перерізах балки залежно від рівня навантаження зразків серій: а) Б-1-12 та б) Б-1-14 (кубикова міцність бетону 56,9 МПа)**



**Рис. 6. Зміна відносних деформацій арматури в характерних нормальних перерізах балки залежно від рівня навантаження зразків серій: а) Б-1-12 та б) Б-1-14 (кубикова міцність бетону 56,9 МПа)**



**Рис. 7. Експериментальні значення згинальних моментів залежно від рівня завантаження у характерних перерізах (1, 2) дослідних зразків балок серій: а) Б-1-12; б) Б-1-14**

Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 1.

**Таблиця 1. Експериментальні значення граничних деформацій та згинальних моментів нормальних перерізів нерозрізних балок у граничній стадії**

Шифр зразка	Максимальна відносна деформація найбільш стиснутої грані бетону, ‰		Руйнівне навантаження, кН	Максимальний згинальний момент, кНм	
	перерізи 1-1 та 3-3	переріз 2-2		перерізи 1-1 та 3-3	переріз 2-2
	$\varepsilon_{cu1, експ}^{np}$	$\varepsilon_{cu1, експ}^{on}$	$F_{u, експ}$	$M_{u1, експ}$	$M_{u3, експ}$
Б-1-12-1	-2,869	-2,641	39	13,150	10,751
Б-1-12-2	-2,78	-2,669	38	13,177	9,746
Б-1-12-3	-2,94	-2,707	37,25	13,211	8,966
Б-1-14-1	-2,962	-2,631	49	17,435	14,085
Б-1-14-2	-2,95	-2,365	47	17,180	10,290
Б-1-14-3	-2,987	-2,661	46,5	17,214	9,746
Б-2-12-1	-3,115	-2,97	40,5	13,244	11,988
Б-2-12-2	-3,043	-2,972	39,75	13,341	11,080
Б-2-12-3	-3,026	-2,646	42	13,817	12,265
Б-2-14-1	-2,998	-2,919	48,75	17,366	11,581
Б-2-14-2	-2,969	-2,515	47,25	17,147	10,594
Б-2-14-3	-3,056	-2,625	47,5	17,277	10,571
Б-3-12-1	-2,991	-2,978	40	13,893	10,214
Б-3-12-2	-3,006	-2,472	42	13,897	12,107
Б-3-12-3	-2,874	-2,356	41,5	13,861	11,703
Б-3-14-1	-3,088	-3,094	49,75	17,993	11,277
Б-3-14-2	-3,048	-2,68	51	17,506	13,439
Б-3-14-3	-2,992	-2,452	49,5	17,374	12,798

**Висновки:**

1. Експериментальні дослідження нерозрізних залізобетонних балок дали змогу зробити висновок про те, що при їх роботі під дією короткочасного навантаження повністю підтверджується гіпотеза про сумісність деформацій бетону й арматури та гіпотеза плоских перерізів.

2. Перерозподіл внутрішніх зусиль при досягненні граничних деформацій в арматурі й бетоні в перерізі на середній опорі відбувався зі збільшенням приросту деформацій бетону та арматури значною мірою в пролітних перерізах, при цьому приріст деформацій на середній опорі призупинявся і був незначним.

3. При збільшенні кубикової міцності бетону від 57 до 67 МПа відносні деформації найбільш стиснутої грані бетону в характерних перерізах збільшувалися від 2,87 до 3,09 ‰.

4. Установлено, що при співвідношенні довжини прольоту до висоти перерізу  $\ell / h \geq 10$  умовні пластичні шарніри в нормальних перерізах балок при перерозподілі зусиль виникають не лише за рахунок прояву суттєвих деформацій в арматурі, а також за рахунок тріщиноутворення в бетоні

розтягнутої зони залежно від зміни жорсткостей на середній опорі й у прольотах. У балках з високоміцних бетонів при оптимальному армуванні тріщиноутворення виникає раніше і зі збільшенням рівня навантаження висота тріщини розвивається інтенсивніше, ніж у бетонах середньої міцності.

#### Література

1. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. – [Чинний від 01.06.2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 72 с.
2. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону / К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 168 с.
3. Митрофанов, В.П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов / В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Архитектура и технические науки. Вып. 60. – К.: Техника, 2004. – С.29–48.
4. Шкурупій, О.А. Міцність залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 1. – Київ, ДП НДІБК, 2011. – С. 605–614.
5. Вплив міцності бетону та кількості арматури на граничні характеристики нормального перерізу залізобетонних елементів / В.П. Митрофанов, О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарєв, Б.П. Митрофанов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 208–217.
6. Шкурупій, О.А. Використання чисельних і оптимізаційних методів для розрахунку міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарєв // Коммунальное хозяйство городов : сб. научных трудов. – К.: Техника, 2007. – Вып. 76. – С. 71–79.
7. Шкурупій, О.А. Аналітичне визначення фізико-механічних характеристик бетону / О.А. Шкурупій, Є.М. Бабич // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 21. – С. 401–407.
8. Тихий, М. Расчёт железобетонных конструкций в пластической стадии. Перераспределение усилий / М. Тихий, Й. Ракошник; пер. с чешск. – М.: Стройиздат, 1976. – 198 с.
9. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p.

Надійшла до редакції 16.09.2013

© О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарєв, Ю.О. Авраменко, О.М. Лазарєва