

УДК 624.12

## МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ У ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

О. В. ПАНЧЕНКО

ТзОВ "Сіка Україна", Київ

Розроблено методику визначення розподілу поверхневих деформацій у клейовому з'єднанні композитної стрічки із залізобетоном з використанням безконтактного способу цифрової кореляції спекл-зображень. Встановлено ступінь деформацій в елементах клейового з'єднання.

**Ключові слова:** композитна стрічка, клейове з'єднання, залізобетон, розподіл деформацій.

Найпоширенішим і найнадійнішим способом відновлення несучої здатності залізобетонних елементів конструкцій є їх підсилення шляхом наклеювання композитних стрічок на пошкоджену зону елемента. Дослідження у цьому напрямку, в основному, присвячені технологічним аспектам наклеювання стрічок [1]. Разом з тим важливим є розрахунок і визначення напружено-деформованого стану у клейовому з'єднанні для встановлення оптимальних геометричних і міцнісних параметрів за заданих зовнішніх навантажень.

Визначають напружено-деформований стан у балках, на які наклеєно композитну стрічку, тензометричним методом [2], а для вимірювання переміщення стрічки відносно бетону використовують механічні індикатори годинникового типу. Однак така методика має низку недоліків, зокрема, є надто трудомістка, а точність отриманих результатів залежить від якості наклеювання тензорезисторів та встановлення індикаторів. Тензорезистори здатні вимірювати відносну деформацію не більшу за 0,5%, а також за їх показами неможливо контролювати всю поверхню зразка, що знижує інформативність отриманих результатів.

На сьогодні для вимірювання переміщень і деформацій широко використовують метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [3]. Суть його полягає в обробці низки цифрових зображень відповідно підготовленої поверхні деформівного тіла, які зареєстровані під час його навантаження, для відслідковування переміщень множини точок цієї поверхні і подальшого розрахунку деформацій. Метод високоінформативний, оскільки дає змогу отримати поле переміщень і деформацій на всій поверхні зразка, а відтак, і визначити розподіл напружень у контрольованому елементі конструкції, як і за використання скінченноелементних моделей. Для його реалізації існує комерційне програмне забезпечення [4], а також некомерційне MOIRE [5], яке і було застосоване в цьому дослідженні.

Мета роботи – розробити методику для визначення напружено-деформованого стану (НДС) у клейовому з'єднанні композитної стрічки із залізобетонною балкою з використанням безконтактного методу ЦКЗ.

**Зразки, обладнання та методики досліджень.** Щоб дослідити НДС та встановити оптимальні параметри приклеювання композитної стрічки CFRP до залізобетонної балки, виготовляли спеціальні зразки, які імітували роботу мостової балки в умовах експлуатації. До залізобетонного блоку 1, армованого арматурою 2

у формі паралелепіпеда з розмірами  $120 \times 500 \times 1200$  mm ( $t \times B \times H$ , де  $t$  – товщина;  $B$  – ширина;  $H$  – висота), на площину  $120 \times 1200$  mm приклеювали клеєм Sika 3 композитну стрічку CFRP 4 шириною 120 mm і завдовжки 2000 mm (рис. 1). Довжина приклеювання стрічки до блоку становила 600 mm. На вільний кінець стрічки 4 з двох сторін наклеювали дюралюмінієві пластини 5 товщиною 2 mm для надійного кріплення у захватах випробувальної установки.

Додатково стрічку закріплювали шляхом приклеювання до блоку і стрічки обгорнутого полотна Wгар 6.

Щоб реєструвати взаємні зміщення і деформації композитної стрічки 4 та залізобетонного блоку 1, наклеювали на стрічку пластини-маркери 7 з кроком 100 mm, а також тензометричні давачі 8 і 9 на стрічку і бокову поверхню блоку, відповідно. Наклеєні пластини-маркери використовували для вимірювання взаємних зміщень методом ЦКЗ, а тензометричні давачі – для встановлення поверхневої деформації. Обробивши зареєстровані зображення бокової поверхні блоку методом ЦКЗ, визначали взаємне зміщення стрічки і блоку  $\Delta l$ , деформації у клейовому шарі  $\varepsilon_y^k$  і стрічці  $\varepsilon_y^c$ , а також у залізобетонному блоці  $\varepsilon_x$  в напрямку осі  $X$  у перерізі, де деформації  $\varepsilon_y^k$  досягають максимального значення. На поверхні зразка еластичною аерозольною фарбою створювали крапковий рисунок, відповідно до вимог для методу ЦКЗ. Ступінь деформацій у всіх випадках визначали як відношення взаємного переміщення  $\Delta l_i$  до бази вимірювання  $\varepsilon_{i_b} = \Delta l_i / b$ , де  $b = 0,5$  mm.

Підготовлений зразок встановлювали на випробувальну установку ЦДМПу-200 (рис. 2). Нижню частину зразка жорстко закріплювали до нерухої траверси установки. Вільний кінець композитної стрічки фіксували у верхньому захваті по осі випробувальної установки. Осьове зусилля розтягу  $P$  прикладали до композитної стрічки.

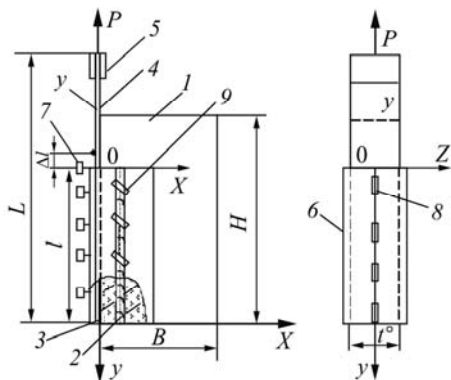


Рис. 1. Fig. 1.

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.



Рис. 2. Fig. 2.

Fig. 1. A chart of the specimen with a glued up composite belt and bunting: 1 – concrete block; 2 – armature; 3 – glue layer; 4 – composite belt; 5 – aluminum plate; 6 – Wrap bunting; 7 – markers; 8, 9 – resistance strain gauges.

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

Fig. 2. A general view of the specimen on the testing machine ЦДМПу-200 with fitted camera Olympus E300.

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

Розтягували композитну стрічку на гідравлічній розривній машині ЦДМПу-200 зі швидкістю переміщення рухомої траверси 2 mm/min та реєстрацією зусилля навантаження динамометром за лабораторних умов аж до відриву її від блоку. Сигнали від динамометра записували в персональний комп'ютер (ПК) через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 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 ступеня деформацій у композитній стрічці  $\varepsilon_y^c$ , клейовому шарі  $\varepsilon_y^k$ , залізобетонному блоці  $\varepsilon_x$  у перерізі максимальних деформацій  $\varepsilon_y^k$ , а також взаємного зміщення (зсув) композитної стрічки відносно блоку  $\Delta l$ .

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

**Результати досліджень та їх обговорення.** Цифрові зображення, отримані під час випробувань зразків, обробляли, використовуючи відповідне програмне забезпечення для ЦКЗ [6]. Цей метод дає можливість одержати розподіл деформацій по всій площі деформівної поверхні зразка для широкого діапазону баз вимірювання. В результаті отримали розподіл деформацій у композитній стрічці  $\varepsilon_y^c$  (рис. 3), шарі клею  $\varepsilon_y^k$  (рис. 4) та залізобетонному блоці  $\varepsilon_x$  в напрямку осі  $X$  (рис. 5), а також взаємне зміщення стрічки і блоку (рис. 6, 7), за яким можна оцінювати НДС з'єднання.

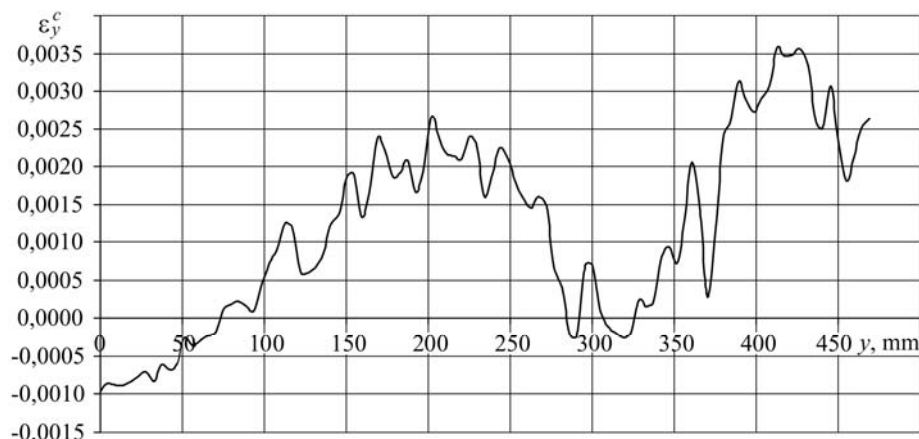


Рис. 3. Розподіл деформації в композитній стрічці по її довжині за критичного навантаження.

Fig. 3. Deformation distribution along the composite belt along its length under critical loading.

Деформація у композитній стрічці  $\varepsilon_y^c$  та клейовому шарі  $\varepsilon_y^k$  змінюється по довжині приклеювання до залізобетонного блоку. Максимальна деформація стрічки досягає 0,35% в момент критичного навантаження, а в клейовому шарі її

найбільше значення знаходиться на віддалі 100 mm від початку зони приклеювання (початку координат). Зі зростанням зусиль навантаження площадка максимальних деформацій збільшується, що відповідає відриву деякої ділянки композитної стрічки від залізобетонного блоку. Деформація у залізобетонному блоці  $\varepsilon_x$  (рис. 5) в перерізі, що відповідає максимальній деформації  $\varepsilon_y^k$  (рис. 4), змінюється за асимптотою. На відстані 10 mm від клейового шару деформація спадає практично до 0.

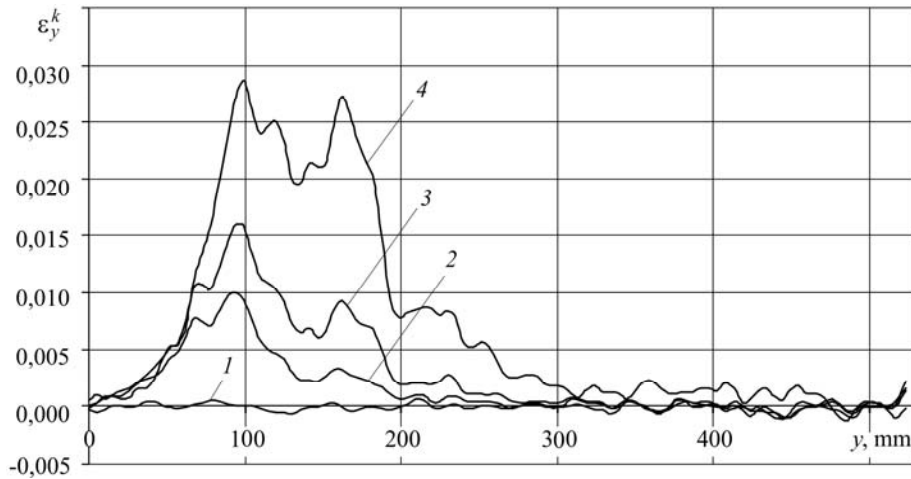


Рис. 4. Розподіл деформації на лінії склеювання стрічки із блоком за різного навантаження: 1 – 5000 kg; 2 – 10000; 3 – 12500; 4 – 15000 kg.

Fig. 4. Deformation distribution on the line of the glue joint of the composite belt and concrete at different steps of loading: 1 – 5000 kg; 2 – 10000; 3 – 12500; 4 – 15000 kg.

Рис. 5. Розподіл відносної деформації у залізобетонному блоці  $\varepsilon_x$  в напрямку  $X$  за критичного навантаження.

Fig. 5. Relative deformation  $\varepsilon_x$  distribution in the concrete block in  $X$  direction under critical loading.

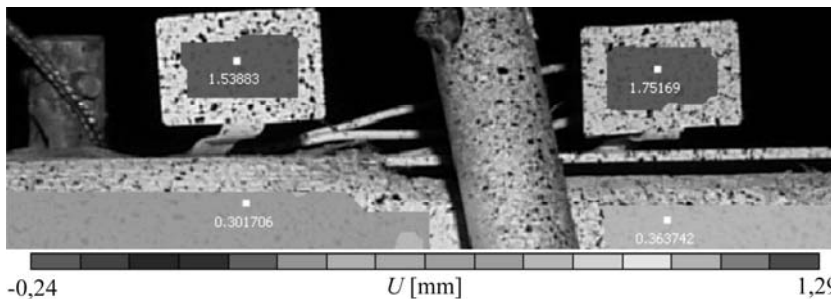
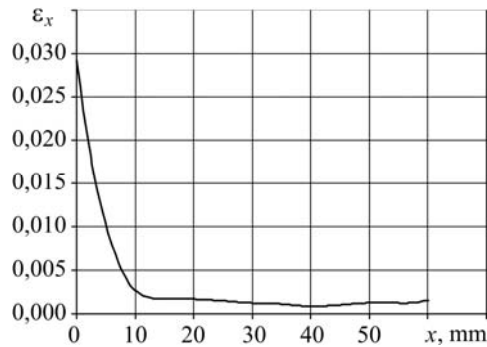


Рис. 6. Вимірювання зміщення стрічки відносно залізобетону методом ЦКЗ за переміщеннями пластинок-маркерів.

Fig. 6. Measurement of displacements of the composite belt relatively to the concrete by the displacement of markers using digital image correlation (DIC) technique.

Взаємне зміщення композитної стрічки і залізобетонного блоку  $\Delta l$  (рис. 7) відзначається різкими стрибками, що вказує на порушення зв'язку у клейовому з'єднанні.

Таким чином, визначивши ступінь деформацій та механічні характеристики композитної стрічки, залізобетону та клею, можна встановити напруження, які виникають у такому з'єднанні і оптимізувати його геометричні та міцнісні параметри.

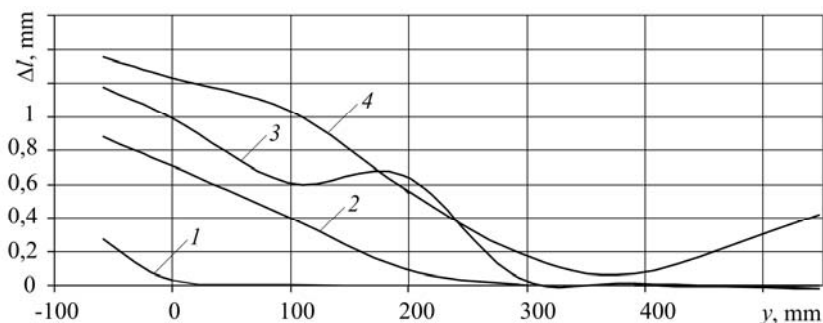


Рис. 7. Взаємне зміщення стрічки відносно залізобетону, отримане методом ЦКЗ за переміщеннями пластинок-маркерів для різних навантажень зразка:  
1 – 5000 kg; 2 – 10000; 3 – 12500; 4 – 15000 kg.

Fig. 7. Mutual displacements of the composite belt relatively to the concrete obtained using DIC technique under different specimen loadings: 1 – 5000 kg; 2 – 10000; 3 – 12500; 4 – 15000 kg.

## ВИСНОВКИ

Розроблено методику оцінювання розподілу деформацій у клейовому з'єднанні композитної стрічки зі залізобетоном. Встановлено ступінь деформацій у композитній стрічці та клейовому шарі, а також взаємне зміщення стрічки і залізобетону. Стрибокподібне зміщення з одночасним збільшенням деформації до 0,35% у стрічці вказує на її відрив від залізобетону.

**РЕЗЮМЕ.** Разработана методика определения поверхностных деформаций в клеевом соединении композитной ленты с железобетоном с использованием бесконтактного метода цифровой корреляции изображений. Установлена степень деформаций в элементах клеевого соединения.

**SUMMARY.** The technique for determining deformation distribution in the glue joint of the composite belt and concrete block using non-contact digital image correlation method is developed. The value of deformation in glue joint elements is established.

1. Кваша В. Г., Панченко О. В. Сучасні технології і підсилення мостів // Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2002. – Вип. 65. – С. 45–50.
2. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
3. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / В. Pan, К. М. Qian, Н. М. Xie, and А. Asundi // Measurement Science & Technology. – 2009. – 20(6). – P. 062001–062007.
4. Мольков Ю. В. Застосування методу цифрової кореляції зображень до побудови діаграм деформування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – № 6. – С. 136–140.
5. VIC-2D Image Analysis software, Correlated Solutions, incorporated. – West Columbia, SC 29169.
6. Wang Z. On the accuracy and speed enhancement of digital image correlation technique // J. of Experimental Mechanics. – 2011. – 26, № 5. – P. 632–638.

Одержано 03.01.2013