

УДК 539.385.620

## ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТОВИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ

О. В. ПАНЧЕНКО<sup>1</sup>, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ<sup>2</sup>, П. С. КУНЬ<sup>3</sup>,  
ЖУРАВСЬКИЙ О. Д.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ТзОВ "Сіка Україна", Київ;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>3</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>4</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури

Сформульовано методику визначення ресурсу підсиленої композитною стрічкою залізобетонної балки на основі енергетичного підходу. Розроблено технічні засоби вимірювання переміщень по висоті балки з використанням методу цифрової кореляції зображень. Запропоновано алгоритм обробки зображень для визначення локальних деформацій. Виконано експериментальні дослідження за циклічного навантаження підсиленої залізобетонної балки та встановлено кількість циклів до руйнування.

**Ключові слова:** підсилена залізобетонна балка, напружено-деформований стан, енергія пружно-пластичного деформування, цифрова кореляція зображень.

Через тривалу експлуатацію мостових конструкцій за циклічного навантаження в їхніх елементах поступово нагромаджуються пошкодження. Для забезпечення надійної роботи та продовження терміну експлуатації мостів залізобетонні балки підсилюють наклеюванням на їхню нижню поверхню композитних стрічок, армованих вуглецевими волокнами [1, 2]. Тоді потрібно визначити напружено-деформований стан (НДС) та обґрунтувати безпечний термін експлуатації.

Для розрахунку НДС та прогинів підсилених залізобетонних балок використовують такий же підхід, як і для непідсилених, який передбачає розрахунок міцності нормальних перерізів за розрахунковим опором руйнування бетону і арматури [1].

Виникнення втомних тріщин у розтягнутій зоні бетону залізобетонної балки призводить до зміни положення нейтральної лінії. У зв'язку з цим важко визначити НДС на основі методу плоских перерізів. У цьому випадку для оцінки втомної міцності таких балок запропоновано підхід, який враховує зміну НДС у всіх компонентах підсиленої залізобетонної балки.

Нагромадження пошкоджень у бетоні, арматурі та композитній стрічці впливає на опірність деформуванню і руйнуванню, а також змінює її загальний ресурс.

**Визначення напружено-деформованого стану.** Оцінювання залишкового ресурсу залізобетонних балок полягає у визначенні вузла, де відбувається найінтенсивніше нагромадження пошкоджень, що спричинює утворення тріщин та втрату несучої здатності. Тому важливо регулярно визначати такі місця на основі моніторингу деформаційного стану та виконувати відповідні відновлювально-ремонтні роботи. За появи тріщин у балці відновлення її несучої здатності здійснюють шляхом наклеювання композитної стрічки [1, 2]. На основі експериментальних досліджень і рекомендацій [2] запропоновано проектувати залізобетонні балки, підсилені композитною стрічкою. Водночас відсутній підхід для оцінювання

їх роботи та розрахунок кількості циклів до руйнування підсилених залізобетонних балок. Щоб спрогнозувати їхню довговічність, необхідно сформулювати модель руйнування з врахуванням нагромадження пошкоджень за циклічного навантаження.

Стверджуємо, що несучу здатність підсилена балка втратить тоді, коли в розтягнутій арматурі буде досягнуто границі текучості [1] матеріалу з одночасним руйнуванням композитної стрічки і стиснутої зони бетону.

Для оцінювання пошкоджень у залізобетонній балці за циклічного деформування вводять гіпотезу, яка базується на енергетичному підході і передбачає встановлення міри пошкодження в найнавантаженішому місці, тобто залізобетонна балка, підсилена стрічкою, зруйнується тоді, коли енергія пружно-пластичного деформування досягне енергії руйнування композитної стрічки. Це підтверджено експериментальними результатами випробувань підсилених балок, а також тим, що композитна стрічка піддана найбільшим прогинам і деформаціям, згідно з теорією нормальних перерізів [2].

Початкові локальні енергетичні запаси матеріалу стрічки визначають питомою енергією руйнування за статичного навантаження  $W_c$  з істинної діаграми деформування  $\sigma(\epsilon)$

$$W_c = \int_0^{\epsilon_c} \sigma(\epsilon) d\epsilon. \quad (1)$$

Тут  $\epsilon_c$  – критичне значення деформації.

Енергетичні втрати елементарного об'єму матеріалу впродовж певної експлуатації, що вимірюється кількістю циклів навантаження  $n$  ( $1 \leq n \leq N$ ), можна визначити виразом

$$W_s(\epsilon_{\max}, \sigma_{\max}) + W_f(\Delta\epsilon, \Delta\sigma, m_f, n), \quad (2)$$

де  $W_s(\epsilon_{\max}, \sigma_{\max})$  – статичний складник енергетичних втрат;  $\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$ ,  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  – відповідні розмахи деформації і напруження на першому циклі навантаження;  $\epsilon_{\min}$ ,  $\epsilon_{\max}$  – мінімальне і максимальне значення деформації;  $\sigma_{\min} = \sigma(\epsilon_{\min})$ ;  $\sigma_{\max} = \sigma(\epsilon_{\max})$

$$W_s(\epsilon_{\max}, \sigma_{\max}) = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon; \quad (3)$$

$W_f(\Delta\epsilon, \Delta\sigma, m_f, n)$  – циклічний складник енергетичних втрат за  $n$  циклів навантаження:

$$W_f(\Delta\epsilon, \Delta\sigma, m_f, n) = \sum_{i=1}^n w_i(\Delta\epsilon, \Delta\sigma, m_f) = w_1(\Delta\epsilon, \Delta\sigma) \cdot \sum_{i=1}^n m_f(i), \quad (4)$$

$w_i = m_f(i) \cdot (1 - R) \cdot \int_{\epsilon_{\min}}^{\epsilon_{\max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon = m_f(i) \cdot w_1(\Delta\epsilon, \Delta\sigma)$  – енергетичні втрати на  $i$ -му

циклі навантаження за асиметрії  $R$ ;  $m_f(i)$  – показник циклічного зміцнення-знеміцнення, який вказує на циклову зміну розміру початкової петлі гістерезису  $W_1(\Delta\epsilon, \Delta\sigma)$ , при цьому  $m_f(1) = 1$ .

Сумарні відносні енергетичні втрати впродовж  $n$  циклів навантаження визначаємо параметром  $\lambda(n)$ :

$$\lambda(n) = \frac{W_s(\epsilon_{\max}, \sigma_{\max}) + W_f(\Delta\epsilon, \Delta\sigma, m_f, n)}{W_c}. \quad (5)$$

Критеріальне рівняння руйнування у прийнятих позначеннях запишемо так:

$$\lambda(N) = 1,$$

або в розгорнутій формі

$$\frac{W_s(\epsilon_{\max}, \sigma_{\max}) + W_f(\Delta\epsilon, \Delta\sigma, m_f, N)}{W_c} = 1. \quad (6)$$

Щоб визначити вказані характеристики, виконали експериментальне дослідження за відповідною методикою.

Енергію руйнування композитної стрічки визначали за розтягу плоского зразка шириною 120 mm і товщиною 1,2 mm із діаграми, а арматури – за розтягу стандартного зразка  $\varnothing$  10 mm на основі побудованої істинної діаграми “напруження–деформація”.

Для бетону енергію руйнування визначали шляхом випробування кубових зразків 100×100×100 mm на стиск із записом повної діаграми деформування на спеціальному пристрої [3]. При цьому значення деформацій реєстрували на боковій поверхні зразка методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [4].

За отриманими результатами випробувань встановлювали характеристики міцності композитної стрічки  $\sigma_f, \epsilon_f$  за статичного навантаження. На основі цього отримували трансцендентне рівняння, яке розв’язували числовим методом і встановлювали кількість циклів навантаження до руйнування залізобетонної балки з наклеєною композитною стрічкою

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f^2}{E} (2N)^{2b}, \quad (7)$$

де  $\sigma_{\max}$  – максимальне напруження циклу;  $b$  – коефіцієнт, який визначають з експерименту.

**Визначення довговічності залізобетонної балки, підсиленої композитною стрічкою.** Досліджували за циклічного навантаження-деформування залізобетонної балки, підсиленої стрічкою CFRP (рис. 1), за такою схемою. Довжину та схему анкерування стрічки у місцях наклеювання встановлювали за раніше розробленою методикою [6], навантажували балку статичним зусиллям рівнями і реєстрували з допомогою ЦКЗ поле переміщень на боковій поверхні. Це дало можливість визначити деформацію стрічки, бетону і арматури, які розташовані на різній висоті балки. Після цього встановлювали розподіл деформацій у кожній складовій підсиленої балки:

$$\epsilon_{xx_i} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right)^2 \right], \quad \epsilon_{yy_i} = \frac{\partial v_i}{\partial y_i} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial y_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_i}{\partial y_i} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Розподіл деформацій, отриманий ЦКЗ, порівнювали із результатами розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ). Тіло балки зі стрічкою і арматурою розбивали на 70000 паралелепіпедних восьмивузлових елементів для навантажень  $P_1 = 4$  kN,  $P_2 = 8$  kN,  $P_3 = 12$  kN,  $P_4 = 24$  kN.

Під час навантаження вимірювали прогин балки в центрі за лінією дії сили. Порівняння результатів, отриманих методом ЦКЗ і МСЕ для деформацій і прогинів, показують добру збіжність за двома підходами, що є підставою для визна-

чення істинних деформацій за згину балки у найнавантаженишому місці. За значеннями деформацій із істинних діаграм деформування складових балки встановили напруження. За результатами статичних досліджень і формулою (2) визначили енергію руйнування залізобетонної підсиленої балки. Досліджували втмну міцність залізобетонної балки з наклеєною композитною стрічкою за силовою схемою триточкового згину при асиметричному циклі навантаження на універсальній гідравлічній машині EUS-20. Під час циклічного навантаження реєстрували максимальне  $P_{\max}$  і мінімальне  $P_{\min}$  зусилля циклу, а з допомогою ЦКЗ встановлювали відповідно переміщення і прогин балки. Експериментальні дослідження здійснювали за асиметрії циклу навантаження  $R = P_{\min} / P_{\max} = 0,3$ . За переміщеннями визначали розмах деформацій у композитній стрічці  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ , а напруження – із діаграм руйнування стрічки за встановленою деформацією.

Випробовували за різних розмахів деформацій  $\Delta\varepsilon$  та встановлювали кількість циклів до руйнування  $N$ .

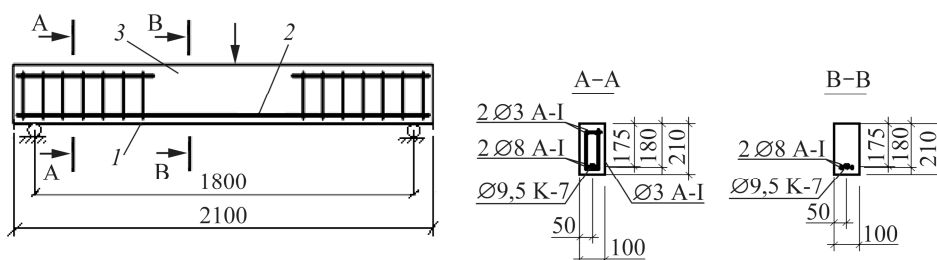


Рис. 1. Конструкція дослідних зразків: 1 – композитна стрічка, 2 – арматура, 3 – стиснута зона бетону.

Fig. 1. Design of test specimens: 1 – composite reinforced band, 2 – steel reinforcement, 3 – compressed zone of concrete.

Для залізобетонної балки, підсиленої композитною стрічкою GFRP розмірами  $100 \times 210 \times 2100$  mm, побудовано графічну залежність пошкодження  $\lambda$  від кількості циклів навантаження (рис. 2). Механічні характеристики стрічки такі:  $\sigma_f = 2400$  MPa,  $\varepsilon_f = 0,045$ ,  $b = 0,06$ .

Результати встановлення довговічності підсиленої балки, обчислені за формулою (лінія) та експериментальні (точки), наведені на рис. 3.

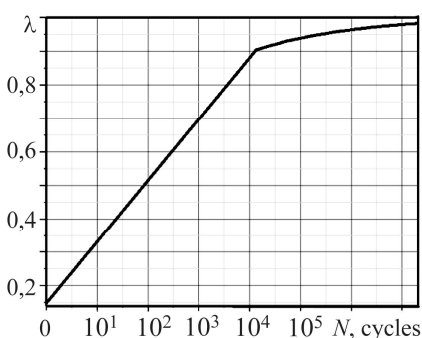


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Нагромадження пошкодження в бетонній балці.

Fig. 2. Accumulation of damages in a concrete beam.

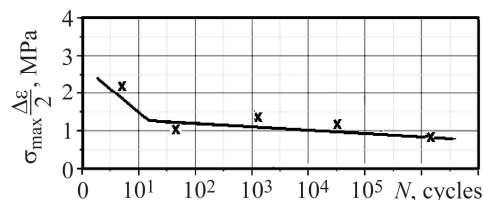


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залежність енергії руйнування від кількості циклів навантаження.

Fig. 3. Dependence of strain energy on the number of loading cycles.

В результаті підсилення композитною стрічкою довговічність балки зростає приблизно на 30...40%.

Запропонований підхід можна використовувати для оцінювання довговічності та оптимального підсилення залізобетонних балок композитними стрічками. Такі підсилення широко використовують під час ремонту мостових конструкцій для продовження безпечного терміну їх експлуатації.

### ВИСНОВКИ

Розроблено методику розрахунку довговічності залізобетонних балок, підсилених композитними стрічками, та встановлено, що їхня довговічність підвищується на 30...40% порівняно з непідсиленими.

*РЕЗЮМЕ.* Сформульована методика определения ресурса подкрепленной композитной полосой железобетонной балки на основании энергетического подхода. Разработаны технические средства измерения перемещений по высоте балки с использованием метода цифровой корреляции изображений. Предложен алгоритм обработки изображений для определения локальных деформаций. Проведены экспериментальные исследования при циклической нагрузке подкрепленной железобетонной балки и определено количество циклов до разрушения.

*SUMMARY.* A technique for life-time evaluation of reinforced concrete beam additionally reinforced with a composite band is formulated. Technical means for displacement measurement along the beams height by digital image correlation technique is developed. An algorithm of image processing for local strain determination is created. Experimental investigations of reinforced concrete beam under cyclic loading are performed and the number of cycles before the beam fracture are established.

1. *Кваша В. Г.* Обстеження та випробування автодорожніх мостів. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2002. – 102 с.
2. *Кваша В. Т., Панченко О. В.* Сучасні технології ремонту і підсилення мостів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2002. – Вип. 65. – С. 45–50.
3. *Солодкий С. Й.* Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементях. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2008. – 144 с.
4. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 5. – С. 67–72.  
(*Panasjuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the elastoplastic deformation of the material in the process zone // *Materials Science*. – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–655.)
5. *Мольков Ю. В.* Застосування методу цифрової кореляції до побудови діаграм деформування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 6. – С. 136–140.  
(*Mol'kov Yu. V.* Application of the method of digital image correlation to the construction of stress-strain diagrams // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 6. – P. 832–837.)
6. *Панченко О. В.* Методика оцінювання напружено-деформованого стану у підсилених залізобетонних конструкціях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 2. – С. 116–120.  
(*Panchenko O. V.* A procedure for the estimation of the stress-strain state in reinforced ferroconcrete structures // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 2. – P. 264–269.)

Одержано 16.08.2017