

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ

Олена КУЦИК<sup>1</sup>, Олександр ЖУРАВСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,  
58012, Україна, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2

<sup>2</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури,  
03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31

<sup>1</sup> kutsikolena@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4370-0221>

<sup>2</sup> zhuravskyi.od@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-7065-3312>

DOI: 10.32347/2522-4182.9.2021.87-93

**Анотація.** Використання якісних матеріалів необхідне для виготовлення несучих залізобетонних конструкцій, які зазнають дії великих навантажень. Для забезпечення таких вимог необхідно використовувати високоміцний бетон, який має високу міцність на стиск, водо- та газонепроникність, корозостійкість завдяки своїй щільній структурі. Використання високоміцних бетонів дає можливість зменшити розміри поперечного перерізу конструкцій, тим самим зменшити вагу конструкцій, у порівнянні з конструкціями з традиційних класів бетону.

В роботі наведено результати експериментально-теоретичні дослідження роботи залізобетонних балок з високоміцного та звичайного бетону при поперечному згинанні.

Розроблена програма експериментальних досліджень, яка включає виготовлення та випробування бетонних зразків призм та кубів для визначення міцнісних та деформативних характеристик бетонів різних класів, виготовлення та випробування дослідних залізобетонних балок на дію поперечного навантаження. Було випробувано три серії балок по чотири в кожній серії. Запропоновано склад бетонної суміші для високоміцного бетону з використанням метакаоліну та гіперпластифікатору.

Запропонований алгоритм розрахунку несучої здатності згинальних елементів, що базується на деформаційному методі, дає можливість з достатньою точністю отримувати результати. Розрахунок виконано за розробленим алгоритмом, який реалізований в програмі Mathcad.



**Олена КУЦИК**  
асистент кафедри будівництва



**Олександр ЖУРАВСЬКИЙ**  
завідувач кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій,  
д.т.н., професор

Виконаний аналіз експериментальних та теоретичних значень несучої здатності залізобетонних балок з високоміцного та звичайного бетону при поперечному згині.

**Ключові слова.** Високоміцний бетон; несуча здатність; призмova міцність; згинальний момент; кривизна; тріщиностійкість; модуль пружності.

### ПОСАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасне будівництво характеризується збільшенням поверховості будівель, при цьому зростають навантаження на несучі конструкції.

На даний момент в європейських країнах до високоміцних бетонів відносять бетонні суміші з міцністю на стиск від 60 до 130 МПа. Такі бетони виготовляються чітко за розробленими нормами і правилами, що

наведенні у нормативних документах різних передових країнах. Застосовуючи розмір зерен в'яжучого до 600 мкм та зменшуючи водо-цементне співвідношення до 0,15, досягається міцність бетону до 200 МПа. У цьому випадку говорять про надміцні бетони [1, 3, 7].

Уперше вираз «високоміцний бетон» був використаний у 1929 р. в США, де для будівництва висотних будівель досліджувались нові бетони та їх компоненти, міцність на стиск яких досягала 130 МПа. В Європі, а саме у Німеччині, перші високоміцні бетони були отримані в 40-х роках минулого століття. В 1966 р. в лабораторних умовах було отримано бетон з міцністю на стиск 140 МПа, а в 1988 р. в промислових умовах виготовлялись тубінги з бетону класу С85 [1, 3, 7].

Перші високоміцні бетони виготовляли, використовуючи жорсткі суміші, використовуючи специфічні способи ущільнення та автоклавне твердіння. Було виявлено,

що в бетоні найслабшим компонентом є цементний камінь. Міцність в цьому випадку пропорційно залежить від водо-цементного співвідношення. Тому його зниження було першим завданням перед проектувальниками. Використання сучасних пластифікаторів дає можливість значно збільшити міцнісні характеристики бетонів.

З метою впровадження високоякісних бетонів в сучасне будівництво необхідно розробити методика розрахунку конструкцій з таких бетонів. Необхідно виконати порівняльний аналіз роботи залізобетонних конструкцій з високоміцного та звичайного бетонів.

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

Згідно діючого ДСТУ несуча здатність згинальних елементів рекомендується визначати за формулами [4, 9]:

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\kappa}} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\kappa}^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0. \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\bar{\kappa}}; \quad (5)$$

$\bar{\kappa}$  - відносна кривизна:

$$\bar{\kappa} = \frac{\kappa}{\varepsilon_{c1}}; \quad (6)$$

В залежностях (1), (2) згідно [5]:

$\kappa = \left(\frac{1}{r}\right)$  - кривизна вигнутої осі в перерізі (1/м):

$$\kappa = \left(\frac{1}{r}\right) = \frac{\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)}}{h}; \quad (3)$$

$\varepsilon_{c(1)}$  - відносні деформації сталевібробетону в стиснутій зоні перерізу;

$\varepsilon_{c(2)}$  - відносні деформації сталевібробетону в розтягнутій зоні перерізу;

$\gamma$  - відношення відносних деформацій стиску  $\varepsilon_{c(1)}$  до граничних  $\varepsilon_{c1}$ :

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}}; \quad (4)$$

$x_1$  - висота стиснутої зони (м):

$\sigma_{si}$  - напруження в арматурі;

$z_{si}$  - відстань від центра ваги арматури до крайньої стиснутої грані перерізу;

$a_k$  - коефіцієнти полінома, які визначаються у залежності від значення призмової міцності бетону згідно методики [9].

Рівняння (1), (2) представимо у вигляді

$$N_c + N_s = 0; \quad (7)$$

$$M_c + M_s = M, \quad (8)$$

де:

$N_c, M_c$  - зусилля в стиснутій зоні бетону;

$N_s, M_s$  - сумарні зусилля в арматурі.

Розпишемо значення внутрішніх зусиль

$$N_c = \frac{bf_c}{\bar{\kappa}} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1}; \quad (9)$$

$$N_s = \sigma_{s2}A_{s2} - \sigma_{s1}A_{s1}; \quad (10)$$

$$M_c = \frac{bf_c}{\bar{\kappa}^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2}; \quad (11)$$

$$M_s = A_{s1}E_{s1}\bar{\kappa}(x_1 - z_{s1})^2 + A_{s2}E_{s2}\bar{\kappa}(x_1 - z_{s2})^2. \quad (12)$$

Напруження в арматурі:

$$\sigma_{si} = E_{si}\bar{\kappa}(x_1 - z_{si}) \quad (13)$$

З рівнянь (9), (10) отримаємо залежність для кривизни

$$\bar{\kappa} = \frac{-b_{\Sigma} + \sqrt{b_{\Sigma}^2 - 4a_{\Sigma}c_{\Sigma}}}{2a_{\Sigma}}, \quad (14)$$

де:

$$a_{\Sigma} = A_{s1}E_{s1}z_{s1} + A_{s2}E_{s2}z_{s2}; \quad (15)$$

$$b_{\Sigma} = -\varepsilon_{c(1)}(A_{s1}E_{s1} + A_{s2}E_{s2}); \quad (16)$$

$$c_{\Sigma} = -bf_{cd}\varepsilon_{c1} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} \quad (17)$$

Значення кривизни  $\bar{\kappa}$  підставляємо у формули (11), (12) для визначення моментів  $M_{cf}$ ,  $M_s$ . За формулою (8) визначаємо згинальний момент  $M$ , який відповідає кривизні  $\bar{\kappa}$ . Розрахунок виконується покроково для кожного значення відносних деформацій в стиснутій зоні перерізу  $\varepsilon_{c(1)}$ , яке послідовно збільшується на величину  $\Delta\varepsilon_{c(1)}$ .

Розрахунок виконується за розробленим алгоритмом, який реалізований в програмі Mathcad.

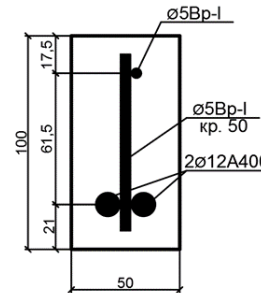


Рис. 1. Поперечний переріз дослідних балок

Fig. 1. Cross section of experimental beams

Теоретичні розрахунки виконувались для дослідних балок прямокутного перерізу з подвійним армуванням (рис. 1).

Розрахунки виконувались для трьох серій балок, які були виготовлені з бетону різного класу (табл. 1).

Розрахункова схема балок являє собою однопрогонову балку з шарнірними опорами, яка завантажена двома зосередженими силами в третинах прогону. Довжина прогону становить 1000 мм.

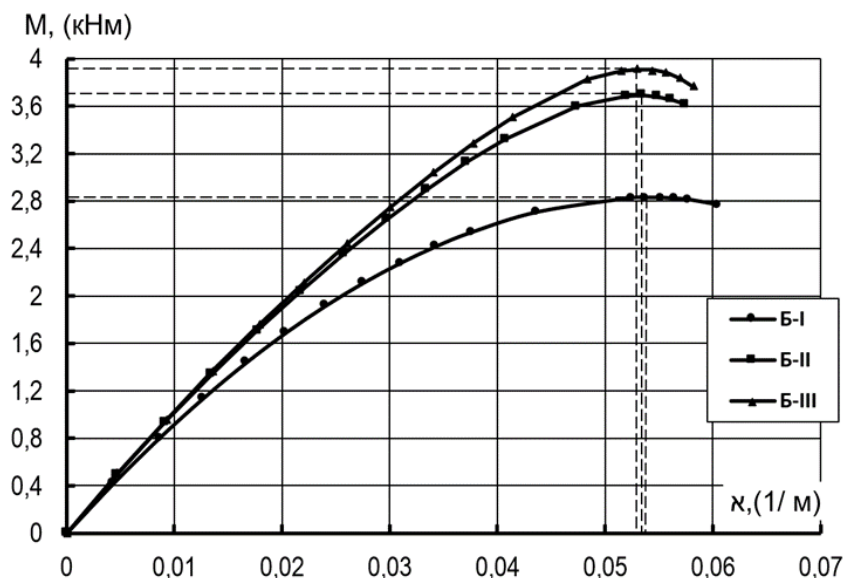
Табл. 1. Міцнісні та деформативні характеристики бетону для експериментальних балок  
Table 1. Strength and deformability characteristics of concrete for experimental beams

Серія	Кубикова міцність, МПа		Призмova міцність, МПа		Модуль пружності $E_c \times 10^{-3}$ , МПа
	$f_{cm,cube}$	$f_{ck,cube}$	$f_{cm,prism}$	$f_{cd}$	
Б-I	31,45	24,49	22,86	13,69	26,47
Б-II	79,50	61,90	71,14	42,61	37,42
Б-III	85,05	66,22	79,51	47,62	42,83

Результати розрахунку зводимо у графіки «момент-кривизна», який наведено на рис. 2.

Несуча здатність балки марки Б-I становить  $M_u = 2,83$  кНм, балки марки Б-II становить  $M_u = 3,69$  кНм, балки марки Б-III

становить  $M_u = 3,91$  кНм.



**Рис. 2.** Теоретичні графіки «момент-кривизна» для дослідних балок  
**Fig. 2.** Theoretical graphs of "moment-curvature" for experimental beams

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження виконувались на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури [4, 9]. Зразки виготовлялись з бетону, до складу якого входять: гранітний щебінь (двох фракцій 5...10 мм та 10...20 мм), кварцовий пісок (модуль крупності 0,95 мм), цемент марки М500, добавки з метакаоліну та гіперпластифікатора (STACHEMENT 2597), вода (В/Ц=0,32). Міцнісні та деформативні характеристики бетонів наведені в табл. 1.

Для експериментальних досліджень було використано три серії зразків (по чотири балки в кожній серії). Балки довжиною 1200 мм та перерізом 100×50 мм армувались в розтягнутій зоні двома стержнями Ø12A400, а в стиснутій зоні одним стержнем Ø5Bp-I (рис. 1). Поперечна арматура Ø5Bp-I, яка встановлена з кроком 50 мм в приопорних зонах довжиною 400 мм.

Балки опирались на дві опори з прольотом 1000 мм та завантажувались двома зосередженими силами, які розташовані на відстані 333 мм від опор (рис. 3).

На кожній ступені завантаження вимірювались прогини балки за допомогою інди-

катора годинникового типу I-1 з ціною поділки 0,01 мм.

В розтягнутій зоні вимірювались індикаторами годинникового типу I-2...I-5 ціною поділки 0,001 мм на базі 200 мм та тензорезисторами Т-5...Т-14 на базі 50 мм. Деформації арматурних стержнів вимірювались тензорезисторами Т-1...Т-4 на базі 20 мм. Ширину розкриття тріщин вимірювали за допомогою мікроскопа Брінеля з ціною поділки 0,05 мм. Навантаження прикладались за допомогою гідравлічного домкрата через систему тягів та траверс, а значення сили  $F_1$  визначалась за допомогою динамометра камер тонного типу, який був встановлений на одній з опор (рис. 3).

В результаті випробування дослідних балок отримані значення навантажень  $F_{cr,1}$ , при яких з'явилися нормальні тріщини та навантажень  $F_{u,1}$ , при яких зруйнувались балки. Значення цих навантажень для кожної балки та середнє їх значення для кожної серії наведені в таблиці 2.

Аналіз результатів випробувань показав, що в балках з високоміцного бетону (серія Б-III) тріщини з'явилися раніше ніж в балках серії Б-II та Б-I, тобто в середньому при  $F_{cr,1}=5,1$  кН. Це на 19,6% менше від тріщиностійкості балок серії Б-II ( $F_{cr,1}=6,4$  кН) та на 31,0% менше від тріщиностійкості балок серії Б-I ( $F_{cr,1}=7,3$  кН).



**Рис. 3.** Стенд для випробування дослідних балок.

**Fig. 3.** Bench for testing experimental beams.

**Табл. 2.** Результати експериментальних досліджень балок

**Table 2.** The results of experimental studies of beams

Серія	Марка балки	Навантаження тріщиноутворення $F_{ср,1}$ , кН		Руйнуюче навантаження $F_{u,1}$ , кН	
		одного зразка	середнє	одного зразка	середнє
Б-I	Б-I-1	8,1	7,3	13,5	10,75
	Б-I-2	6,0		10,0	
	Б-I-3	6,2		10,0	
	Б-I-4	8,9		9,5	
Б-II	Б-II-1	6,7	6,4	11,5	11,05
	Б-II-2	6,0		11,0	
	Б-II-3	6,1		10,8	
	Б-II-4	6,8		10,9	
Б-III	Б-III-1	4,6	5,1	11,5	13,03
	Б-III-2	5,1		13,5	
	Б-III-3	5,9		12,9	
	Б-III-4	4,8		14,2	

**Табл. 3.** Експериментальні та теоретичні значення згинальних моментів при руйнування дослідних балок

**Table 3.** Experimental and theoretical values of bending moments at destruction of experimental beams

Серія	Момент при руйнуванні $M_u$ , кНм	
	теоретичний	експериментальний
Б-I	2,83	3,58
Б-II	3,69	3,68
Б-III	3,91	4,34

Аналіз руйнуючих навантажень показав зовсім протилежні значення найменші значення були в балках серії Б-I, тобто  $F_{u,1}=10,75$  кН. Це на 2,7% менше від міцності балок серії Б-II ( $F_{u,1}=11,05$  кН) та на 17,5% менше від міцності балок серії Б-III ( $F_{u,1}=13,03$  кН).

Тріщиноутворення та характер руйнування балок серії Б-I відбувалось за звичайною схемою – виникнення нормальних тріщин в розтягнутій зоні перерізу, їх роз-

виток при збільшенні навантаження, руйнування балок внаслідок досягнення деформацій текучості розтягнутої арматури та руйнування стиснутої зони бетону. Руйнування мали пластичний характер. Тріщиноутворення та руйнування балок серій Б-II та Б-III мали дещо інший характер. Виникнення тріщин почалось раніше ніж в балках серії Б-I. Однак їх розвиток та розкриття не був таким інтенсивним як в балках серії Б-I. При руйнуванні балок серій Б-II та Б-III

висота стиснутої зони була значно більшою ніж в балках серії Б-І. При чому викали горизонтальні тріщини, які розділяли розтягнуту та стиснуту зони бетону.

При аналізі експериментальних та теоретичних значень згинальних моментів при руйнування дослідних балок встановлено їхнє добре співпадіння для балок марки Б-ІІ. Для балок марок Б-І та Б-ІІІ теоретичні значення  $M_u$  виявились нижчими від експериментальних відповідно на 20,9% та 9,9%.

Подібні дослідження виконувались в роботах [10...12].

## ВИСНОВКИ

1. Виконані експериментальні дослідження залізобетонних балок з високоміцного та звичайного бетонів показали деякі відмінності їхньої роботи при поперечному згині. При руйнуванні балок серій Б-ІІ та Б-ІІІ викали горизонтальні тріщини, які розділяли розтягнуту та стиснуту зони бетону.

2. Аналіз результатів випробувань показав, що в балках з високоміцного бетону (серія Б-ІІІ) тріщини з'явились раніше ніж в балках серії Б-ІІ та Б-І.

3. Несуча здатність балок з високоміцного бетону значно вища від балок зі звичайного бетону більш ніж у 1,3 рази.

4. Запропонований алгоритм розрахунку несучої здатності згинальних елементів, що базується на деформаційному методі, дає можливість з достатньою точністю отримувати результати.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон // М.: Стройиздат, 1971. –196 с.
2. ДБН В.2.6.-98:2009. Конструкції будівель та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. -К.: Мінрегіон України, 2011. -71 с.
3. Kutsik O. Efficiency of using high-strength concrete // Build-master-class-2017, pp. 181-182.
4. ДСТУ Б В.2.6.-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проекту-

вання. –К.: Мінрегіонбуд України, 2011. -118 с.

5. EN 1992-1-1-2004: Eurocode 2: Design of concrete structures.-Part 1-1: General rules and rules for buildings. [Final Draft, December, 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.
6. ACI 318M-08. Building Code Requirements for Structural Concrete. [June 2008]. Farmington Hills, MI: ACI Committee 318, 2008. 473 p.
7. Куцик О.В., Журавський О.Д. Аналіз використання високоміцного бетону у сучасному будівництві // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. –К., КНУБА, -Вип. 61., 2016, С.444-449.
8. Куцик О.В., Журавський О.Д. Міцність і тріщиностійкість згинальний елементів з високоміцного бетону // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. –К., КНУБА, -Вип. 1., 2017, С. 199-204.
9. Проектування залізобетонних конструкцій. Посібник / А. М. Бамбура, Г. Р. Сазонова, О.В. Дорогова, О.В.Войцехівський / За ред. А.М. Бамбура. Київ: Майстер книг, 2018. 240 с.
10. O.D. Zhuravskiy. Bearing Capacity of Steel-fiber-concrete Slabs with Biaxially Prestressed Reinforcement // Journal of Strength of Materials and Theory of Structures, Issue 105, pp. 292-301, Kyiv, Ukraine, 2020.
11. O. Zhuravskiy. Method and Example of Calculation of Combined Reinforced Bending Elements // Journal of Industrial Machine Building, Civil Engineering, Issue 1 (54)', pp. 40-46, Poltava, Ukraine, 2020.
12. O. Zhuravskiy, V. Tymoshchuk, N. Zhuravska, M. Hajiyev. Influence of Strengthening Flat Slab by External Prestressed Reinforcement on Deformation Characteristics of the Slab // Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. Vol. 181, pp. 449-456, Switzerland, 2022.

## REFERENCES

1. Berh O.Ia., Shcherbakov E.N., Pysanko H.N. Vysokoprochnyi beton // M.: Stroiyzdat, 1971. –196 s.
2. DBN V.2.6.-98:2009. Konstruktzii budivel ta sporud. Betonni ta zalizobetonni kons-truktzii. Osnovni polozhennia. -K.: Minrehion Ukrainy, 2011. -71 s.

3. **Kutsik O.** Efficiency of using high-strength concrete // *Build-master-class-2017*, pp. 181-182.
4. **DSTU B V.2.6.-156:2010.** Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia. –K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. -118 s.
5. **EN 1992-1-1-2004:** Eurocode 2: Design of concrete structures.-Part 1-1: General rules and rules for buildings. [Final Draft, December, 2004]. *Brussels: CEN. 2004. 225 p.*
6. **ACI 318M-08.** Building Code Requirements for Structural Concrete. [June 2008]. *Farmington Hills, MI: ACI Committee 318, 2008. 473 p.*
7. **Kutsyk O.V., Zhuravskiy O.D.** Analiz vykorystannia vysokomitsnoho betonu u suchasnomu budivnytstvi // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia: Nauk.-tekhn. zbirnyk. –K., KNUBA, -Vyp. 61., 2016, S.444-449.*
8. **Kutsyk O.V., Zhuravskiy O.D.** Mitsnist i trishchynostiikist zghynalniy elementiv z vysokomitsnoho betonu // *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka: Zbirnyk naukovykh prats. –K., KNUBA, -Vyp. 1., 2017, S. 199-204.*
9. **Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii.** Posibnyk / A.M.Bambura, HR.Sazonova, O.V. Dorohova, O.V.Voitsekhivskiy / *Za red. A.M. Bambura. Kyiv: Maister knyh, 2018. 240 s.*
10. **O.D. Zhuravskiy.** Bearing Capacity of Steel-fiber-concrete Slabs with Biaxially Prestressed Reinforcement // *Journal of Strength of Materials and Theory of Structures, Issue 105, pp. 292-301, Kyiv, Ukraine, 2020.*
11. **O. Zhuravskiy.** Method and Example of Calculation of Combined Reinforced Bending Elements // *Journal of Industrial Machine Building, Civil Engineering, Issue 1 (54), pp. 40-46, Poltava, Ukraine, 2020.*
12. **O. Zhuravskiy, V. Tymoshchuk, N. Zhuravska, M. Hajiyev.** Influence of Strengthening Flat Slab by External Prestressed Reinforcement on Deformation Characteristics of the Slab // *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. Vol. 181, pp. 449-456, Switzerland, 2022.*

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE BENDING ELEMENTS MADE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE

*Olena KUTSYK, Oleksandr ZHURAVSKYI*

**Summary.** The use of quality materials is necessary for the manufacture of load-bearing reinforced concrete structures that are subject to heavy loads. To meet such requirements, it is necessary to use high-strength concrete, which has high compressive strength, water and gas tightness, corrosion resistance due to its dense structure. The use of high-strength concrete makes it possible to reduce the cross-sectional dimensions of structures, thereby reducing the weight of structures compared to structures of traditional classes of concrete.

The results of experimental and theoretical researches of work of reinforced concrete beams from high-strength and ordinary concrete at cross bending are resulted in work.

A program of experimental research has been developed, which includes the manufacture and testing of concrete samples of prisms and cubes to determine the strength and deformation characteristics of concrete of different composition, the manufacture and testing of experimental reinforced concrete beams for transverse loading. Three series of rays were tested, four in each. The composition of the concrete mixture for high-strength concrete using metakaolin and hyperplasticizer is proposed.

The proposed algorithm for calculating the bearing capacity of bending elements, based on the method of deformation, allows obtaining results with sufficient accuracy. The calculation is performed according to the developed algorithm, which is implemented in the Mathcad program.

The analysis of experimental and theoretical values of bearing capacity of reinforced concrete beams from high-strength and usual concrete at transverse bend

**Keywords.** High-strength concrete; load-bearing capacity; prismatic strength; bending moment; curvature; crack resistance; modulus of elasticity.

*Стаття надійшла до редакції 3.11.21.*