

ТЕХНІЧНИЙ СТАН, РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА ПІДСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

УДК 624.012

**РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ
МАТЕРІАЛАМИ**

**РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАКЛОННОГО СЕЧЕНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ**

**DESIGN SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS,
REINFORCED BY COMPOSITE MATERIALS**

**Вегера П.І. асистент, Хміль Р.Є. к.т.н., доц., Вашкевич Р.В. к.т.н., доц.,
Бліхарський З.Я. д.т.н., професор. (Національний університет „Львівська
політехніка”, м. Львів)**

**Вэгэра П.И. ассистент, Хмиль Р.Е. к.т.н., доц., Вашкэвич Р.В. к.т.н., доц.,
Блихарський З.Я. д.т.н., профессор. (Национальный университет
„Львовська политехника”, г. Львов)**

**Vegera P.I. assistant, Khmil R.E. PhD, associate professor, Vashkevych R.V.,
PhD, associate professor, Blikharskyu Z.Y. Doctor of Science, professor. (Lviv
National Polytechnic University. Lviv)**

**Наведені та проаналізовані результати експериментальних та
теоретичних досліджень несучої здатності похилих перерізів
залізобетонних балок, підсилених системою FRCM за дії навантаження
різного рівня інтенсивності.**

**Приведены и проанализированы результаты экспериментальных и
теоретических исследований несущей способности наклонных сечений
железобетонных балок усиленных системой FRCM при действии
нагрузки разного уровня интенсивности.**

**Using modern composite materials becomes increasingly common in the
reconstruction or restoration of the carrying capacity of structures and
building elements. So investigation carrying capacity of inclined cross sections
of reinforced concrete beams, strengthened by the of loading is important
task. The aim of this research is establish the optimal method of calculation of
the carrying capacity of inclined cross sections of reinforced concrete beams**

reinforced FRCM system by the of loading at different levels. To perform the tasks was designed and manufactured five RC beams: one - control samples, and four – strengthened of different levels load. During the research, samples tested twice - each inclined cross section separately. RC beams without initial load and load levels at 0.3, 0.5, and 0.7 of the carrying capacity of control samples were strengthened. Test samples strengthened by FRCM system (Fiber Reinforced Cement Matrix). This system consists of cement mineral matrix, which provides anchoring, project location, and protection against external influences main fiber fabric– PBO. According to experimental tests, the largest effect of increasing the carrying capacity for beams strengthened without initial load was observed, strengthening effect having fallen by increasing the load, when the strengthening was carried out. For calculation of carrying capacity was proposed method, based on dependencies given in the current standards and recommendation of the FIB. Calculation for an improved method showed satisfactory convergence theoretical values with experimental data. For all test samples, theoretical values of carrying capacity of inclined cross sections are larger than the experimental.

Ключові слова:

Похилі перерізи, підсилення залізобетонних балок, композитні матеріали.

Наклонные сечения, усиление железобетонных балок, композитные материалы.

Inclined cross sections, strengthening of reinforced concrete beams, composite materials.

Вступ. З розвитком науки і техніки відбувається розроблення матеріалів для підсилення будівельних конструкцій та вдосконалення методики їх розрахунку. Особливо це стосується сучасних композитних матеріалів, котрі є високоміцними, мають низьку власну вагу та геометричні розміри. Ефективне використання таких матеріалів вирішується розрахунком, який б дозволяв з високою точністю визначити збільшення несучої здатності залізобетонних елементів.

Аналіз останніх досліджень. Розроблення та розвиток методів розрахунку залізобетонних конструкцій підсилені різними типами композитних матеріалів широко досліджується в Україні [1,2] і за кордоном [3,4]. Проте, в іноземних дослідженнях увага приділяється методиці виконання підсилення, впливу відсотка армування та геометричних параметрів на ефективність підсилення конструкцій композитними матеріалами і на основі цього надають рекомендації щодо розрахунку. В Україні більшу увагу приділяють дослідженням методик розрахунку несучої здатності нормальних та похилих перерізів залізобетонних елементів, підсилені композитними матеріалами. Дуже мала кількість наукових робіт стосуються досліджень несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок, без поперечного армування, підсилені за дії навантаження різного рівня інтенсивності.

Постановка мети і задач досліджень. Метою даного дослідження є встановлення оптимальної методики розрахунку несучої здатності бетонних похилих перерізів залізобетонних балок, підсилених системою FRCM за дії навантаження різного рівня. Досягнення поставленої мети відбувається виконанням наступних задач досліджень:

- аналіз результатів експериментальних досліджень несучої здатності бетонних похилих перерізів залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами за дії навантаження різної інтенсивності;
- аналіз методик розрахунку згідно діючих норм [5,6] та викладених в рекомендаціях FIB [7];
- апробація оптимальної методики розрахунку несучої здатності залізобетонних балок на дію поперечної сили, підсилених композитною тканиною за дії навантаження різного рівня.

Об'єктом досліджень є вдосконалення існуючої методики розрахунку несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок, підсилених композитним матеріалом за дії навантаження. Досягнення поставлених задач відбувалось за допомогою наступних методів досліджень: практичних (дослідних) – експериментальні випробування; та теоретичних – математична обробка.

Постановка мети і задач досліджень. Для виконання поставлених завдань було запроєктовано та виготовлено 4 дослідних взірців, розмірами поперечного перерізу 200×100 мм та довжиною 2100 мм. Робоча розтягнута арматура прийнята класу A400C $\varnothing 18$ мм, стиснута арматура – A400C $\varnothing 10$ мм. Поперечне армування в зоні дії поперечної сили відсутнє (рис. 1). Розрахунковий проліт балок становить 1900 мм.

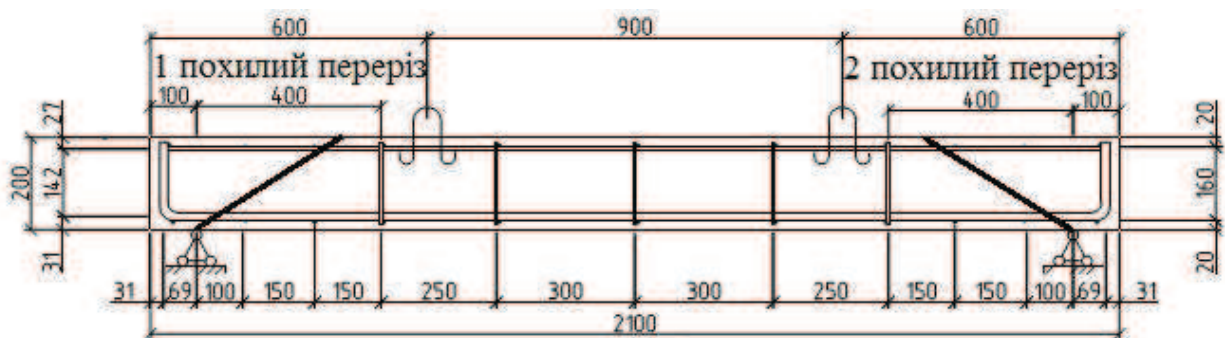


Рис. 1. Геометричні розміри та армування дослідних взірців

Балки запроєктовано таким чином, що навіть після підсилення похилого перерізу, руйнування відбувалось за поперечною силою. Жоден зразок не руйнувався за нормальним перетином. Протягом досліджень взірці випробовувались двічі – кожен похилий переріз окремо, згідно методики викладеної в [8]. Дослідні зразки підсилювались системою FRCM (Fiber Reinforced Cement Matrix). Дана система підсилення складається з мінеральної матриці на основі цементу, котра забезпечує анкерування, проектне положення та захист від зовнішніх впливів основного несучого

волокна – РВО тканину (поліпаро–фенілен-бензо-бістрізол). Підсилення відбувалось за схемою наведеною на рис. 2.

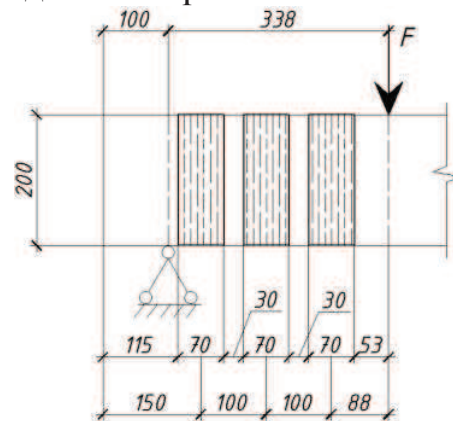


Рис. 2. Схема підсилення похилих перерізів залізобетонних балок системою FRCM

На очищену і підготовлену поверхню похилого перерізу наноситься 1 шар високоміцного розчину товщиною 2 мм, після чого в цей розчин втискали композитну тканину, поверх якої наносили другий шар розчину товщиною також 2 мм. Підсилення виконувалось у вигляді обойми – дана система наносилась на всі чотири поверхні похилого перерізу (рис. 3). Тканина вкладалась суцільною смужкою, з напуском кінців один на одного на верхній грані балки.



а) нанесення FRCM системи на похилий переріз



б) загальний вигляд підсиленого похилого перерізу

Рис. 3. Похилий переріз залізобетонної балки підсилений системою FRCM

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.

Результати досліджень. Підсилювались залізобетонні балки без початкового навантаження та при рівнях навантаження 0.3, 0.5 від несучої здатності контрольних взірців. Основні параметри та результати експериментальних даних випробуваних дослідних зразків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні результати випробувань дослідних зразків

Шифр дослідної балки	№ похилого перерізу	Клас бетону,	Відносний проліт зрізу а/с	Несуча здатність з.б. балки на зріз, V_{Ed} , кН	Середнє значення несучої здатності, V_{Ed} , кН	Ефект підсилення
БЗ 1.1	БЗ 1.1.1	С32/40	2	97	95	-
	БЗ 1.1.2			93		
БПК 1.1-0	БПК 1.1.1-0			130	137.5	1.45
	БПК 1.1.2-0			145		
БПК 1.2-0.3	БПК 1.2.1-0.3			126	120	1.26
	БПК 1.2.2-0.3			114		
БПК 1.3-0.5	БПК 1.3.1-0.5			116	115	1.16
	БПК 1.3.2-0.5			104		

Згідно з результатами експериментальних випробувань було зафіксовано найбільший ефект підвищення несучої здатності для балок підсилених без початкового навантаження – 45%. З збільшенням рівня початкового навантаження ефект підсилення зменшувався і становить 16% для балок, підсилених під навантаженням рівним 0.5 від очікуваного руйнівного. Слід зауважити зміну характеру руйнування похилих перерізів залізобетонних балок. Якщо в контрольних взірцях руйнування проходило різко, з викришуванням частинок бетону (рис.4а), то для підсилених взірців, незалежно від рівня підсилення, руйнування проходило плавно, викришування та випадання частинок бетону стримувалось композитним матеріалом.



а) дослідна балка БЗ 1.1



б) дослідна балка БПК 1.2-0.3

Рис. 4. Випробувані дослідні взірці

Руйнування похилого перерізу залізобетонної балки, підсиленого композитною тканиною, відбувалось в такій послідовності:

- розкриття похилої тріщини граничної ширини ($w_k = 0.4$ мм);
- поширення похилої тріщини по всій висоті балки та поява сітки тріщин шириною розкриття $w_k = 0.05...0.2$ мм на поверхні системі підсилення;
- роздроблення бетону похилого перерізу в зоні дії найбільших напружень;

- пластичне деформування стержнів арматурного каркасу та викришування бетону стиснутої зони, значні деформації тканини підсилення, котрі можна розглядати внаслідок порушення захисного шару.

При подальшому збільшенні навантаження відбувається відшарування кінців тканини та порушення анкерування. Під час максимального навантаження стрічка не розірвалась.

Методика теоретичного розрахунку. Методику теоретичного розрахунку пропонується проводити згідно діючих норм для проектування будівельних конструкцій [5,6]. На їх основі та аналізуючи матеріали [7] було запропоновані наступні залежності визначення несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок:

$$V_{Rd,c} = \frac{\left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d}{\beta} \quad (1)$$

В Україні відсутні норми, які б регламентували розрахунок балок підсиленних композитними матеріалами на дію поперечної сили, особливо виконаних за дії навантаження. Тому для визначення несучої здатності похилих перерізів, підсиленних композитною тканиною пропонуємо наступній підхід, використовуючи при цьому такі передумови:

- для підсиленого похилого перерізу є справедлива гіпотеза плоских перерізів;
- композитний матеріал працює як додаткове зовнішнє армування;
- система підсилення працює сумісно з бетоном в похилому перерізі.

На основі передумов наведених вище, для розрахунку несучої здатності системи підсилення використаємо формулу з норм [6], підставивши параметри композитної тканини:

$$V_{Rd}^{add} = \frac{A_{sw}^{add}}{s_f} \cdot z \cdot f_{ywd}^{add} \cdot \cot \theta \quad (2)$$

де $A_{sw}^{add} = (0.00455 \cdot 7) \cdot 2 = 0.0637 \text{ см}^2$ – площа поперечного перерізу зовнішньої арматури; $s_f = 100 \text{ мм}$ – крок елементів підсилення.

Розрахунковий опір композитної арматури визначався за формулою (3) згідно рекомендацій [7]:

$$f_{ywd}^{add} = \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fud} = k \cdot \frac{\varepsilon_{f,e}}{\gamma_f} \cdot 0,4 \cdot E_{fuk} \quad (3)$$

де $\varepsilon_{fd,e}$ – розрахункове значення граничних деформацій для композитної арматури; $\varepsilon_{fd,e} = k \cdot \varepsilon_{f,e} / \gamma_f$ – характеристичне значення граничних деформацій для композитної арматури; $k = 0.8$ – понижуючий коефіцієнт, переходу до несучої здатності на поперечну силу [6,7]; $\gamma_f = 1.3$ – коефіцієнт надійності за матеріалом, згідно рекомендацій [7], який

приймається при можливості проковзування тканини чи $\gamma_f = 1.35$ при можливості розриву тканини. $E_{fud} = 0.4 \cdot E_{fuk}$ – розрахункове значення модуля пружності композитного матеріалу, яке приймається на рівні 40% від характеристичного значення. Таке значне заниження зумовлене третьою передумовою, прийнятою вище. Згідно рекомендацій fib [7] сумісна робота бетону і елементів підсилення відбувається лише за такого заниження характеристичного значення.

Для врахування рівня навантаження балки, при якому відбувається підсилення, авторами пропонується використовувати коефіцієнт γ_{yw}^{add} , який залежить від несучої здатності балки на поперечну силу та рівня навантаження. Для коефіцієнта завантаження елемента γ_{yw}^{add} пропонується використовувати залежність:

$$\gamma_{yw}^{add} = \left(1 - \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \right)^n \quad (4)$$

де – V_{Ed} – розрахункове значення поперечної сили від зовнішнього навантаження; V_{Rd} – розрахункове значення несучої здатності похилого перерізу залізобетонної балки; n - коефіцієнт, який враховує наявність внутрішньої сталевий арматури (3/2 – для похилого перерізу без поперечного армування, 1/2 – для похилого перерізу з поперечним армуванням).

Для обчислення несучої здатності похилого перерізу залізобетонних балок, підсиленних композитним матеріалом за дії навантаження різного рівня, отримаємо формулу:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd}^{add} \cdot \gamma_{yw}^{add} \quad (5)$$

Подібна залежність подана і в рекомендаціях fib (5-1) [7], котрі також пропонують визначати загальну несучу здатність похилого перерізу, як суму мінімальних значень його складових.

Наведені вище залежності було апробовано для розрахунку несучої здатності дослідних взірців. Результати теоретичних обчислень наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння теоретичних та експериментальних значень несучої здатності похилих перерізів в залізобетонних балках підсиленних композитною системою

Шифр балки	$V_{Rd,c}$ кН	γ_{yw}^{add}	$V_{Rd}^{add} \cdot \gamma_{yw}^{add}$ кН	V_{Rd} кН	V_{Ed} кН	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}$	V_{Ed}^{add} кН	$\frac{V_{Ed}^{add}}{V_{Rd}^{add} \cdot \gamma_{yw}^{add}}$
БЗ 1.1	81.6	-	-	81.6	95	1.16	-	-
БПК 1.1-0		1.0	34.6	116.2	137.5	1.18	42.5	1.23
БПК 1.2-0.3		0.58	20.3	101.9	120	1.17	25.0	1.23
БПК 1.3-0.5		0.35	12.2	93.8	110	1.17	15.0	1.23

Розрахунок несучої здатності композитного матеріалу на поперечну силу показав максимальну розбіжність у 23%.

Таким чином, розрахунок несучої здатності балок на поперечну силу, підсилених композитними матеріалами за дії різного рівня початкового навантаження показав зниження теоретичних результатів на 18% в порівнянні з експериментальними. Якщо порівнювати розбіжність між теоретичними і експериментальними значеннями несучої здатності похилих перерізів між контрольними і підсиленими зразками, то можна констатувати, що вони результати знаходяться в межах 16...18%, що свідчить про достовірність розрахунку.

Висновки. На основі вище викладеного матеріалу можна зробити наступні висновки:

- максимальний ефект підсилення похилих перерізів системою FRCM при наклеюванні її смужками становив 45% для балок без попереднього навантаження;

- в Україні відсутні норми, які б регламентували розрахунок похилих перерізів композитними матеріалами, при дії навантаження;

- розрахунок за запропонованою методикою показав збіжність в межах 16...18%, що є достатньою збіжністю для визначення несучої здатності підсилених похилих перерізів без поперечного армування.

1. Кваша В.Г. Розрахунок міцності похилих перерізів залізобетонних балок, підсилених наклеєними композитами / В.Г. Кваша // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2011. – Випуск 22 – С. 801 – 807.

2. Мельник С.В. Дослідження несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок, підсилених наклеєними вуглепластиковими матеріалами /С.В. Мельник// Галузеве машинобудування, будівництво. – 2012. – Вип. 2(32), Том 1. – С. 151-158.

3. 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.

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

5. Бетонні та залізобетонні конструкції : ДБН В.2.6 - 98: 2009. – [Чинний від 2011-07-1]. - К.: Мінбудрегіон України, 2011. – 84с. – (Національний стандарт України).

6. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону.: ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. - [чинний від 2011-06-01]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118с. - (Національний стандарт України).

7. 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. – 130p.

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