

УДК 539.385.620

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ЗАКРІПЛЕННЯ І ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ НАКЛЕЮВАННЯ ТА АНКЕРУВАННЯ КОМПОЗИТНОЇ СТРІЧКИ НА БЕТОН

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА НАКЛЕИВАНИЯ И АНКЕРОВКИ КОМПОЗИТНОЙ ЛЕНТЫ НА БЕТОН

EVALUATION OF DETERMINATION OF CONSTRAINTS AND THE REASONING OF THE METHOD OF SETTLEMENT AND SUBMISSION OF THE COMPOSITE TAPE ON CONCRETE

Панченко О.В. (ТзОВ «Сіка Україна», м. Київ), **Журавський О.Д., к.т.н., доц.** (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ)

Панченко А.В. (ООО «Сика Украина», г. Киев), **Журавский А.Д., к.т.н., доц.** (Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев)

Panchenko O.V. (Sika Ukraine LLC, Kyiv) **Zhuravskiy O.D., Ph.D, associate professor** (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv)

У статті наведено результати експериментальних досліджень міцності закріплення композиційної стрічки на бетон при статичних та циклічних розтягуючих навантаженнях.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований прочности закрепления композиционной ленты на бетон при статических и циклических растягивающих нагрузках.

The article presents the results of experimental studies of the strength of composite tape fastening on concrete under static and cyclic stretching loads.

Ключові слова:

Копозиційна стрічка, підсилена залізобетонна балка, напруження, деформації, метод цифрової кореляції зображень.

Копозитная лента, усиленная железобетонная балка, напряжения, деформации, метод цифровой корреляции изображений.

Composite tape, reinforced concrete beam, stress, strain, method of digital image correlation.

При використанні в якості підсилення залізобетонних балок композитними стрічками коли важливо правильно визначити спосіб та обґрунтувати розміри приклеювання і анкетування кінців в при опорній зоні. Дослідження у цьому напрямку в основному присвячені технологічним аспектам наклеювання стрічок. Разом з тим важливим є розрахунок і визначення напружено-деформованого стану у клеєному з'єднанні для оптимізації та забезпечення рівномірності з'єднання при експлуатаційних умовах.

Необхідно також врахувати, що підсилена залізобетонна балка працює на дію циклічних навантажень і тому для оцінювання довговічності слід передбачити методи визначення характеристик втомної міцності.

Відомо, що напружено-деформований стан у балках з наклеєною композитною стрічкою визначають тензометричним методом [2], а для вимірювання змішень стрічки відносно бетону використовують механічні індикатори годинникового типу. Слід зауважити, що ця методика є трудомістка, а точність отриманих результатів залежить від якості наклеювання тензорезисторів та встановлення індикаторів. За допомогою тензорезисторів можна визначити деформацію до 0,5%, лише в області де наклеєно тензорезистор і не можливо контролювати поверхню, яка деформується під зовнішнім навантаженням, що знижує інформативність. Зокрема в місцях непроєктованого деформація стрічки буде неоднорідною, що вплине на несучу здатність в цілому з'єднання.

Для вимірювання переміщень і визначення деформацій в роботі використано метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [3]. Суть методу ЦКЗ полягає в обробці низки цифрових зображень відповідно підготовленої поверхні деформованого тіла, які зареєстровані під час його навантаження, для відслідковування переміщень множини точок цієї поверхні у контрольованому елементі і подальшого розрахунку деформацій. Метод високоінформативний, оскільки дає змогу отримати поле переміщень і деформацій на усій контрольованій поверхні зразка, а відтак і визначити розподіл напружень у контрольованому елементі з урахуванням конструктивних концентраторів. Зокрема при навантаженні елемента встановлюють величину деформацій, а з діаграми розтягу для даного матеріалу визначають величину напружень. Ця процедура є близькою по суті до визначення напружено-деформованого стану з використанням методу скінченних елементів. Підтвердженням цьому є те, що згідно методу ЦКЗ вимірювання переміщень можна реалізувати на базах, які є співмірні до розміру скінченного елемента. Метод ЦКЗ є безконтактним і не вимагає спеціальної підготовки зразків.

Зразки та обладнання для досліджень. Для дослідження напружено-деформованого стану та встановлення оптимальних параметрів приклеювання композитної стрічки CFRP до залізобетонного блоку виготовляли спеціальні зразки, які імітували роботу мостової балки в

умовах експлуатації (рис. 1). До залізобетонного блоку 1, армованого арматурою 2, що має форму призми з розмірами $120 \times 500 \times 1200$ мм ($t \times B \times H$, де t - товщина; B - ширина; H - висота) на площину 120×1200 мм приклеювали клеєм 3Sika dur-30. Один кінець композитної стрічки CFRP 4 шириною 120 мм і довжиною 2000 мм приклеювали до блоку на довжині l , а на вільний кінець з двох сторін наклеювали дюралюмінієві пластини 5 товщиною 2 мм для надійного закріплення у захоплювачі випробувальної установки. Для статичних випробувань та з метою встановлення способу закріплення та визначення оптимальних геометричних розмірів приклеювання виготовляли зразки типу П де приклеювання здійснювали на площині 120×1200 мм, які використовували лише для статичних випробувань. Також виготовляли зразки типу ПП, які додатково окрім приклеювання по площині, анкерували полотном Wгар 6 по бокових поверхнях довжиною l на висоту h . Три зразки серії П випробували при статичних навантаженнях, а три зразки серії ПП - при циклічних навантаженнях. При статичних випробуваннях визначали розподіл переміщень, деформацій та напружень в зоні приклеювання стрічки. При циклічних випробуваннях визначали характеристики втомної міцності композитної стрічки, зокрема будували зміну розмаху деформацій від кількості циклів навантаження, аналог залежності Кофіна-Менсона.

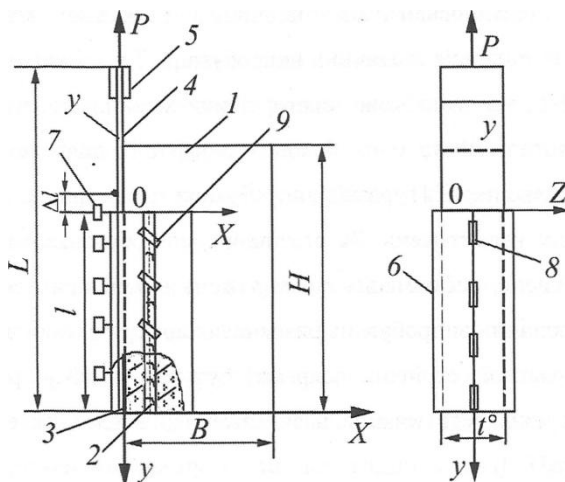


Рис. 1. Ескіз зразка з наклеєною композитною стрічкою і полотном:
 1 - залізобетонний блок; 2 - арматура; 3 - шар клею; 4 - композитна стрічка; 5 - пластина; 6 - полотно Wгар; 7 - пластини-маркери; 8,9 - тензорезистори

Щоб реєструвати зміщення і визначати деформації композитної стрічки 4 та залізобетонного блоку 1 наклеювали на стрічку пластини-маркери 7 з

кроком 100 мм, а також тензорезистори 8 і 9, які були наклеєні на стрічку і бокову поверхню блоку, відповідно. Наклеєні пластини-маркери використовували для вимірювання взаємних зміщень методом ЦКЗ, а тензорезистори - для встановлення поверхневої деформації та порівняння даних досліджень отриманих за різних підходів. Обробивши зареєстровані зображення бокової поверхні методом ЦКЗ, визначали взаємне зміщення композитної стрічки і блоку Δl , деформації у клейовому шарі ε_y^k і стрічці ε_y^c , а також у залізобетонному блоці ε_x в напрямку осі X у перерізі, де деформації ε_y^k досягають максимального значення. Для цього на контрольованій поверхні зразка створювали точковий малюнок шляхом нанесення аерозольної фарби відповідно до вимог для методу ЦКЗ. Ступінь деформацій у всіх випадках визначали як відношення взаємного переміщення Δl до бази вимірювання в ($\varepsilon_i = \Delta l / b$, де $b = 0,5$ мм).

Підготовлений зразок встановлювали на випробувальну установку ЦДМПу-200, яка створює статичне та циклічне навантаження зразка (рис. 2). Нижню частину зразка (призми) жорстко закріплювали до нижньої траверси установки. Вільний кінець із дюралюмінієвими пластинами 5 фіксують у верхньому захваті, таким чином, щоб вісь композитної стрічки співпадала з віссю установки. Осьове зусилля розтягу P прикладали до композитної стрічки.



Рис. 2. Загальний вигляд зразка на установці ЦДМПу-200 із закріпленою на спеціальному кронштейні фотокамерою Olympus E300.

Під час ступеневого навантаження за допомогою цифрової камери Olympus E300 реєстрували зображення залізобетонного блоку, тобто сторону ($B \times H$) та пластинок-маркерів, а камерою Canon - поверхню композитної стрічки ($t \times H$). За допомогою тензорезисторів 8 визначали деформацію композитної стрічки ($t \times H$).

Композитну стрічку (зразок П) розтягували на гідравлічній розривній машині ЦДМПу-200 статичним навантаженням ступенями зі швидкістю переміщення рухомої траверси 2 мм/хв. Значення навантаження реєстрували динамометром на кожній ступені і до відриву або розриву стрічки. Сигнали від динамометра записували в персональний комп'ютер (ПК) через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з відповідним програмним забезпеченням.

На кожному ступені навантаження реєстрували зображення поверхні залізобетонного блоку і пластинок-маркерів фотокамерами, причому перший кадр відповідав ненавантаженому зразку. Зареєстровані зображення з роздільною здатністю 8 МР використовували для обчислення методом ЦКЗ величини деформації у композитній стрічці ε_y^c , у клейовому шарі ε_y^k , залізобетонному блоці ε_x у перерізі максимальних деформацій $\varepsilon_{y,max}^k$, а також взаємного зміщення (зсуву) композитної стрічки відносно блоку Δl .

Паралельно з реєстрацією зображень камерами на кожній ступені навантаження визначали деформації наклеєними тензорезисторами, які через АЦП записували у ПК.

Випробування зразків типу П-ПП, тобто зразків з додатковим армуванням, виконували при багатоцикловій зміні навантажень (при синусоїдальному циклі навантаження).

Таблиця 1

Результати випробувань композитної стрічки при циклічному розтягу

Напруження, МПа	Деформація $\times 10^{-5}$		$N \times 10^6$ циклів
	ε_{min}	ε_{max}	
334,9	54,85	166,24	0,342
318,8	52,24	158,32	0,0706
287,0	46,96	142,32	0,291
255,2	41,75	126,53	1,201
223,3	36,50	110,61	4,949

Навантаження здійснювали за асиметричною амплітудою циклу, коли зусилля, деформація і напруження розтягу змінюються від мінімальних (P_{min} , σ_{min} , ε_{min}) до максимальних (P_{max} , σ_{max} , ε_{max}) значень. Між амплітудою зусилля P напружень, σ_a і деформації ε_a , середніми значеннями циклу $\sigma_{сep}$, $\varepsilon_{сep}$ справедливі наступні співвідношення

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \varepsilon_a = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{сеп}} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad \varepsilon_{\text{сеп}} = \frac{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}}{2}$$

Ступінь асиметрії циклу характеризується коефіцієнтом асиметрії циклу

$$\rho = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}} \quad (2)$$

Випробування виконували при циклічних навантаженнях зразка з асиметрією циклу навантаження $\rho=0,33$.

В процесі досліджень з допомогою ЦКЗ реєстрували максимальні ε_{\max} і мінімальні ε_{\min} деформації до моменту руйнування та встановлювали кількість циклів. Дослідження виконували за однакових величин $\Delta\varepsilon$ при однаковому коефіцієнті асиметрії циклу. За результатами випробувань (табл. 1) отримано графік зміни деформацій або розмаху деформацій $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ від кількості циклів N до руйнування (рис. 3).

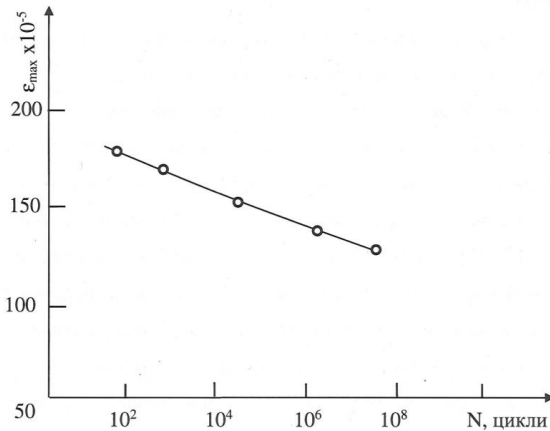


Рис. 3. Діаграма втомного руйнування композитної стрічки

Визначення деформацій в клесному з'єднанні «композит-бетон» при статичному навантаженні.

У результаті випробувань зразків статичним розтягуючим навантаженням отримано дані для аналізу та використання при проектуванні та підсиленні залізобетонних балок композитними стрічками. Зокрема випробування зразка серії П, де стрічка приклеєна до однієї площини на довжині $l=600$ мм, відбулось відривання стрічки з захищеним шаром бетону. При цьому величина деформацій у стрічці становила $\varepsilon_{\text{ср}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$. Таким чином можна стверджувати, що така схема

приклеювання композитної стрічки до бетонного блоку не забезпечує надійного з'єднання та не може використати повністю міцнісні і деформативні властивості самої стрічки.

Тому наступним етапом було проведено додаткове армування приклеєної стрічки до блоку шляхом обгортання місця приклеювання полотном $W_{\text{гфр}}$ з трьох сторін, тобто виготовлення зразків серії ПП. Випробування зразків серії ПП здійснювали за викладеною вище методикою. Цифрові зображення отримані під час випробувань зразків серії ПП, обробляли використовуючи відповідне програмне забезпечення для ЦКЗ [3]. Цей метод дає можливість отримати розподіл деформацій по усій площі деформованої поверхні зразка для широкого діапазону вимірювань та оптимізувати геометричні розміри приклеювання, щоб забезпечити надійне з'єднання при статичних та циклічних навантаженнях. У результаті отримали розподіл деформацій у композитній стрічці ε_y^c по усій площі приклеювання (рис. 4) шарі клею ε_y^k (рис. 5) та залізобетонному блоці ε_x в напрямку осі OX (рис. 6), а також взаємне зміщення стрічки і блоку (рис. 7, 8), за яким можна оцінити НДС у з'єднанні.

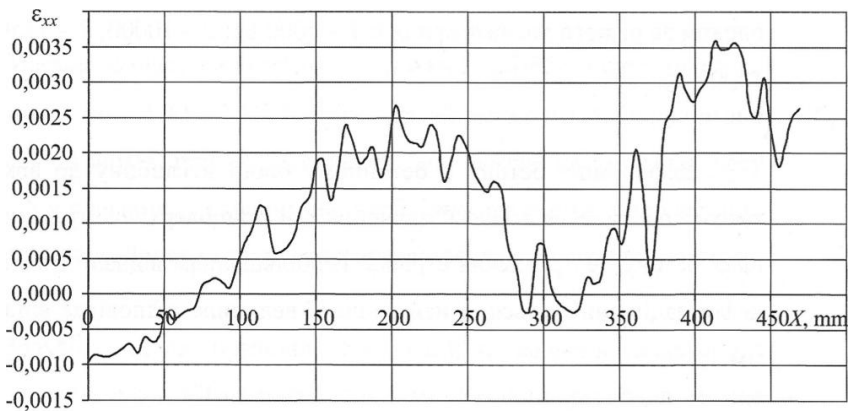


Рис. 4. Розподіл деформацій в композитній стрічці по її довжині.

Аналіз розподілу деформацій у композитній стрічці ε_y^c змінюється по довжині приклеювання до залізобетонного блоку. Максимальна деформація стрічки досягає 0,35% в момент критичного навантаження. Із зростанням довжини l від початку координат деформація знижується. На відстані $l=500$ мм деформація практично рівна 0, що означатиме надійність такого з'єднання за міцнісними і деформативними параметрами.

Деформація в шарі клею ε_y^k змінюється по довжині, а найбільше її значення знаходиться на відстані 50 мм від краю приклеювання (рис. 5). На відстані 400 мм деформація у клеєному шарі є незначною, що вказує на

те, що довжина приклеювання $l=600$ мм разом з анкеруванням забезпечує міцність з'єднання.

Деформація бетону в бетонному блоці в глибину до арматури також спадає. Найбільше її значення є в приповерхневому захисному шарі бетону де приклеєна стрічка. Із збільшенням відстані x в глибину деформація знижується, а найменша її величина відповідає відстані 50 мм.

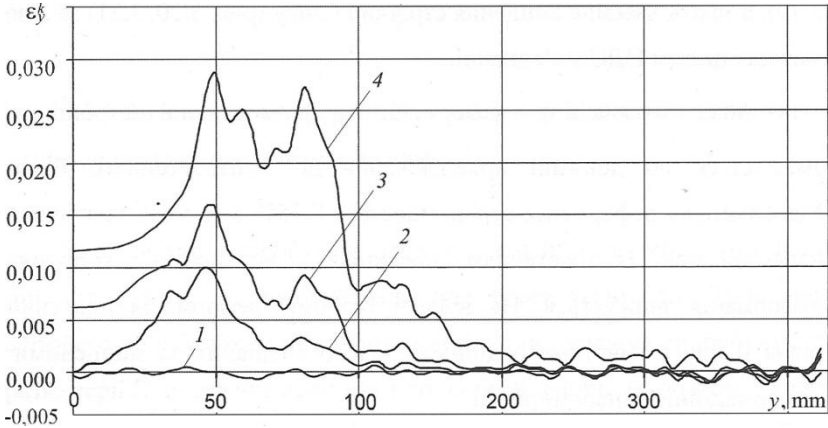


Рис. 5. Розподіл деформації на лінії склеювання стрічки із блоком за різного навантаження: 1 – 50 кН; 2 – 100 кН; 3 – 125 кН; 4 – 150 кН

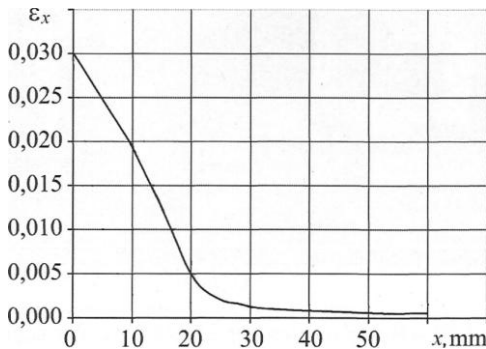


Рис. 6. Розподіл відносної деформації у бетонному блоці ϵ_x в напрямку X за критичного навантаження.

Взаємне зміщення композитної стрічки і залізобетонного блоку Δl показано на рис. 7 і 8. При реєстрації зміщення Δl встановлено наявність стрибків при навантаженні, що вказує на можливі несучільності у клеєному з'єднанні, що необхідно урахувати в процесі при нанесенні

рівномірного клею, а також забезпечити однакове по площі притискування.

Враховуючи, що розподіл деформацій та зміщень визначено з допомогою методу ЦКЗ на малій базі вимірювання переміщень можна визначити напруження у складових з'єднання, а також оцінити НДС.

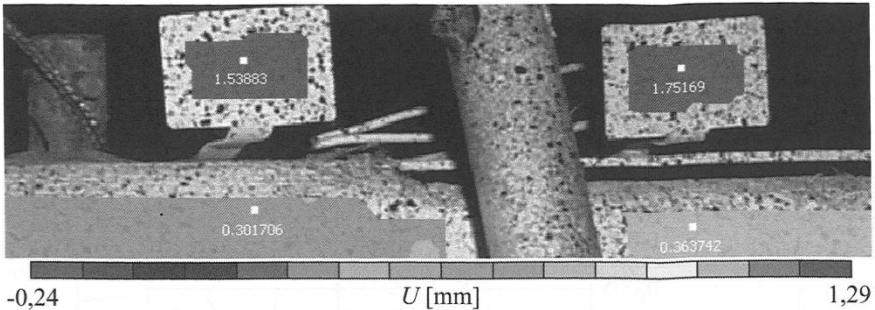


Рис. 7. Вимірювання переміщень стрічки відносно бетону методом ЦКЗ за переміщеннями пластинок-маркерів.

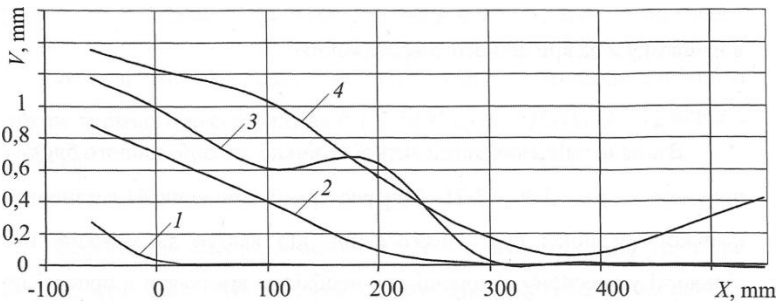


Рис. 8. Взаємне зміщення стрічки Δl відносно бетону, отримане методом ЦКЗ за переміщеннями пластинок-маркерів для різних навантажень зразка: 1 – 50 кН; 2 – 100 кН; 3 – 125 кН; 4 - 150 кН

Величину напружень можна встановити на основі побудованих дійсних діаграм руйнування усіх складових. За величиною деформації встановити напруження, що виникають у композитній стрічці, бетону та з'єднання для встановлення отриманих розмірів з точки зору забезпечення їх рівномірності.

1. СЕВ-FIP Eurocode 2: Design of Concrete Structures/ Part 1: General Rules and Rules for Buildings. ENV 1992-1-1/ -Brussels: CEN, 1991. -253 p.p. **2.** Кваша В.Г. Ефективні системи розширення і підсилення залізобетонних балкових прольотних будов автодорожніх мостів. Автореф. дис...д.т.н./В.Г.Кваша –К., 2002, -93 с. **3.** Іваницький Я.Л., Мольков Ю.В.,

Кунь П.С., Ленковський Т.М., Войтович М. Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень / Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2014. -№4. –С.6-10. **4.** Мельник І.В., Добрянський Р.З., Мурин А.Я. Міцність і деформативність залізобетонних балок, підсилених конструкційними композитами при різних умовах попереднього завантаження / Будівельні конструкції, том 2. –Вип.62. -К: НДІБК, 2005. –С.251-258.