

ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ СИСТЕМОЮ FRCM

Вегера П.І., к.т.н., асистент,
Хміль Р.Є., к.т.н., доцент,
Бліхарський З.Я., д.т.н., професор,
Національний університет «Львівська політехніка»
pavlovegera@gmail.com

Анотація. В даній статті наведено результати експериментальних досліджень похилих перерізів залізобетонних балок без поперечного армування, підсилені системою FRCM. Всього було випробувано 4 дослідних зразка. Випробування проводились за вдосконаленою методикою, шляхом випробування кожного зразка двічі. Зразки підсилювались композитною системою FRCM при рівнях навантаження 0, 0.3 та 0.5 від несучої здатності контрольних зразків. Згідно отриманих даних побудовано графіки поширення деформацій в похилих перерізах та ізополя їх розподілу. За результатами досліджень встановлено максимальний ефект використання стрічки підсилення похилих перерізів на 26...57 %. З збільшенням рівня навантаження, за якого підсилюють зразок, ефект підсилення змінюється.

Ключові слова: похилі перерізи, підсилення, система FRCM.

ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ СИСТЕМОЙ FRCM

Вегера П.И., к.т.н., ассистент,
Хмил Р.Е., к.т.н., доцент,
Блихарский З.Я., д.т.н., профессор,
Национальный университет «Львовская политехника»
pavlovegera@gmail.com

Аннотация. В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований наклонных сечений железобетонных балок без поперечного армирования, усиленных системой FRCM. Всего было испытано 4 экспериментальных образца. Испытания проводились по усовершенствованной методике, путем испытания каждого образца дважды. Образцы усиливались композитной системой FRCM при уровнях нагрузки 0, 0.3 и 0.5 от несущей способности контрольных образцов. Согласно полученным данным построены графики распространения деформаций в наклонных сечениях и изополя их распределения. По результатам исследований установлен максимальный эффект использования ленты усиления наклонных сечений на 26 ... 57%. С увеличением уровня нагрузки, при котором усиливают образец, эффект усиления меняется.

Ключевые слова: наклонные сечения, усиления, система FRCM.

SHEAR DEFORMABILITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS, STRENGTHENED BY FRCM SYSTEM

Vehera P.I., PhD, Assistant,
Khmil R.E., Ph.D., Assistant Professor,
Blikharskyy Z.Y., Doctor of Engineering, Professor,

Abstract. The results of experimental studies of reinforced concrete beams shear strength without transverse reinforcement reinforced by the FRCM system are presented in this article. The purpose of this study is to establish the distribution of reinforced concrete beams shear deformation reinforced by the FRCM system under the action of loads of different levels. According to the investigation program, four prototypes were tested. The tests were carried out using an improved technique, by testing each sample twice. Samples were strengthened by composite system FRCM at 0, 0.3 and 0.5 levels of the control RC beams bearing capacity loading. According to the obtained data, graphs of tensile deformation in inclined cross section and area of their distribution were constructed. The maximum effect of using the strengthening tapes for shear strength reinforcement was set at 26 ... 57%. With the increase in the load level, which amplifies the sample, the strengthening effect changes.

Keywords: shear strength, strengthening, FRCM system.

Вступ. В кінці XX століття розвиток науки і техніки призвів до появи нових матеріалів підсилення залізобетонних конструкцій. Зокрема, до них належать композитні матеріали, які виготовляються на основі карбонових, РВО та ін. волокон, у вигляді тканини чи стрічок [1]. Такі матеріали характеризуються високими значеннями деформативності та міцності матеріалу, мають високу корозостійкість та легкість монтажу, фактично не змінюють геометричні розміри поперечного перерізу елемента [2]. Композитні матеріали мають ряд переваг перед звичайною сталеву арматурою [3]:

- високу міцність на розтяг і модуль пружності співрозмірними і навіть переважаючими аналогічні показники сталі;
- густиною в 3-5 разів меншою ніж у сталі, в результаті маса конструкції, що підсилюється, збільшується незначно;
- стійкі до впливу зовнішнього середовища, в тому числі корозії;
- дозволяють проводити роботи по ремонту і підсиленню з мінімальними перервами в експлуатації споруд.

Композитні матеріали, які використовуються для підсилення залізобетонних балок, за способом влаштування поділяють на дві основні групи: матеріали CFRP (CarbonFibroReinforcedPolymer), що перекладається як «посилене вуглеволокно з полімером» та матеріали FRCM (FiberReinforcedCementMatrix), що в перекладі «фіброволокно в цементній матриці» [4].

Різниця між ними полягає в тому, що система CFRP це високоміцні композитні матеріали, які фіксуються на елементі підсилення з допомогою синтетичного клею, як правило епоксидного (наприклад стрічка SikaCarboDur [5]). Другий тип композитних матеріалів виготовляється у вигляді тканини, яку з допомогою модифікованих мінеральних сумішей, на основі цементу, наносять на конструкцію (наприклад тканина Ruredil X mesh Gold [6]). Головною перешкодою в їх дослідженню і впровадженню до застосування є їх висока вартість. Хоча як показує європейська практика для підсилення моста в Швейцарії було використано 6.2 кг стрічок. Для досягнення еквівалентного ефекту підсилення необхідно застосувати 175 кг металевих виробів, що значно дорожче та трудомініше [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження підсилення лише похилих перерізів є мало поширеною практикою. Розглядаючи загальні методи підсилення похилих перерізів в залізобетонних балках композитними матеріалами, можна виділити їх три основні типи [2]: наклеювання композитного матеріалу на бічну поверхню елемента, наклеювання з утворенням «сорочки» підсилення (U-подібне наклеювання) та підсилення створенням обойми. Дослідження підсилення похилих перерізів композитними матеріалами різних типів займались Чернявський Л., Хаютин Ю.Г., Аскельрод Е.З. [7]. Їхні дослідження подані у вигляді рекомендацій по проектування та виконання підсилення згинаних залізобетонних

елементів композитними матеріалами, які набули широкого використання на теренах країн СНД.

Дослідженням підсилення залізобетонних балок композитними матеріалами займався Ahmed E.A. [8]. Випробовування проводили для залізобетонних балок на поперечну силу підсиленних CFRP на одному похилому перерізі та GFRP на іншому. Таким чином визначалась ефективність сумісної дії двох різних типів підсилення.

Виконуючи підсилення CFRP матеріалами, у роботі [9] досліджували ефективність їх розміщення: виконували підсилення похилих перерізів одним двома та трьома шарами матеріалу проте кожний шар був наклеєний під іншим кутом до осі елемента. В результаті даних досліджень встановлено, що підсилюючи балку одним шаром під кутом 45° до осі балки ефект підсилення становить 33.2%; підсилення двома шарами композитної тканини з розташуванням тканини перпендикулярно і паралельно до осі балки – 27,8%; розташовуючи тканину під кутами 0° , 90° , 45° , до осі балки – 47.6%. У роботі [9] найбільш ефективним методом було підсилення балки трьома шарами тканини під кутами 0° , 45° , 90° до осі балки, проте підсилення балки одним шаром під кутом 45° теж дало високі результати підсилення з значною економією матеріалу (в порівнянні з іншими методами).

Особливої уваги заслуговує дослідження підсилення похилих перерізів за допомогою поліпаро–фенілен–бензо–бістрізолом (так звані системи PBO-FRCM) [10]. Ефективність застосування такого матеріалу при підсиленні похилих перерізів ґрунтується на тому, що він має розташовані робочі волокна в двох напрямках. Підсилення виконували U-подібними смужками розташованими перпендикулярно до осі та U-подібним підсилення по всій довжині небезпечного перерізу. Ефект підсилення становив в межах 20-25%, що на нашу думку є доволі високим результатом.

Тгарко Т. виконував підсилення похилих перерізів залізобетонних балок використовуючи різні схеми підсилення для встановлення найбільш ефективного способу підсилення, використовуючи різне розміщення однакових PBO-смужок [11]. За результатами досліджень встановлено, що найбільшу несучу здатність показали балки підсилені вертикальними смужками – 257 кН. Несуча здатність при схемі наклеювання смужок під кутом 45° до осі балки становить 236,7 кН, а для схеми з різними кутами наклеювання (30° ; 45° ; 60°) – 221,9 кН. Отже, можна сказати що найбільший ефект підсилення досягнуто при використанні підсилення вертикальними смужками. Такий ефект можна пояснити тим що вертикальні деформації, які виникають від дотичних напружень в похилому перерізі набувають більших значень ніж горизонтальні.

Для визначення впливу розмірів та ефективності способів підсилення балок на зріз було проведено досліди Godat A. [12]. Досліди проводили на балках різних геометричних розмірів, а підсилення виконували наклеюючи композитну смужку типу CFRP, розміри якої були змінні в залежності від розмірів балки зберігаючи певне співвідношення. Всі балки були виконані з бетону однакового класу проте мали відмінності по армуванні. Для балок підсилення наклеюванням типу «сорочка» (U-shape) ефект підсилення становив: для балок розмірами $200 \times 100 \times 900$ мм – 28%; $400 \times 200 \times 1800$ мм – 14%; $600 \times 300 \times 2700$ мм – 24%. Отже ефект підсилення не має лінійної залежності від геометричних розмірів балок. Останній дослідний зразок підсилювали також повним огортанням тканиною – підсилення типу «обойма» (completely). Для такого типу ефект підсилення склав 37 %, що вказує на значне збільшення несучої здатності в порівнянні з наклеюванням на три грані балки (підсилення типом «сорочка»).

Дослідження Jung K. [13] стосувались підсилення балок гібридною FRP-FRCM системою. Підсилення виконувалось наклеюванням системи по всій довжині похилого перерізу. Ефект підсилення для такої системи становив 54%. Такий показник є дуже високим для підсилення похилих перерізів, що свідчить про ефективність виконання підсилення.

Аналізуючи вищеописані дослідження похилих перерізів підсилення різними типами композитних матеріалів, різними способами можна зробити висновок, що вивчення напружено-деформованого стану підсилення похилих перерізів є актуальним питанням, з

постійним розвитком цілей і задач, які ставлять перед собою дослідники. Основною задачею таких досліджень, це досягнення ефекту підсилення похилих перерізів композитними матеріалами, який був би співрозмірний з ефектом підсилення ними ж нормальних перерізів в згинаних залізобетонних елементах.

Слід зауважити, що в наведених дослідженнях не враховано таку важливу особливість, як наявність діючого навантаження на конструкції під час підсилення. Це навантаження може бути різного рівня, як від власної ваги конструкції так і досягати експлуатаційного значення. Саме тому проведення досліджень з врахуванням дії навантаження є актуальним завданням.

Мета досліджень. Метою даного дослідження є дослідження міцності та деформативності бетонних похилих перерізів залізобетонних балок, підсиленних системою FRCM за дії навантаження різного рівня.

Об'єктом досліджень є розподілення деформацій в похилих перерізах без поперечного армування, підсиленних системою FRCM, за дії навантаження.

Результати експериментальних досліджень. Для реалізації поставленої мети було запроєктовано та виготовлено 4 дослідних зразків, розмірами поперечного перерізу 200×100 мм та довжиною 2100 мм. Робоча розтягнута арматура прийнята класу А400С $\varnothing 18$ мм, стиснута арматура – А400С $\varnothing 10$ мм. Поперечне армування в зоні дії поперечної сили відсутнє. Розрахунковий проліт балок становить 1900 мм.

Балки маркуються БЗ – контрольна балка, або БПК – балка підсилена композитним матеріалом; перша цифра – номер серії, друга цифра – номер дослідного зразку, третя цифра – номер перерізу. Для прикладу БЗ 1.2-2 означає, що випробувано другий переріз другої балки з першої серії. Індекс 0...0.5 означає рівень, при якому виконувалось підсилення, прийнятий від отриманого руйнівного, для звичайних балок.

Балки запроєктовано таким чином, що навіть після підсилення похилого перерізу, руйнування відбувалось за поперечною силою. Жоден зразок не руйнувався за нормальним перетином. Протягом досліджень зразки випробовувались двічі – кожен похилий переріз окремо, згідно методики викладеної в [14].

Згідно програми досліджень, залізобетонні балки підсилювали наклеюванням Р.В.О. тканини у вигляді вертикальних смужок шириною 70 мм, для можливості фіксування деформацій бетону похилого перерізу. Похилі перерізи балки БПК 1.1-0 підсилювали без початкового навантаження; балки БПК 1.2-0.3 та БПК 1.3-0.5 підсилювали при рівні початкового навантаження рівному 0.3 та 0.5 від руйнівного, визначеного експериментальними випробовуванням непідсиленних зразків. Критерій втрати несучої здатності прийнятий аналогічним як і для непідсиленних зразків: вичерпання несучої здатності похилих перерізів прирівнювалось до фізичного руйнування стиснутої зони бетону зразків. Руйнування похилого перерізу залізобетонної балки, підсиленого композитною тканиною, відбувалось в такій послідовності:

- розкриття похилої тріщини граничної ширини ($w_k=0.4$ мм) на поверхні бетону;
- поширення похилої тріщини до стиснутої зони бетону та поява сітки тріщин шириною розкриття $w_k=0.05 \dots 0.2$ мм на поверхні системи підсилення;
- руйнування бетону похилого перерізу в зоні дії головних розтягуючих напружень та відшарування системи підсилення в цій зоні;
- пластичне деформування стержнів арматурного каркасу та руйнування бетону стиснутої зони, значні деформації тканини підсилення, котрі можна розгледіти внаслідок порушення захисного шару.

При подальшому збільшенні навантаження відбувається повне відшарування кінців тканини та порушення її анкерування.

Вичерпання несучої здатності перерізу відбувалось в момент вилучення стиснутої зони бетону разом з різким видовженням стрічки та пошкодженням захисного шару системи FRCM в зоні поширення похилої тріщини (рис. 1).

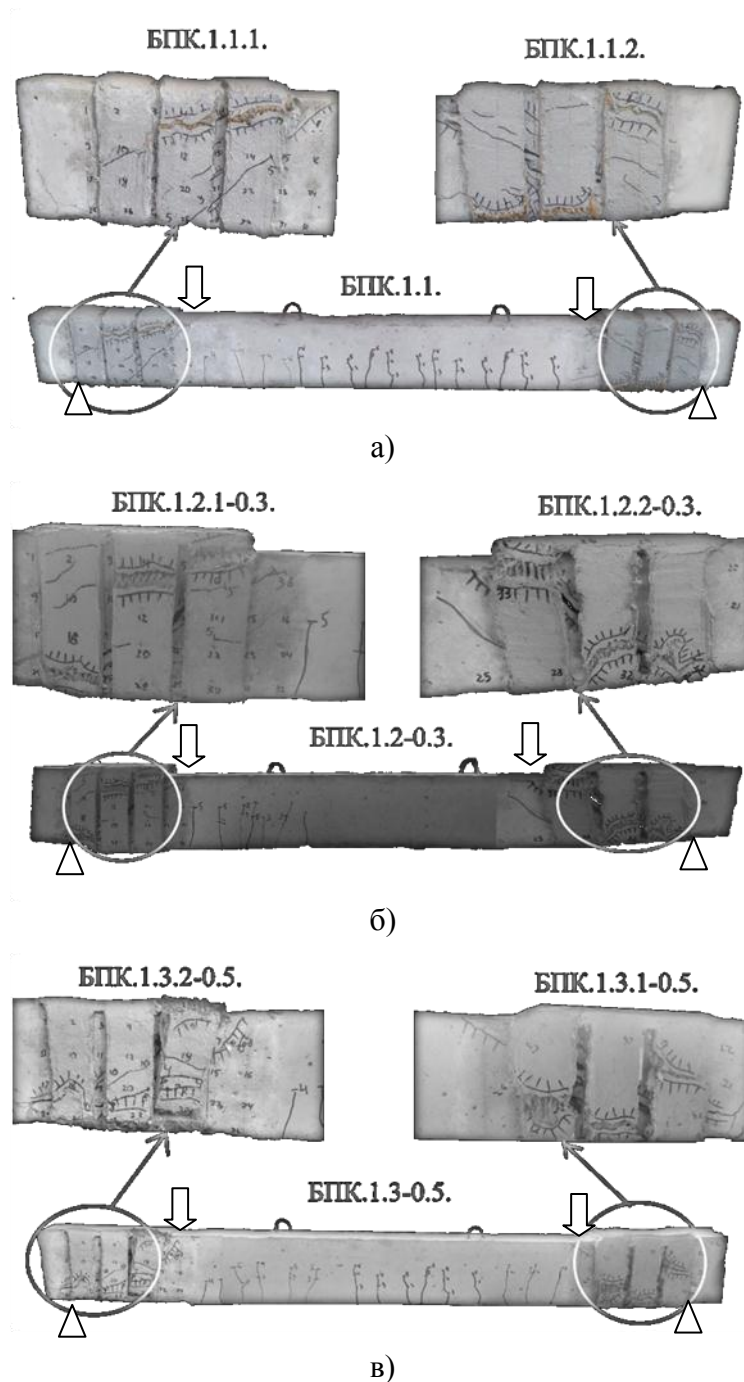


Рис. 1. Випробувані дослідні зразки: а – БПК 1.1; б – БПК 1.2-0.3; в – БПК 1.3-0.5

Несуча здатність на дію поперечної сили становила: для зразка БПК 1.1 – $V_{Ed} = 137.5$ кН, для балки БПК 1.2-0.3; $V_{Ed} = 120$ кН та для БПК 1.3-0.5 - $V_{Ed} = 110$ кН.

При цьому для підсиленних похилих перерізів змінився характер руйнування: балка втрачає несучу здатність більш пластично, відсутнє випадіння частинок бетону та видимої пластичної деформації арматурного каркасу. Розподіл деформацій, який наведено на ізополях (рис. 2), свідчить про розподіл розтягуючих зусиль по більшій площі похилого перерізу.

Для зразка підсиленого без початкового навантаження відбулась концентрація напружень на рівні половини висоти похилого перерізу, як і в непідсиленому зразку, тоді як для підсиленних зразків при дії навантаження це не характерно. Такий розподіл деформацій викликаний ефективнішим включенням стрічки в роботу, при підсиленні без дії навантаження. Для інших зразків, підсилення виконували при наявності в елементі значних деформацій розтягу, що призвело до зміни розподілу зусиль в перерізі.

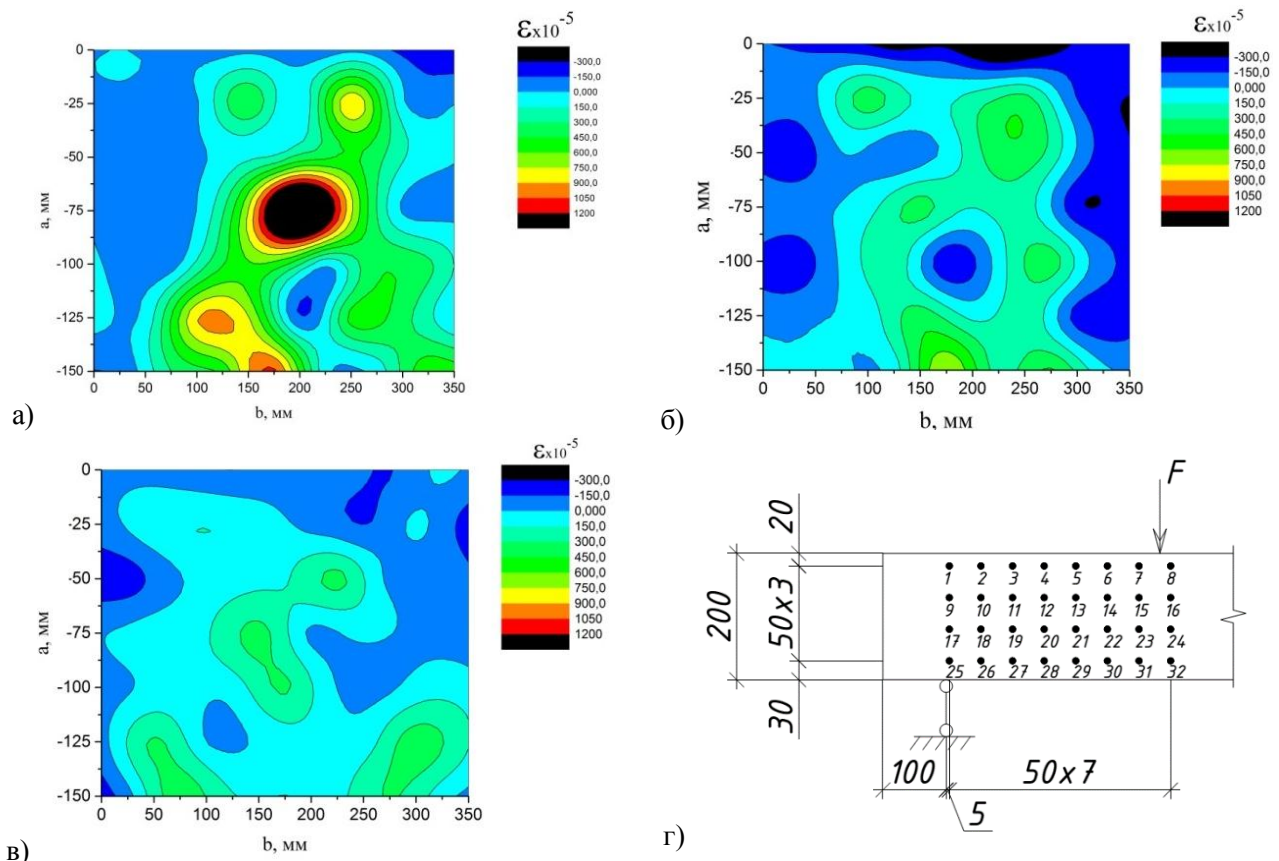


Рис. 2. Ізополя розподілу деформацій перед вичерпанням несучої здатності для балки: а – БПК 1.1-0; б – БПК 1.2-0.3; в – БПК 1.3-0.5; г – схема розміщення реперів компаратора

Деформації розтягу бетону, разом з шириною розкриття похилих тріщин, за характером наростання є аналогічними як і для контрольних зразків проте досягають значно вищих значень (рис. 3).

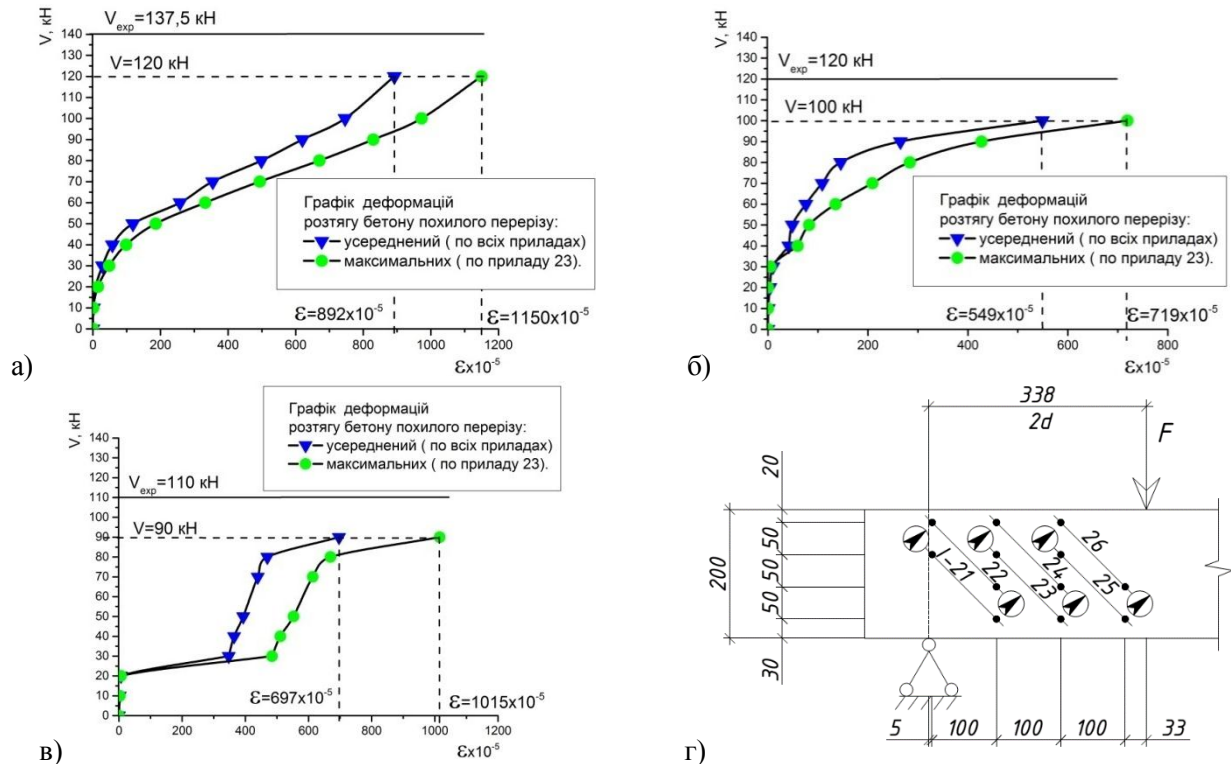


Рис.3. Деформації розтягу бетону похилого перерізу балки: а – БПК 1.1-0; б – БПК 1.2-0.3; в – БПК 1.3-0.5

Вимір деформацій елемента підсилення виконували в поздовжньому напрямку – напрямку розміщення робочих волокон. Графік деформування волокон стрічки підсилення наведено на рис. 4.

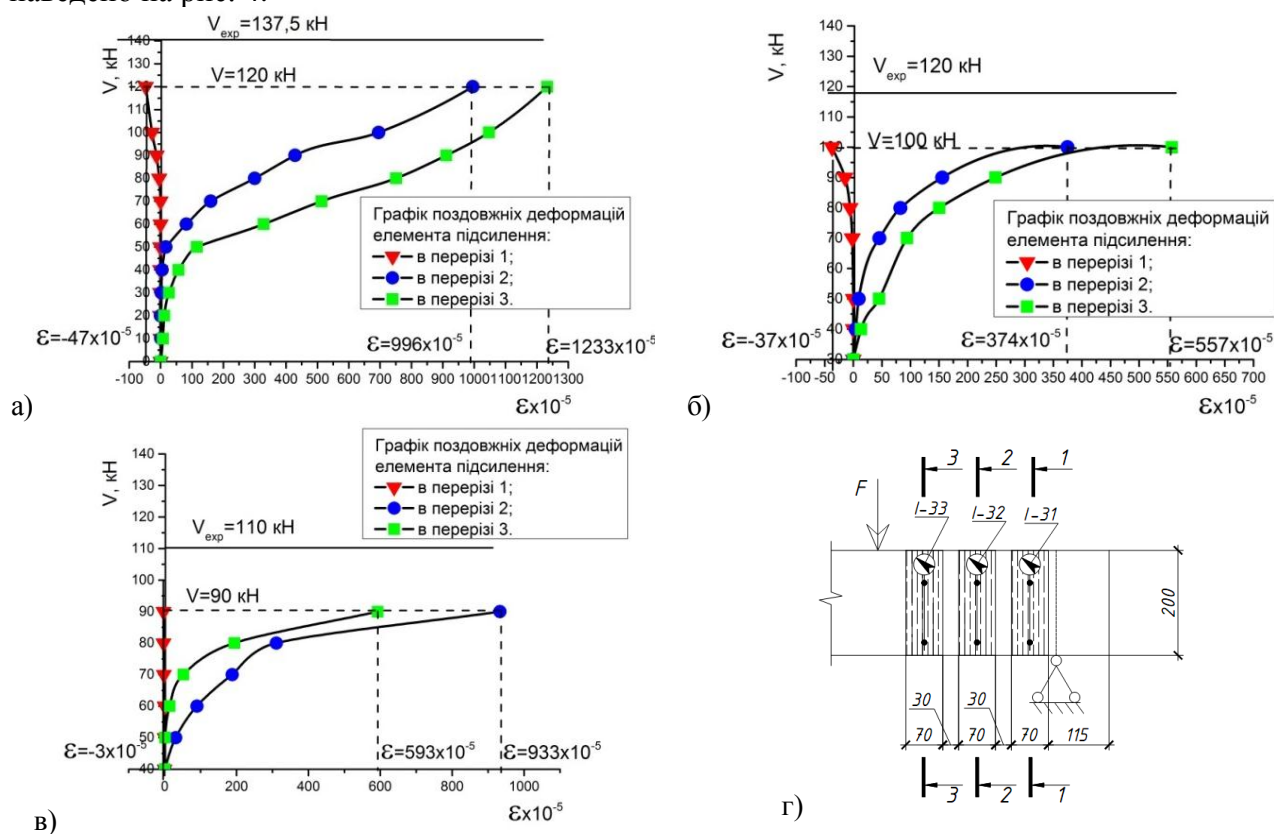


Рис.4. Деформації стрічки підсилення:

а – БПК 1.1-0; б – БПК 1.2-0.3; в – БПК 1.3-0.5; г – перерізи вимірювання деформацій

Для визначення впливу рівня підсилення на ефективність використання елемента підсилення проаналізовано максимальні деформації розтягу елементів підсилення на одному рівні навантаження ($V_{Ed} = 80 \text{ кН}$). Для зразка БПК 1.1-0 деформації становлять $\epsilon = 755 \times 10^{-5}$, для БПК 1.2-0.3 - $\epsilon = 158 \times 10^{-5}$, а для зразка БПК 1.3-0.5 - $\epsilon = 233 \times 10^{-5}$. Деформації розтягу при яких відбувається розрив становлять $\epsilon = 2150 \times 10^{-5}$, згідно даних заявлених виробником. Максимальне використання стрічки становить 36% для зразка БПК 1.1-0. Деформування елемента підсилення балки БПК 1.2-0.3 показали найнижчі значення, що пов'язано з підсиленням при настанні граничних деформацій розтягу бетону, і включенням в роботу елемента підсилення перед розкриттям похилої тріщини. Під час вичерпання несучої здатності похилого перерізу, тканина підсилення отримувала значні деформації, які призвели до втрати її початкової довжини, проте розриву тканини не спостерігали.

Максимальні деформації досягають $\epsilon = 1233 \times 10^{-5}$, що становить 57% від граничного видовження, для балки БПК 1.1-0 Це є дуже високим показником використання стрічки підсилення. Зі зміною рівня навантаження максимальні деформації стрічки підсилення теж змінюються і становлять 26% для балки БПК 1.2-0.3 та 43% для балки БПК 1.3-0.5.

Використання стрічки деформування, згідно [15], рекомендується проектувати на рівні 40% від її граничних деформацій видовження, на основі чого можна зробити висновок - згідно експериментальних даних, такий тип підсилення є також ефективним способом використання високих фізико-механічних характеристик композитного матеріалу, при підсиленні похилих перерізів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі вищевикладеного можна зробити наступні висновки:

– зразки підсилені системою FRCM руйнуються більш пластично, відсутнє масове

випадіння часточок бетону;

– деформації похилих перерізів зразків знаходять в однаковому діапазоні, і є меншими від деформацій розтягу зафіксованих на контрольних зразках;

– максимальні деформації видовження стрічки підсилення становлять 57% від граничного видовження, що є високим показником;

– з збільшенням рівня навантаження, при якому виконується підсилення, ефект використання стрічки змінюється, і залежить від наявності тріщин в похилому перерізі.

Література

1. Борисюк О.П. Підсилення залізобетонних конструкцій сучасними матеріалами / О.П. Борисюк, Мельник С.В. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць, 2010. – Вип. 20. – С. 459 – 465.

2. Alzate A. Shear strengthening of reinforced concrete members with CFRP sheets / A. Alzate, A. Arteaga, A. de Diego, D. Cisneros, R. Perera// *Materiales de Construcción*, 2013. – P. 251-265.

3. Бамбура А.М. Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій / А. Бамбура, О. Гурківський, О. Дорогова, І. Сазанова, Т. Мірошник, О. Панченко, Ю. Собко К. – Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2014. – 45 с.

4. Campbell F. C. *Structural Composite Materials* / F. C. Campbell. – Noveltу, OH: ASM International, 2010. – 500 p.

5. Шевчик А. Нові матеріали фірми Sika для підсилення дорожніх та мостових об'єктів /А. Шевчик// Науково-технічна конференція, присвячена 70-річчю білоруської дорожньої науки «Будівництво і експлуатація автомобільних шляхів та мостів», 1998. – Мінськ. – С. 278 – 284.

6. Мельник І.В. Експериментальні дослідження залізобетонних балок з поздовжньою арматурою класу А500С, підсилені композитною системою Ruredil X mesh Gold. / І.В. Мельник, Р.З. Добрянський, Р.І. Канафоцький, Н.Б. Давидовський // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, 2011. – №39. – С. 104-109.

7. Чернявський В.Л. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами / В.Л. Чернявський, Ю.Г. Хаютин, Е.З. Аскельрод, В.А. Клевцов, Н.В. Фаткуллин. – М.: ООО «ИнтерАква», 2006. – 113 с.

8. Ahmed E. A.-M. Shear behavior of concrete beams reinforced with fibre-reinforced polymer (PFR) stirrups : dis. ... doctor sciences / Ehab Abdul-Mageed Ahmed. – S., 2009. – 291p.

9. Shamsheer B. Shear response and design of RC beams strengthened using CFRP laminates. / B. Shamsheer// *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2013. – №5. – P.16.

10. Ombers L. Shear capacity of concrete beam strengthened with cement based composite materials /L. Ombers// *Composite Structures*, 2011. – №94. – P. 143-145.

11. Trapko T. Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites /T. Trapko, D. Urbanska, M. Kaminski// *Composites Part B*, 2015. – №80. – P.63-72.

12. Godat A. Size Effects for Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with CFRP Strips / A. Godat, Z. Qu, X.Z.Lu, P. Labossière, L. P. Ye, K. W. Neale, M.Asce// *Journal of composites for construction*, 2010. – P. 260-271.

13. Jung K. Shear strength performance of Hybrid FRP-FRCM /K.Yung, K.Hong, S. Han, J.Park, J.Kim// *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015. – Vol.2015. – P.1-11.

14. Вегера П.І. Оптимізація методики експериментальних досліджень похилих перерізів залізобетонних балок /П.І. Вегера, Р.С. Хміль, З.З. Бліхарський// *Теорія та практика будівництва*, 2015. – №823. – С.38-43.

15. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report / [T. Triantafillou, S. Matthys, K. Audenaert, G. Balázs, and oth]. – St.: International Federation for Structural Concrete (fib)., 2001. – 130 p.