

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ І ВСТАНОВЛЕННЯ БЕЗПЕЧНОГО ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, З. Я. БЛІХАРСЬКИЙ², О. П. МАКСИМЕНКО¹,
О. В. ПАНЧЕНКО³, Я. З. БЛІХАРСЬКИЙ²

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

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ ТЗОВ "Сіка Україна", Київ

Розроблено методологію визначення технічного стану залізобетонних мостових конструкцій, яка ґрунтується на встановленні глибини та місця найбільшого прогину з допомогою лазерної проекційної системи, а також підхід для знаходження напружено-деформованого стану (НДС) по висоті балки. Для цього використано енергетичний спосіб, який передбачає розрахунок енергії пружно-пластичного деформування бетону і арматури. Експериментально встановлено питому енергію руйнування як інваріантну характеристику міцності бетону на розтяг і стиск, а також арматури на розтяг. Побудовано істинні діаграми деформування та руйнування зразків бетону, відібраних з конструкції. Експериментальні результати досліджень НДС за згину залізобетонної балки добре узгоджуються із обчисленими методом скінченних елементів.

Ключові слова: залізобетонна балка, питома енергія руйнування бетону на стиск і розтяг, оптико-цифрова кореляція спекл-зображень.

A methodology for determining the technical state of reinforced concrete bridge structures has been developed. It is based on establishing the depth and location of the largest deflection using a laser projection system, as well as an approach to finding the stress-strain state along the height of the beam. For this, an energy approach is used, which involves the calculation of the energy of elastic-plastic deformation of concrete and reinforcement. The specific fracture energy as an invariant characteristic of concrete strength under tension, compression, and also tension of reinforcement have been established experimentally. A method of constructing true diagrams of deformation and fracture of concrete samples taken from the structure has been created. The results of experimental studies of the stress-strain state during bending of a reinforced concrete beam agree well with those calculated by the finite element method.

Keywords: reinforced concrete beam, specific compressive and tensile fracture energy of concrete, optical-digital correlation of speckle images.

Вступ. В елементах мостових конструкцій, зокрема залізобетонних балок, внаслідок дії механічного циклічного навантаження з допустимою вантажопідйомністю і тривалого терміну експлуатації можуть виникати непередбачувані перевантаження, які знижують ресурс їх надійної роботи. Наприклад, з появою тріщин у бетоні пришвидшується розвиток корозійно-механічного пошкодження арматури, через що змінюються деформативні і міцнісні характеристики конструкції загалом [1–5]. Залізобетонні конструкції – це багатокомпонентні структури, піддані різним видам деформування та наділені різними фізико-механічними

характеристиками [6]. Зокрема, у верхній їх частині бетон підданий деформації стиску, а у нижній – розтягу. Причому опірність його деформуванню за стиску приблизно на порядок більша, ніж за розтягу. Сталева арматура в балці піддана деформації розтягу та згину.

Оцінювати несучу здатність, розраховувати напружено-деформований стан (НДС) та встановлювати термін безпечної роботи таких конструкцій необхідно за критерієм, який би враховував всі стадії деформування, аж до настання їх граничного стану [7–9]. Найбільш об'єктивно і повно оцінити опірність залізобетонної балки деформуванню та руйнуванню можна на основі енергетичного підходу. Для цього запропоновано алгоритм розрахунку, який передбачає формулювання критерію та умов настання граничного стану за результатами дистанційного моніторингу мостових конструкцій, а також розрахунок енергії пружно-пластичного деформування складників і визначення питомої енергії руйнування балки як інваріантної характеристики її опірності деформуванню.

Для об'єктивної оцінки стану мостових конструкцій необхідні нові підходи, засновані на інструментальному контролі характеристик їх елементів, встановленні реальних прогинів, амплітуди і частоти коливань. Нижче для цього систему безконтактного вимірювання цих параметрів з допомогою лазерної оптичної системи [10], а також визначено НДС по висоті балки [11] переносним оптико-цифровим спекл-корелятором зображень та оцінено ступінь пошкодження за енергетичним підходом механіки суцільного середовища.

Відома система для дистанційного вимірювання амплітуди коливань і прогину елементів мосту за допомогою одного лазерного модуля, відеокамери, екрана об'єктива і персонального комп'ютера [1]. Зокрема, прогину і амплітуди коливань по центру балки [1–5], що необов'язково може збігатися з місцем максимального НДС. Удосконалену систему запропоновано у праці [6], де використали два додаткові лазерні модулі з такими ж довжиною хвилі, екраном, відеокамерою, об'єктивами та персональним комп'ютером.

Дистанційний моніторинг мостових конструкцій охоплює визначення переміщень, частоти та амплітуди коливань балкових елементів з використанням лазерної проекційної системи за експлуатаційних та випробувальних навантажень. За результатами досліджень можна встановити місце максимального НДС. З цієї метою розробили енергетичний критерій, за яким визначили напружено-деформований та критичний стани залізобетонних конструкцій.

У працях [11–14] сформульовано енергетичний критерій руйнування і методику визначення НДС у локальних об'ємах на основі оптико-цифрової кореляції зображень (ОЦКЗ) в околі дефектів. Для встановлення деформацій методом ОЦКЗ обґрунтовано [14] вибір оптимальної бази вимірювання переміщень, де НДС однорідний, а розраховані характеристики міцності і деформативності інваріантні.

Оцінювання НДС у залізобетонних балках за енергетичним підходом. Для визначення напружено-деформованого та граничного станів у залізобетонній балці під навантаженням опрацьовано методики, які передбачають побудову повних рівноважних діаграм та розрахунок інваріантних характеристик опірності складників балки деформуванню і руйнуванню [14].

Зовнішнє навантаження по-різному впливає на міцність її складників. Зокрема, нижня частина бетону та арматура знаходяться під дією розтягальних і згинальних напружень, а верхня частина балки – під впливом стискальних. Враховуючи умови роботи та адитивність енергії деформування, пропонують оцінювати НДС таких балок за енергетичним підходом. Енергію пружно-пластичного деформування балки визначали як суму компонент енергій нижньої розтягнутої частини бетону W_{con}^S , розтягнутої арматури W_A і стиснутої верхньої частини бе-

тону W_{con}^C . Гранично рівноважний стан балки настане за умови, що сума енергії пружно-пластичного деформування $W(P, \Delta)$ усіх складників досягне енергії руйнування $W_C(S, e)$, яка і визначає її опірність деформуванню і руйнуванню:

$$W(P, \Delta) = W_C(S_i, e). \quad (1)$$

Питому енергію деформування балки визначали як суму енергій деформування бетону на стиск W_{con}^S і розтяг W_{con}^C і арматури на розтяг:

$$W(P, \Delta) = W_{con}^S + W_A + W_{con}^C. \quad (2)$$

Мірою енергетичного пошкодження ω вважали відношення енергій пружно-пластичного деформування $W(P, \Delta)$ і руйнування W_C :

$$\omega = \frac{W(P, \Delta)}{W_C(S, e)} \leq 1. \quad (3)$$

Щоб визначити складник НДС у залізобетонній балці, використовували оптико-цифровий корелятор, який встановлює розподіл деформацій по висоті балки, де її прогин максимальний. Енергію пружно-пластичного деформування і руйнування складників нижньої частини бетону та арматури за розтягу, а також верхньої частини бетону за стиску розраховували за повними рівноважними істинними діаграмами руйнування.

Методика визначення розподілу деформацій по висоті балки. Для цього використовували тензометричні засоби та механічні індикатори для оперативного визначення розподілу деформацій у часі за навантаження – метод ОЦКЗ [11, 12].

Реєструючи поле переміщень на поверхні балки, де НДС максимальний, за спеціальною комп'ютерною програмою розраховували розподіл деформацій:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \quad (4)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$e = \sqrt{\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2}.$$

Камерою послідовно реєстрували декілька цифрових зображень поверхні (без і після навантаження), які за допомогою ПК і спеціалізованої програми автоматично розбивали на однакову кількість фрагментів, що відтворюють у певному масштабі відповідні елементарні площадки поверхні балки. Відносні переміщення фрагментів першого і наступного зображень визначали за алгоритмом ОЦКЗ [13]. Для цього передбачали цифрову камеру з механізмом позиціонування і світлодіодним освітлювачем досліджуваної ділянки, а також ПК зі спеціалізованою програмою. Встановлення розподілу деформацій охоплює калібрування оптичної системи для виправлення геометричних спотворень об'єктива і визначення коефіцієнтів для їх корегування. На зображеннях встановлювали межі визначення поля деформацій, після чого програма автоматично ділила зареєстровану деформовану ділянку на фрагменти і розраховували відносні переміщення та локальні деформації за різного навантаження.

Визначення питомої енергії руйнування арматури за розтягу. Для цього використовували силову схему розтягу зразків з реєстрацією переміщень у двох напрямках у шийці оптико-цифровим корелятором спекл-зображень [14, 15]. За

результатами експерименту будували повну діаграму зусилля розтягу P –переміщення Δ , яку трансформували в істинну діаграму руйнування $S_i \sim e$. Істинні напруження визначали за повною діаграмою $S_i = P_i/F_i$, де F_i – площа, знайдена в локальному об’ємі за розтягу зразка із арматури з урахуванням звуження. Істинну деформацію e_i розраховували як відношення видовження Δ_i локального об’єму до розміру оптимальної бази $b = 0,5 \text{ mm}$, де НДС однорідний (рис. 1).

Питома енергія руйнування арматури W_A рівна площі S під діаграмою $S \sim e$:

$$W_A = \int_0^{e_C} S(e) de, \quad (6)$$

$$\text{де} \quad S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i_*} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i). \quad (7)$$

Тут i_* – значення, що відповідає початку руйнування.

Розрахунок питомої енергії W_{con}^C руйнування бетону за стиску. Обчислювали за методикою, яка передбачає вдавлювання циліндричного індентора $\varnothing 5 \text{ mm}$ у бетонний кубик $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ (рис. 2). Під час вдавлювання на комп’ютері через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) записували діаграму $P_{con}-\Delta$ зусилля P_{con} –переміщення Δ . Одночасно фіксували момент початку руйнування бетону за акустичними сигналами, які реєстрували давачем, встановленим на поверхні кубика. Роботу, витрачену на утворення нової поверхні в кубик площі $F = \pi \cdot d \cdot \Delta$, де d – діаметр індентора, визначали за формулою $A = \int_0^{\Delta} P_{con}^C d\Delta$. Питома енергію руйнування бетону розраховували так:

$$W_{con}^C = \frac{A_i}{F_i}. \quad (8)$$

На рис. 3 подано істинну діаграму руйнування бетону В25 за стиску під час вдавлювання індентора в кубик, площа під якою дорівнюватиме питомій енергії руйнування W_{con}^C (див. таблицю):

$$W_{con}^C = \int_0^{e_{con}^C} S(e) \cdot e_{con}^C. \quad (9)$$

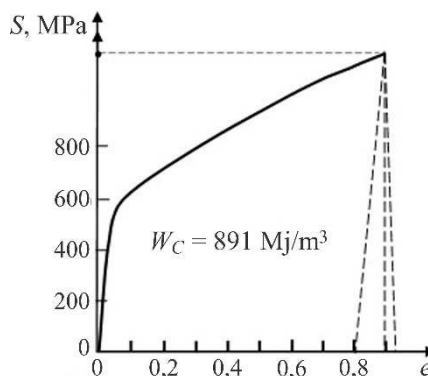


Рис. 1. Істинна діаграма руйнування арматури А500 ($e = \Delta_i / 0,5$).

Fig. 1. True fracture diagram of reinforcement A500 ($e = \Delta_i / 0.5$).

Марка бетону	Діаметр індентора	Переміщення Δ	Питома енергія руйнування бетону, Мґ/м ³
	mm		
B25	5	2,2	391
B30	5	3,0	442
B35	5	3,2	528

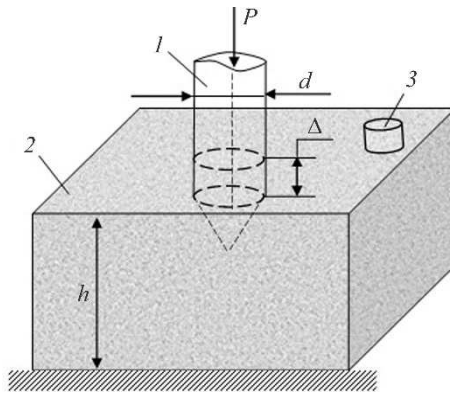


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Схема визначення енергії руйнування бетону за стиску:
1 – індентор; 2 – бетонний кубик; 3 – акустичний давач.

Fig. 2. Scheme for determining the fracture energy of concrete under compression:
1 – indenter; 2 – concrete cube; 3 – acoustic transducer.

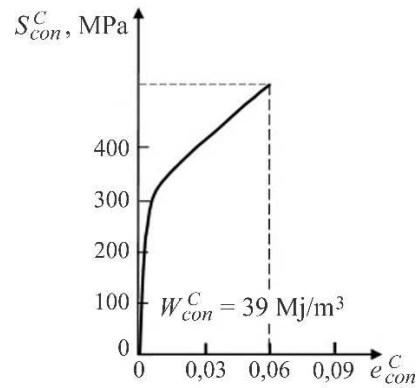


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Істинна діаграма руйнування бетону B25 за стиску.

Fig. 3. True diagram of B25 concrete fracture under compression.

Оцінювання питомої енергії руйнування бетону за розтягу. Для цього використовували балковий зразок (рис. 4), а також методику визначення питомої енергії деформування і руйнування бетону, яку реалізували за схемою триточкового згину зразка (рис. 4) з концентратором напружень у жорсткому сталевому кільці (рис. 5).

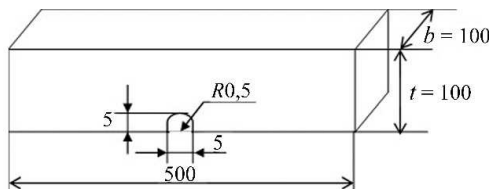


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Балковий зразок для випробувань бетону на розтяг.

Fig. 4. Beam specimen for tensile testing of concrete.

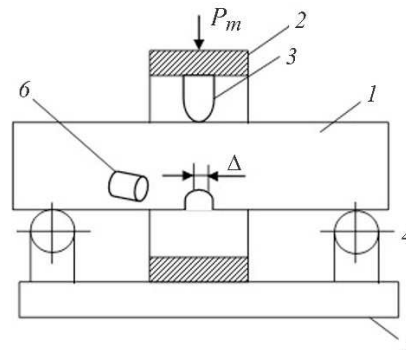


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Силовa схема навантаження бетонного балкового зразка в жорсткому сталевому кільці:
1 – кільце; 2 – пуансон; 3 – зразок; 4 – опори; 5 – плита; 6 – оптико-цифровий корелятор.

Fig. 5. Force diagram of a concrete beam sample loading in a rigid steel ring:
2 – punch; 3 – sample; 4 – supports; 5 – plate; 6 – optical digital correlator.

Навантажували зразок, стискаючи кільце, жорсткість якого на порядок більша, ніж зразка, з допомогою гідравлічної машини EU-40. За цією схемою зусилля навантаження машини P_m передається на кільце, а далі – на зразок через пуансон. Розміри кільця вибирали так, щоб його переміщення аж до руйнування зразка відбувалось у пружній зоні. Така схема забезпечує плавне деформування зразка і попереджає спонтанне. Для встановлення зусилля, яке передається на зразок,

кільце тарували і записували діаграму зусилля стиску кільця P_r –переміщення Δ_r . Зусилля P_{con}^C , яке сприйме зразок, визначали як різницю між зусиллям випробувальної машини P_m і зусиллям P_r :

$$P_{con}^S = P_m - P_r. \quad (10)$$

Перед навантаженням зразка на випробувальну установку встановлювали цифрову камеру, щоб реєструвати переміщення і визначати деформації біля вершини концентратора зразка на базі 1 mm. Зусилля навантаження через АЦП реєстрували на ПК, а камерою – переміщення Δ_r . У результаті отримали діаграму $P_{con}^S - \Delta^S$. Напруження розтягу S_{con}^S за схемою триточкового згину залежно від зусилля P_{con} , а також деформацію біля вершини концентратора на базі 1 mm розраховували з допомогою метода ОЦКЗ і будували діаграму напруження S_{con}^S –деформація e_{con}^S . Навантажували зразок до появи тріщини (рис. 6). Питому енергію руйнування бетону за розтягу

$$W = \int_0^{e_{con}^S} S_{con}^S \cdot e_{con}^S. \quad (11)$$

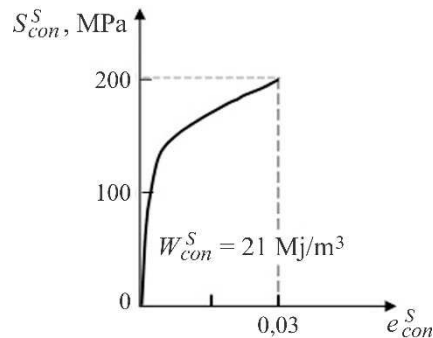
Таким чином, просумувавши всі компоненти за розтягу бетону W_{con}^S та арматури W_A , а також за стиску W_{con}^C , визначили питому енергію руйнування балки:

$$W_C(S, e) = W_{con}^S + W_A + W_{con}^C. \quad (12)$$

За результатами розрахунку всіх складників балки аналогічної конструкції під навантаженням зусиллям P_r , яке є менше за критичне і відповідає експлуатаційному, можна знайти питому енергію деформування $W(S, e)$ та встановити енергетичну пошкодженість $\omega = (W(S, e))/(W_{\downarrow}C(S, e_{\downarrow con}^{\uparrow s}))$, а отже, оцінити безпечний термін експлуатації.

Рис. 6. Діаграма руйнування бетону за згину.

Fig. 6. Diagram of concrete fracture during bending.



Результати досліджень за розробленою методикою. Випробовували на згин залізобетонну балку, в нижній частині якої розташована арматура $\varnothing 8 \text{ mm}$. Припорні ділянки балки армовані арматурою $\varnothing 8 \text{ mm}$ (рис. 7).

Оптико-цифровим корелятором спекл-зображень (рис. 8, точки) та методом скінченних елементів (МСЕ) (лінії на рис. 8) розраховали розподіл деформацій по висоті балки. Схему розбиття скінченно-елементної моделі подано на рис. 9. Прогин середини балки f залежно від зусилля навантаження P – на рис. 10.

За питомою енергією руйнування компонент W_C , а також енергією пружно-пластичного деформування балки W за прикладеного навантаження встановили розмір енергетичного пошкодження ω .

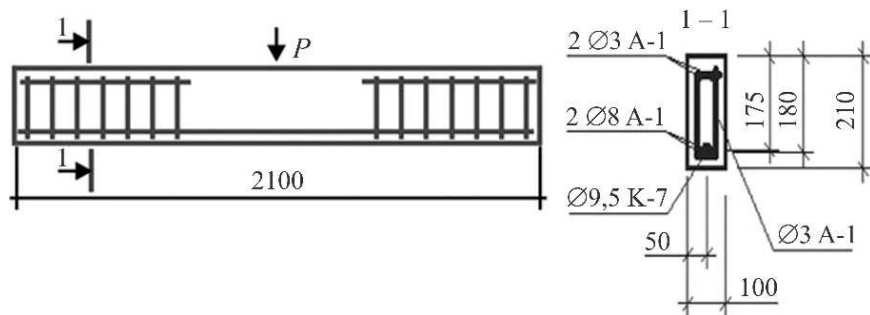


Рис. 7. Конструкція дослідного зразка.

Fig. 7. Construction of the experimental sample.

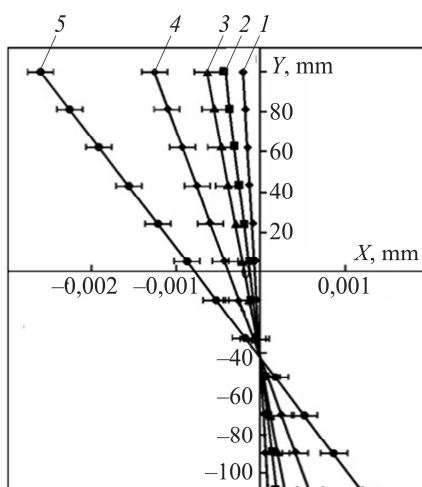


Рис. 8. Fig. 8.

Рис. 8. Розподіл деформацій по висоті балки (точки – експеримент, лінія – МСЕ):
1 – 400 kg; 2 – 800; 3 – 1200; 4 – 2400; 5 – 5000 kg.

Fig. 8. Distribution of deformations along the height of the beam: (points – experiment, line – FEM):
1 – 400 kg; 2 – 800; 3 – 1200; 4 – 2400; 5 – 5000 kg.

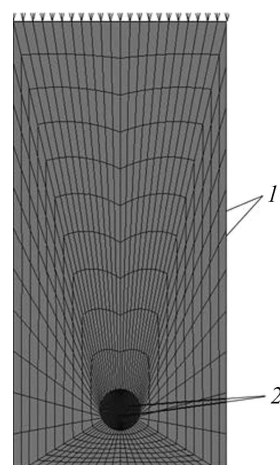


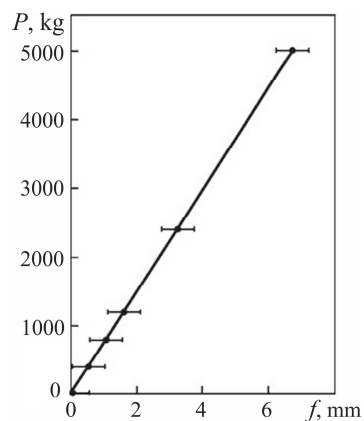
Рис. 9. Fig. 9.

Рис. 9. Поперечний переріз скінченно-елементної моделі бетонної балки (1)
із вмонтованою арматурою (2).

Fig. 9. Cross-section of the finite-element model of the concrete beam (1)
with built-in reinforcement (2).

Рис. 10. Прогин центральної частини
балки залежно від навантаження:
пряма – розрахунок методом МСЕ,
точки – експеримент.

Fig. 10. Deflection of the central part of
the beam depending on the load: straight
line – calculation by FEM method,
points – experiment.



ВИСНОВКИ

Сформульовано енергетичний критерій оцінювання напружено-деформованого стану за згину залізобетонної балки. Розроблено методику визначення енергії деформування та руйнування бетону за стиску і розтягу, а також арматури за розтягу за деформаціями та напруженнями в локальних об'ємах. Результати розрахунку напружено-деформованого стану методом скінченних елементів за згину залізобетонної балки узгоджуються з отриманим запропонованим підходом. За відношенням енергії пружно-пластичного деформування залізобетонної балки $W(P, \epsilon)$ до питомої енергії руйнування W_C встановлено ступінь енергетичного пошкодження та оцінено залишковий ресурс роботи.

1. Gugin G. A. and Wiggs S. K. Bishop USA Patent № 6240783B1, МПКG01M7/00 (2006.01) G01H 900 (2006.01), Bridge monitoring system date of patent 05.06.2001. – 17p.
2. Savino T. USA Patent № 4843372, МПКG08B 21/00(2006.01). Bridge sway deflection detection system date of patent 27.06.1989. – 4 p.
3. Tomiolo M. C. USA Patent №4, 889,997, МПКG0B 11/14 (2006.01). Process and device for measuring and processing the displacement between two on more points in structures, buldinas, maschinery or the like date of patent 26.12.1989. – 5 p.
4. Pan B., Tian L., Song X. Real-time, non-contact and targetless measurement of vertical deflection of bridges using off-axis digital image correlation // NDT&E Int. – 2016. – **79**. – P. 73–80.
5. Bridge displacement monitoring method based on laser projection-sensing technology / Xuefeng Zhao, Hao Liu, Yan Yu, Xiaodong Xu, Weitong Hu, Mingchu Li, and Jingping Ou // Sensors. – 2015. – **15**, № 4. – P. 8444–8846. <https://doi.org/10.3390/s150408444>
6. Mathematical modelling of stress-strain state of steel-concrete beams with combined reinforcement / I. Selejdak, T. Bobalo, Y. Blikharsky, and I. Dankevych // Production Eng. Archives. – 2023. – **I. 29**, № 1. – P. 108–115. <https://doi.org/10.30657/pea.2023.29.13>.
7. Bearing capacity of reinforced concrete beams with and without damages of rebar / R. Khmil, Z. Blikharsky, P. Vegera, and N. Kopyika // Production Eng. Archives. – 2023. – **I. 29**, № 3. – P. 298–303. <https://doi.org/10.30657/pea.2023.29.34>.
8. Diagnostics and Evaluation of Two Atypical Girder Bridges on Railway Line / P. Kotes, P. Kotula, J. Odrobinak, and J. Prokop // Key Eng. Mat. – 2023. – **930**. – P. 211–216. <https://doi.org/10.4028/p-i41x0>.
9. Vavrus M. and Kotes P. Methods of modeling contact between concrete and fiber concrete // Solid State Phenomena. – 2022. – **329**. – P. 87–92. <https://doi.org/10.4028/p-Itqjdh>.
10. Multilaser spot tracking technology for bridge structure displacement measuring / O. P. Maksymenko, O. M. Sakharuk, Ya. L. Ivanytskyi, and P. S. Kun // Structural Control Health Monitoring. – 2020. – Article number: e2675. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0144-9>
11. Патент України UA №26395G01B11/16. Спосіб визначення напружень в матеріалі біля вершини тріщини / Я. Л. Іваницький, Р. Б. Костів, Ю. В. Мольков. – Бюл. № 15; Опубл. 25.09.2007.
12. The choice of spacing in measuring displacements for the evaluation of strains by the method of optical-digital image correlation / Ya. L. Ivanyts'kyi, P. S. Kun', T. M. Lenkovs'kyi, Yu. V. Mol'kov, and S. T. Shtayura // Materials Science. – 2018. – **53**, № 6. – P. 849–854. DOI:10.1007/s11003-018-0144-9
13. Максименко О., Франкевич Л., Сахарук О. Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів // Електроніка та інформ. технології. – 2013. – Вип. 3. – С. 156–168.
14. Determination of the local strains near stress concentrators by the digital image correlation technique / Ya. L. Ivanyts'kyi, Yu. V. Mol'kov, P. S. Kun', T. M. Lenkovs'kyiy, and M. Wójtowicz // Materials Science. – 2015. – **50**, № 4. – P. 488–495. DOI:10.1007/s11003-015-9746-7
15. Panasyk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P. Analysis of the elastoplastic deformation of the material of the process zone // Materials Science. – 2004. – **40**, № 5. – P. 67–72.

Одержано 08.06.2023