

УДК 624.012.36

**ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ БЕТОНУ НА ПОВЕРХНІ
ПЕРЕХРЕСНО СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК
МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ**

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, І. В. МЕЛЬНИК², В. П. ПАРТУТА²,
О. П. МАКСИМЕНКО¹, Т. В. ПРИСТАВСЬКИЙ², В. В. КОВАЛЬЧУК²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Подано конструкцію дослідних зразків і результати дослідження деформацій бетону лінійних і перехресних балок у зоні двовісного стиску з використанням оптико-цифрової системи (ОЦС). За допомогою ОЦС виявлено особливості зміни деформованого стану стиснутого бетону верхньої грані перехресних балок у зоні їх перетину на всіх етапах навантаження до руйнування верхнього шару бетону. Встановлено, що деформаційні характеристики бетону цих балок за двовісного стиску є меншими від таких для лінійних балок, випробуваних окремо за одновісного стиску.

Ключові слова: залізобетонні балки, двовісно стиснутий бетон, спекл-кореляційний метод, деформації.

The construction of experimental specimens and the results of the study of concrete deformations of linear and cross beams in the biaxial compression zone using an optical-digital system (ODS) are presented. With the help of the ODS, the features of the change in the deformed state of the compressed concrete of the cross beams upper face in the zone of their intersection at all loading stages until the fracture of the upper layer of concrete is revealed. The deformation characteristics of the concrete of these beams under biaxial compression are less than those of the same linear beams tested separately under uniaxial compression.

Keywords: reinforced concrete beams, biaxially compressed concrete, speckle-correlation method, deformations.

Вступ. Зараз все ширше використовують монолітні плоскі залізобетонні перекриття, особливо в будівлях цивільного призначення (житло, офіси тощо). Спостерігаємо також тенденцію до збільшення прольотів таких перекриттів і використання їх у торговельних і виставкових комплексах та інших спорудах. Для суттєвого зменшення ваги плоских монолітних залізобетонних перекриттів та інших плитних конструкцій доцільно використовувати ефективні вставки як окремі вироби з відносно легких і дешевих матеріалів, які розташовують в середній частині перерізу і залишають у плиті після її бетонування [1]. Модуль пружності і міцність матеріалу вставок є на порядок меншими від бетону, тому простір, який вони займають в тілі бетону, для конструкції слід вважати порожниною.

Конструктивні вирішення плитних конструкцій з такими вставками можна розділити загалом на два типи: з однонапрямленим розташуванням вставок та з двонапрямленим. За однонапрямленим отримуємо конструкцію монолітної плити з розташуванням проміжних балок-ребер в одному напрямі. Експериментальні і теоретичні дослідження таких плитних конструкцій є поширеними [1, 2]. Двонапрявлене розташування вставок формує іншу конструктивну систему, в якій про-

міжні балки-ребра мають, зазвичай, взаємоперпендикулярне розміщення. Бетон верхньої зони балок зазнає двовісного стиску, що змінює його вихідні деформаційні і міцнісні характеристики [3].

Досліджували за двовісного обтискання на окремих бетонних елементах, здебільшого, на кубах і призмах [4–15]. Мета роботи – вивчити деформативність двовісно стиснутого бетону в залізобетонних конструкціях.

Конструкція дослідних зразків. Конструкції лінійної балки марки Л-1 (яка є елементом перехресної балки) і перехресної балки марки ЛП-1 подано на рис. 1.

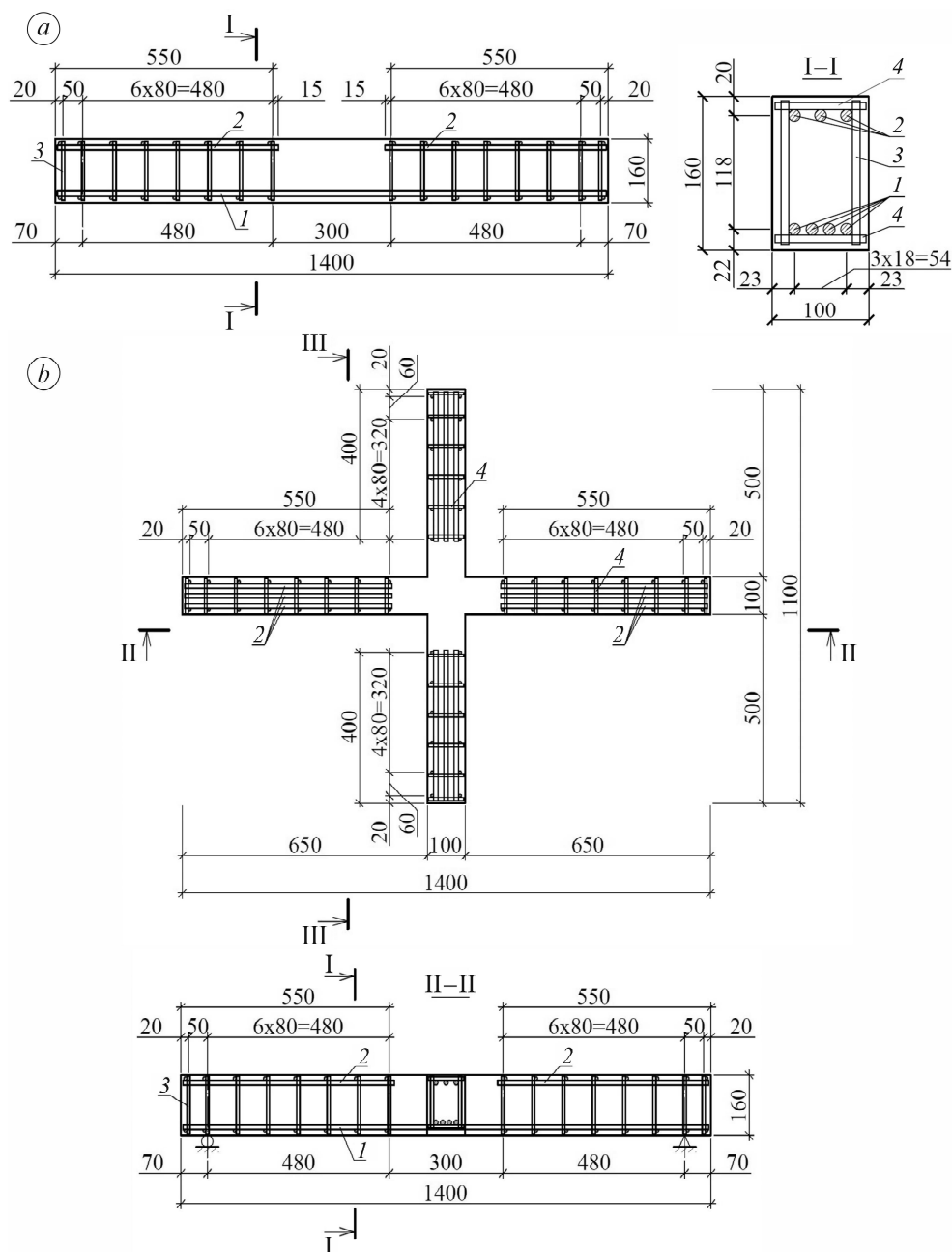


Рис. 1. Конструкція дослідних зразків марки Л-1 (а) та марки ЛП-1 (б).

Fig. 1. Construction of experimental samples of the L-1 grade (a) and LP-1 grade (b).

В середній частині балок у зоні чистого згину передбачено лише нижню робочу арматуру, яка прийнята за результатами розрахунків, щоби руйнування відбулось по стиснутому бетону. Поза зоною чистого згину передбачена верхня і поперечна арматура для упередження руйнування за похилими перерізами.

Загальна конструкція дослідного зразка Л-2 є аналогічною до конструкції балки Л-1 з такими відмінностями: довжина 1,1 м; в перерізі І-І відстань до осі нижньої арматури 36 мм. У перерізі ІІ-ІІ загальна конструкція є аналогічною до перерізу ІІ-ІІ.

Для виготовлення балок використано арматуру класу А500 і бетон проектного класу С25/30 з такими фактичними характеристиками: $f_{\text{cube}} = 29,2 \dots 30,3$ МПа; $f_{\text{prism}} = 24,3 \dots 25,7$ МПа. Повздовжня верхня і нижня арматури діаметра 12 мм, поперечна – $\varnothing$ 8 мм.

Лінійні і перехресні дослідні зразки навантажували відповідно двома і чотирма симетрично розташованими зосередженими силами з використанням гідравлічних домкратів і силороздільних траверс. Навантаження контролювали протарованими коловими динамометрами, встановленими на опорах.

Визначення деформацій верхньої грані бетону залізобетонних балок за використання оптико-цифрової системи (ОЦС). Як відомо [16, 17], ОЦС є програмно-апаратним комплексом, який дає можливість дистанційно визначати переміщення і поля деформацій за зображеннями поверхні досліджуваних об'єктів за різноманітних впливів, зокрема силовим навантаженням.

На відміну від відомих способів застосування ОЦС, тут визначали деформації верхньої грані балки під час її поетапного навантаження. Для отримання зображень використовували дзеркало, встановлене під кутом 45° над досліджуваними балками (рис. 2). Це пов'язано з тим, що основні перехресні дослідні зразки унеможливлювали фіксацію деформацій бокової поверхні в зоні перетину балок.

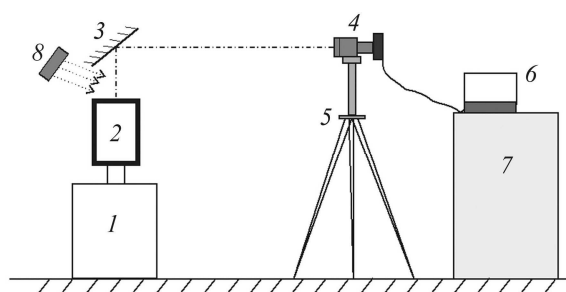


Рис. 2. Схема визначення деформацій балки методом цифрової кореляції спекл-зображень (ЦКЗ): 1 – опора; 2 – балка; 3 – дзеркало, нахилене під кутом 45° до вертикалі; 4 – цифрова дзеркальна фотокамера NIKON D7000 з об'єктивом Sigma-400; 5 – фотографічний штатив; 6 – комп'ютер; 7 – стіл; 8 – джерело світла.

Fig. 2. Scheme for determining beam deformations by the method of digital correlation of speckle images (DCI): 1 – support; 2 – beam; 3 – mirror inclined at an angle of 45° relative to the vertical; 4 – NIKON D7000 digital SLR camera with Sigma-400 lens; 5 – photographic tripod; 6 – computer; 7 – table; 8 – light source.

Зображення ділянки поверхні балки реєстрували за різного ступеня навантаження і в подальшому опрацьовували на комп'ютері спеціальним програмним забезпеченням (Vic-2D), яке дало змогу отримати зміни у розподілі деформацій на верхній грані балки з просторовим розділенням 10 мм стосовно першого зображення ненавантаженої балки. Для забезпечення задовільного просторового розділення на досліджуваній ділянці балки формували контрастну випадкову

плямисту структуру за допомогою білої і чорної фарб, використовуючи для цього спеціально виготовлений трафарет.

Поля деформацій e_x , e_y і e_{xy} отримували за переміщеннями елементарних ділянок поверхні розміром 10×10 mm. Ці переміщення визначають під час попіксельного порівняння зображень, зареєстрованих за різного навантаження основи. Якщо за навантаження елементарна ділянка поверхні переміщується у будь-якому напрямку, то ці переміщення визначають порівнянням між собою двох зображень, одне з яких початкове (без навантаження), а інше – зареєстроване за певного навантаження з використанням спеціального алгоритму цифрової кореляції спекл-зображень (ЦКЗ). За визначеними переміщеннями елементарних ділянок поверхні u і v у напрямку осей координат Ox і Oy , відповідно, розраховуємо деформації:

$$e_x = \frac{du}{dx} + \frac{\left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2}{2}, \quad e_y = \frac{dv}{dy} + \frac{\left(\frac{du}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dy}\right)^2}{2}. \quad (1)$$

Зсувні деформації обчислюють так:

$$e_{xy} = \frac{\left(\frac{du}{dy}\right) + \left(\frac{dv}{dx}\right) + \frac{du}{dx} \frac{dv}{dy} + \frac{dv}{dx} \frac{du}{dy}}{2}. \quad (2)$$

Результати випробування балок Л-1 та Л-2. Балку Л-1 навантажували двома симетричними зосередженими силами з відстанню між ними в зоні чистого згину 30 cm і відстанню до опор 48 cm. Навантажували гідравлічним домкратом і контролювали протарованими коловими динамометрами, встановленими на опорах. Для заміру переміщень верхньої і бокових граней балок використовували також індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,001 mm.

Під час експерименту балку поступово навантажували до руйнування з витримкою на кожному кроці навантаження до 20 min. Значення моменту, за якого відбулося руйнування в зоні чистого згину – 21,68 kN·m. Показано (рис. 3a) зміну відносних деформацій на поверхні балки, розрахованих на базі 200 mm з використанням ОЦС за поетапного навантаження, та зміну деформацій бетону верхньої грані, замірених механічними приладами. Бачимо задовільну збіжність деформацій, визначених двома методами.

Балку Л-2 навантажували як і балку Л-1, але з іншою відстанню до опор (33 cm). Руйнування балки відбулось за навантаження 62,5 kN ($M = 21,53$ kN·m).

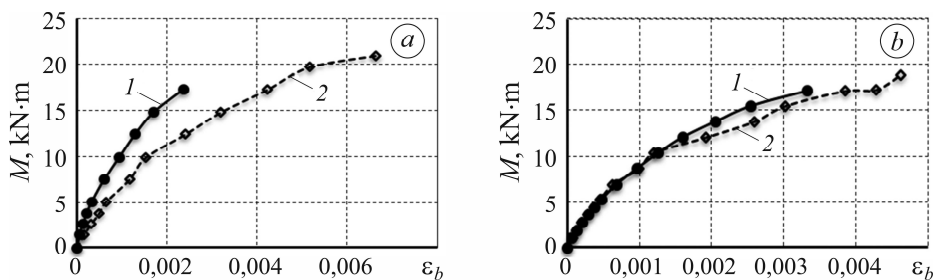


Рис. 3. Зміна деформацій бетону за поетапного навантаження балки Л-1 (a) і Л-2 (b): 1 – визначені механічними приладами; 2 – ОЦС.

Fig. 3. Changes in deformations of concrete under stepwise loading of beams L-1 (a) and L-2 (b): 1 – determined by mechanical devices; 2 – optical-digital system (ODS).

Визначали деформації верхньої грані бетону балки Л-2 аналогічно до балки Л-1. Маємо задовільну збіжність графіків зміни деформацій, отриманих двома методами (рис. 3b).



Рис. 4. Установка для дослідження балки ЛП-1.

Fig. 4. General view of the beam LP-1 study.

рахунків деформацій прийнято, що вісь Ox направлена вздовж осі довгої балки, а вісь Oy – вздовж осі короткої (рис. 5).

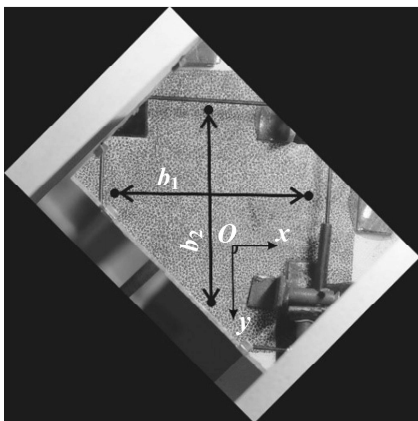


Рис. 5. Зображення верхньої грані балок.

Fig. 5. Image of the upper face of the beams.

Характер зміни деформацій бетону балки вздовж напрямку бази вимірювання b_2 подано на рис. 6. Поле деформацій бетону верхньої грані неоднорідне і суттєво змінюється на кожному етапі навантаження залежно від значення зосереджених сил F . Його неоднорідність зумовлена присутністю крупного наповнювача,

який в локальному об'ємі порушує однорідність поля напружень. Характер зміни деформацій в напрямку b_1 є аналогічним.

Показано (рис. 7) зміну осьових усереднених деформацій верхньої грані балки ЛП-1 в напрямку осей Ox і Oy за різного навантаження, які зіставлені з деформаціями, визначеними механічними приладами. Збіжність графіків деформацій задовільна.

Рис. 6. Зміна деформацій в напрямку вимірювань b_2 за навантаження 21 kN (+), 33 kN (●), 39 kN (■), 45 kN (▼), 51 kN (*).

Fig. 6. Change in deformations along the measurement bases b_2 under loading 21 kN (+), 33 kN (●), 39 kN (■), 45 kN (▼), 51 kN (*).

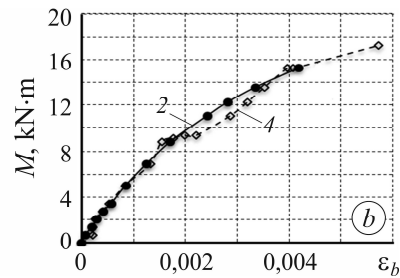
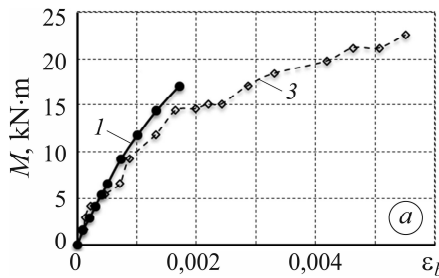
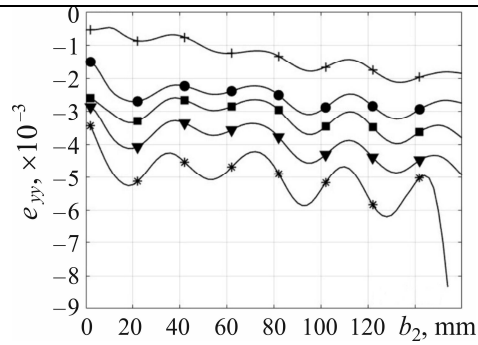


Рис. 7. Деформації бетону балок вздовж осей Ox (a) та Oy (b), визначені механічними приладами (1, 2) та ОЦС (3, 4).

Fig. 7. Deformations of concrete beams along the Ox (a) and Oy (b) axes determined by mechanical devices (1, 2) and ODS (3, 4).

Додатково програма ЦКЗ дає можливість розраховувати сумарні деформації. За критерієм руйнування Мізеса поле деформацій у програмі розраховане так:

$$e_M = \frac{2}{3} \sqrt{e_1^2 - e_1 e_2 + e_2^2}, \quad (3)$$

де головні деформації отримують зі співвідношення

$$e_{1,2} = \frac{e_x + e_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{e_x - e_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{e_{xy}}{2}\right)^2}. \quad (4)$$

Напрямок головних деформацій e_1 і e_2 на площині визначає кут γ , який відраховується від напрямку осі Ox проти годинникової стрілки. Цей кут у програмі обчислюють так:

$$\tan(2\gamma) = \frac{e_{xy}}{e_x + e_y}. \quad (5)$$

Критерій Мізеса використовують для матеріалів, які мають пластичну складову (зокрема бетон). За цим критерієм матеріал починає руйнуватись у місцях, де деформації (напруження) перевищують певний допустимий рівень.

На основі отриманих полів деформацій розраховані головні деформації, напрямки яких збігається з напрямком головних напружень. Крім цього, отримали значення кутів γ (в радіанах) у кожній елементарній ділянці.

Аналіз результатів досліджень. Застосування ОЦС дало змогу отримати розподіли деформацій на верхній грані балок до моменту руйнування, коли вимірювальні індикатори вже не використовували. Тобто цей метод дозволяє визначати деформації в широкому діапазоні, де не можна використати механічні при-

лади контролю. Достовірність результатів визначення деформацій методом ЦКЗ підтверджують дані, наведені на рис. 3 і 7. Одержали задовільну їх збіжність.

Застосування ОЦС в експерименті дало змогу спостерігати неоднорідність полів деформацій та місця концентрації напружень на верхній грані лінійних балок, що зумовлено неоднорідною структурою їх матеріалу завдяки крупному наповнювачу.

Максимальні деформації бетону за руйнування балки Л-1 становили 0,0062, балки Л-2 – 0,0044 за згинального моменту $M_1 = 22,275 \text{ kN}\cdot\text{m}$ і $M_2 = 21,527 \text{ kN}\cdot\text{m}$, відповідно.

Для перехресної балки ЛП-1 загальне навантаження від гідравлічного домкрата передавалося через перехресну металеву силорозподільну траверсу на кожну із складових лінійних балок. Згідно з показами динамометрів, під час руйнування за навантаження $F_1 = 46,4 \text{ kN}$ згинальний момент для довшої балки (1,4 м) становив $22,275 \text{ kN}\cdot\text{m}$, для коротшої (1,1 м) за $F_2 = 65,2 \text{ kN}$ відповідно $M_2 = 21,527 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Визначені при цьому деформації бетону перед руйнуванням становили 0,0055 і 0,0057 для довшої і короткої балки, відповідно. Головні деформації бетону верхньої грані перехресних балок перед руйнуванням становили 0,0030... 0,0073, що суттєво перевищує нормативні значення деформацій стиснутого бетону 0,00355. При цьому орієнтація головних напружень бетону на окремих ділянках як за поетапного навантаження, так і перед руйнуванням різна.

ВИСНОВКИ

Використання методу ОЦС дало змогу виявити особливості зміни деформованого стану стиснутого бетону верхньої грані перехресних балок у зоні їх перетину на всіх етапах навантаження до руйнування верхнього шару бетону. Деформаційні характеристики бетону цих балок за двовісного стиску є менші від таких для лінійних балок, випробуваних окремо за одновісного стиску, що підтверджує основні положення нормативних документів в частині двовісного стиску бетону. Показано, що головні деформації бетону верхньої грані балок у зоні їх перетину перед руйнуванням становили на окремих ділянках 0,0051...0,0073, що перевищує критичні деформації бетону. Орієнтація головних напружень бетону на окремих ділянках як за поетапного навантаження, так і перед руйнуванням різна.

1. Mel'nyk I. V. Stress-strain state of the fragments of armored monolithic floors with tubular inserts // *Materials Science*. – 2016. – 52, № 2. – P. 269–279. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9954-9>
2. Mel'nyk I. V. Stiffness of monolithic reinforced-concrete slab structures // *Materials Science*. – 2019. – 55, № 3. – P. 367–373. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00311-1>
3. The stressed-deformed state of slab reinforced concrete hollow structures considering the biaxial compression of concrete / A. Bambura, I. Mel'nyk, V. Bilozir, V. Sorokhtey, T. Prystavskiy, and V. Partuta // *Eastern-Europ. J. of Enterprise Technol.* – 2020. – 1, № 7 (103). – P. 34–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194145>
4. Бамбура А. Н., Давиденко А. И. Экспериментальные исследования закономерности деформирования бетона при двухосном сжатии // *Строительные конструкции*. – 1989. – Вып. 42. – С. 95–98.
5. Давыденко А. И. Влияние сложного напряженного состояния на параметры диаграммы сжатия бетона и его учет при расчете железобетонных балок на деформируемом основании: дис. канд. техн. наук. – Киев, 1988. – 154 с.
6. ДБН В. 2. 6-98: 2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2011. – 71 с.
7. A 12 year EDF study of concrete creep under uniaxial and biaxial loading / L. Charpin, Y.-L. Pape, É. Coustabeau, É. Toppani, G. Heinfling, C.-L. Bellego, B. Masson, J. Montalvo, A. Courtois, J. Sanahuja, and N. Reviron // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – 103. – P. 140–159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.009>

8. Matthias Quast and Manfred Curbach. Concrete under biaxial dynamic compressive loading // *Procedia Eng.* – 2017. – **210**. – P. 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.044>
9. *New failure criterion models for concrete under multiaxial stress in compression* / C. Rong, Q. Shi, T. Zhang, and H. Zhao // *Construction and Building Mater.* – 2018. – **161**. – P. 432–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.106>
10. Deng Z., Sheng J., and Wang Y. Strength and constitutive model of recycled concrete under biaxial compression // *KSCE J. of Civil Eng.* – 2019. – **23**, Is. 2. – P. 699–710. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0575-8>
11. Gafoor A. H. M. A. and Dinkler D. Modeling damage behavior of concrete subjected to cyclic and multiaxial loading conditions // *Structural Concrete.* – 2022. – **23**, Is. 4. – P. 2322–2336. <https://doi.org/10.1002/suco.202100109>
12. Murray D. Concrete plasticity theory for biaxial stress analysis // *J. Eng. Mech. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.* – 1979. – **105**. – P. 989–1006.
13. Quast M. and Curbach M. Behaviour of concrete under biaxial dynamic loading // *Proc. of Fifth Int. Workshop on Performance. Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading.* – 2015. – P. 3–10.
14. *Experimental study on dynamic biaxial tension-compression properties of hydraulic concrete* / H. Wang, H. Sun, J. Shen, and W. Fan // *Australian J. of Civil Eng.* – 2021. – **19**, Is. 1. – P. 98–106. <https://doi.org/10.1080/14488353.2020.1813924>
15. *Experimental study on mechanical behavior of high-strength high-performance concrete under biaxial loading* / J. Zhou, J. Pan, L. Zhang, J. Zhao, and Z. Li // *Construction and Building Mater.* – 2020. – **258**, № 2. – P. 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119681>
16. *Методика визначення залишкового ресурсу залізобетонних мостових балок та розроблення технічних засобів моніторингу деформацій* / Я. Л. Іваницький, О. П. Максименко, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь, О. Я. Чепіль // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* – 2016. – № 3. – С. 44–49.
17. *Optical-digital method for the determination of strain fields in local areas of reinforced-concrete bridges* / Ya. L. Ivanyts'kyi, O. P. Maksymenko, R. M. Zapotochny, and Yu. V. Mol'kov // *Materials Science.* – 2015. – **51**, № 2. – P. 261–266. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9838-4>

Одержано 10.09.2024