

П.М. Фірсов, Каафарані Башар Алі

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ВІДШАРУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Наукова робота присвячена удосконаленню методики розрахунку залізобетонних елементів через перевірку запобігання відшарування FRP при підсиленні конструкцій системами композитних матеріалів з різних типів волокон. Систематизовано основні режими відмови з подальшим ініціюванням відшарування FRP матеріалу від бетонної основи. Запропоновано шість критеріїв, які потребують перевірки при проектуванні систем підсилення конструкцій FRP матеріалами.

Ключові слова: система композитних матеріалів, зовнішнє армування, підсилення FRP, залізобетон, режим відмови, розрахунок, відшарування.

Постановка проблеми

Композитні матеріали (або FRP матеріали) використовуються в різних сферах будівельної галузі України вже багато років. Наприклад, системи композитних матеріалів (СКМ) для зовнішнього армування призначені для ремонту і підсилення несучих конструкцій [1, 2, 3] з метою усунення наслідків руйнування бетону і корозії арматури в результаті тривалого впливу природних факторів і агресивних середовищ в процесі експлуатації будівель і споруд.

На стадії будівництва і експлуатації підсилення СКМ дозволяє вирішити такі завдання: усунути помилки проектування або виконання робіт, збільшити несучу здатність конструкцій при збільшенні розрахункових навантажень, а також усунути наслідки пошкодження несучих конструкцій, які виникли вже в ході експлуатації. Технологія передбачає наклеювання високоміцних матеріалів на поверхню конструкції, що підсилюється, за допомогою епоксидних або акрилових компаундів. Переваги застосування системи зовнішнього армування очевидні. Це, перш за все, скорочення трудових витрат. При підсиленні СКМ не потрібно ніякої додаткової громіздкої техніки, а самі роботи можна проводити без зупинки експлуатації об'єкту.

Під час підсилення залізобетонних елементів системами композитних матеріалів (СКМ) роль адгезії між бетоном і FRP має велике значення у зв'язку з крихкістю механізму руйнування через відшарування (втрати адгезії). Відповідно до вимог щодо несучої здатності, такий механізм відмови не повинен передувати руйнуванню підсиленого елемента на згин або зсув. Втрата адгезії між FRP і

бетоном може стосуватися як композитних ламінатів (пластин), так і тканинних листів (полос), нанесених на залізобетонні елементи у якості підсилення на згин та/або зсув (рис. 1).

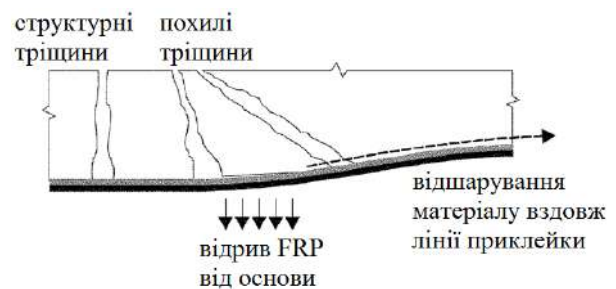


Рис. 1. Приклад мовідшарування композитного матеріалу при виникненні тріщин в бетоні

Міцність зчеплення, як правило, набагато вища ніж міцність бетону на розтяг, тому відшарування завжди починається в самому бетоні з від'єднанням шару FRP матеріалу різної товщини [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для вирішення проблеми відшарування підсилення системами композитних матеріалів необхідно розглянути різні режими відмови FRP. Недосконалість вітчизняних будівельних норм щодо підсилення конструкцій системами композитних матеріалів (СКМ) вимагає врахування вимог зарубіжних нормативів. Процедура проектування, із урахуванням вірогідного відшарування FRP, наведена в декількох чинних зарубіжних нормативах. Критерії роз'єднання для конструктивних елементів, що підсилюються при згині, розглядаються по-різному в багатьох

настановах. Наприклад, в нормативі ACI 440.2R-17 "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures" (USA) вказано, що для запобігання відшарування СКМ повинні бути введені обмеження на рівні деформацій, які утворюються в композитному матеріалі (існуючі деформації в армуванні СКМ мають бути обмежені рівнем деформацій, при яких відшарування може утворитися) [5]. ACI 440.2R-17 пропонує введення до загального розрахунку коефіцієнта K_M , який безпосередньо залежить від жорсткості елемента підсилення, та за допомогою якого можна обмежити досягнення граничної величини деформації розтягу (розриву) FRP матеріалу та забезпечити запобігання відшарування при розрахункових навантаженнях. Водночас, в документі CNR-DT 200/2004 "Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures" (European Union) розглядаються чотири режими відмови, які є обов'язковими для перевірки [6]. В нормативі розглядаються відшарування кінців FRP матеріалу, проміжне відшарування через тріщини при згині підсиленого елемента, відшарування через діагональні тріщини зсуву, відшарування через нерівності та шорсткість бетонної поверхні. В технічному звіті FIB14 "Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures" (International Federation

for Structural Concrete) також запропоновано чотири механізми можливого відшарування композиту від бетону: відшарування через тріщини зсуву, відшарування на торцях кріплення через тріщини при згині, відшарування FRP через зсув в зоні закріплення (анкерування), відшарування внаслідок нерівності бетонної поверхні [7]. Проте, аналіз наявних пошкоджень існуючих систем підсилення дає вагомий привід для розширення категоризації режимів відмови зовнішнього армування конструкцій.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є формулювання та систематизація основних критеріїв ініціювання відшарування FRP матеріалу, які потребують перевірки при проектуванні систем зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до режиму найбільш очікуваного руйнування бетону, руйнування критичного поперечного перерізу відбувається через плинність поздовжньої арматури із тріщиноутворенням в тілі бетону, при цьому FRP матеріал має залишатися цілим (рис. 2). Розрахунковий згинальний момент підсиленого перерізу розраховується відповідно до основних принципів проектування залізобетону [8].

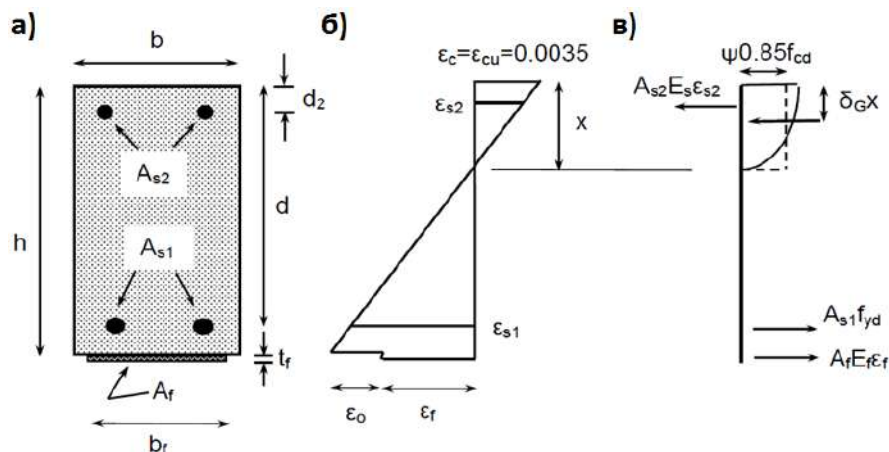


Рис. 2. Аналіз поперечного підсиленого перерізу при згині: а – геометрія перерізу, б – розподіл деформацій, в – розподіл напружень

Авторами були впорядковані основні вірогідні режими відмови з подальшим ініціюванням відшарування FRP матеріалу від бетонної основи (рис. 3), на підставі обстежень реальних об'єктів та вивчення попередніх наукових досліджень [9-11].

Далі, детально розглянуто вищезазначені критерії та механізми ініціювання відшарування FRP із урахуванням відповідних особливостей конструктивних розрахунків при проектуванні систем підсилення.

1) Критерій 1. Поверхневі нерівності, які викликають відшарування FRP.

Вигнуті нерівності бетонної основи призводять до розвитку поперечних напружень розтягу, оскільки FRP матеріали завжди намагаються випрямитися під навантаженням. Ці напруження можуть сприяти ініціюванню відшарування FRP. Для поверхонь плит, балок, ригелей допускається максимальна кривина 3 мм на 1 м довжини [5].

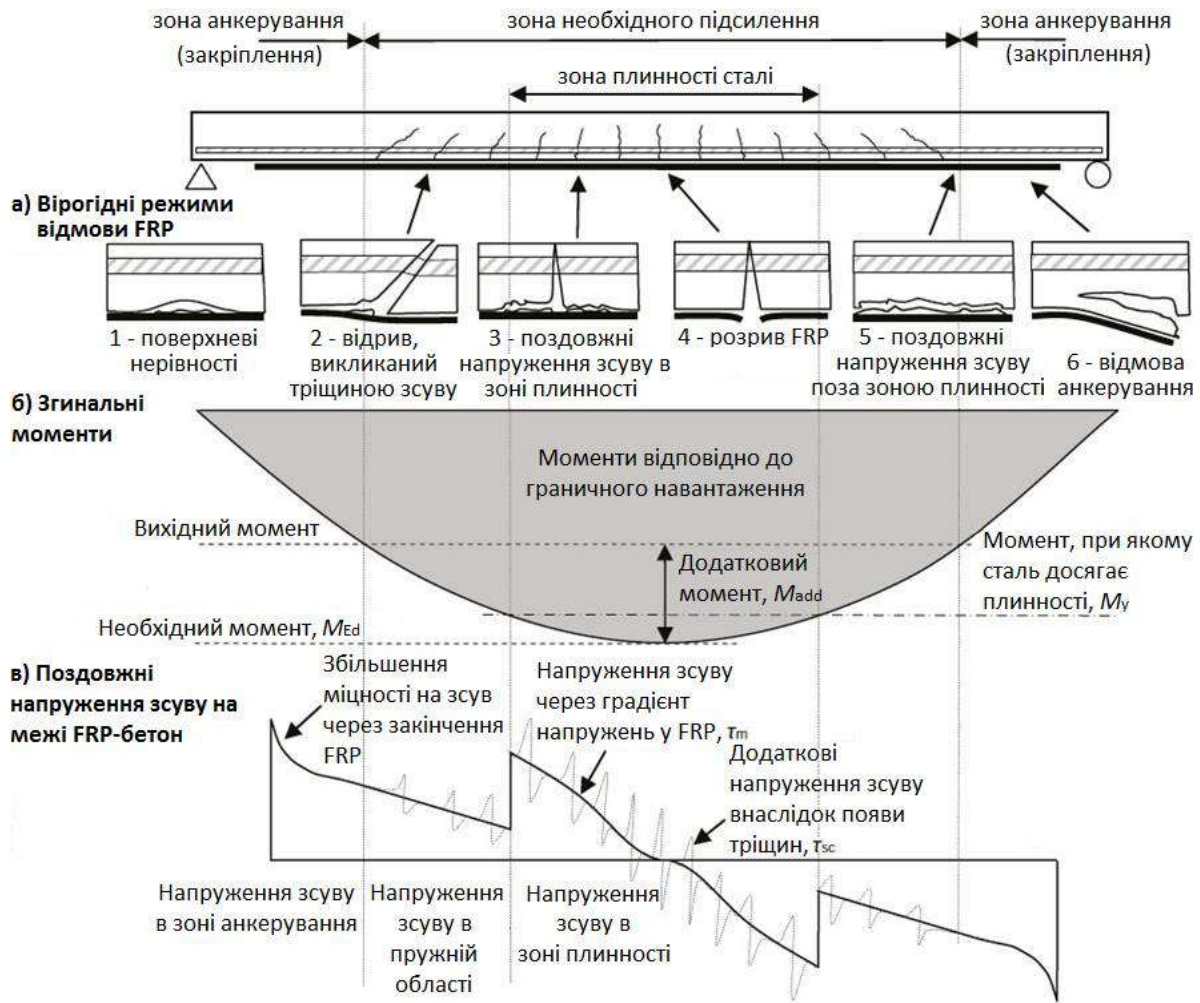


Рис. 3. Вірогідні режими відмови з подальшим відшаруванням FRP матеріалу

2) Критерій 2. Відрив FRP, викликаний тріщиною зсуву.

Утворення значних тріщин при зсуві значно впливає на поведінку з'єднання. Наявність тріщин призводить до розвитку значних поперечних напружень розтягу в клейовому та бетонному шарі, що може призвести до подальшого ініціювання відшарування FRP. Щоб уникнути відриву, спричиненого тріщиною зсуву, розрахункова сила зсуву V_{Ed} має бути нижчою за здатність перерізу протистояти утворенню значної тріщини при зсуві $V_{Rd,crack}$.

Максимальний опір зсуву для уникнення значних тріщин при зсуві визначається як 67% кінцевого опору зсуву перерізу V_{Rd} , що регулюється максимальним значенням комбінованого опору зсуву без хомутив $V_{Rd,c}$ та з ефективним залученням хомутив $V_{S,eff}$ [8]. Здатність протистояти тріщинам зсуву зміцненого перерізу розраховують за умовами:

- значення $V_{Rd,crack}$ не перевищувати $V_{Rd,c} + V_{S,eff}$ (де $V_{Rd,c}$ - міцність на зсув перерізу бетону без необхідного поперечного армування, відповідно до

EN 1992-1-1, п. 6.2.2; $V_{S,eff}$ - ефективний опір зсуву сталевих арматур);

- для елементів із поперечним армуванням, але без відповідного підсилення, $V_{Rd,crack}$ має не перевищувати $0,67V_{Rd,s}$ (де $V_{Rd,s}$ - міцність на зсув перерізу бетону з необхідною поперечною арматурою, відповідно до EN 1992-1-1, п. 6.2.3 [8]. Якщо підсилення на зсув включено, то $V_{Rd,s}$ можна замінити на $V_{Rd,s,f}$);

- для елементів із підсиленням на зсув, $V_{Rd,crack}$ має не перевищувати $V_{Rd,s,f}$;

- у всіх випадках $V_{Rd,crack}$ не потрібно приймати меншим за $(2d/a_v)V_{Rd,c}$, де $a_v < 2d$ або $V_{Rd,c}$ де $a_v \geq 2d$ (де a_v - проліт зсуву; d - ефект. глибина перерізу).

Ефективний опір зсуву, який забезпечують сталеві хомути визначається за формулою:

$$V_{S,eff} = \frac{d}{s} A_{sw} E_s \varepsilon_{sv,eff} \quad (1)$$

При цьому, ефективні деформації поперечної арматури розраховуються за формулою:

$$\varepsilon_{sv,eff} = \frac{10^{-5}}{\sqrt{a_{flex} a_w \left(\frac{E_{fd}}{E_{cm}} \right) \times \left(\frac{t_f}{d} \right)^{1,3}}} \leq \varepsilon_y, \quad (2)$$

з консервативною нижньою межею $\varepsilon_{sv,eff} = 0,00025$.

Також, необхідне виконання наступних умов:

$$a_{flex} = \frac{I_{cs} - I_{cc}}{I_{cc}}, \quad (3)$$

$$a_w = \frac{b}{b_f} \leq 3. \quad (4)$$

де I_{cc} – момент інерції невідсиленого, перерізу з тріщинами;

I_{cs} – момент інерції підсиленого, перерізу з тріщинами;

s – відстань між сталевими хомутами;

t_f – товщина FRP матеріалу;

b_f – ширина FRP матеріалу;

A_{sw} – площа поперечного перерізу сталевий поперечної арматури;

E_s – модуль пружності сталі;

E_{cm} – модуль пружності бетону;

E_{fd} – розрахунковий модуль пружності FRP.

Якщо $V_{Ed} \geq V_{Rd,crack}$, то переріз піддається ризику відшарування FRP, спричиненого тріщиною зсуву. Тоді виникає необхідність у встановленні додаткового поперечного анкерування (закріплення) FRP за допомогою U-подібного обгортання з обох сторін балки [12, 13].

3) Критерій 3. Поздовжні напруження зсуву в зоні плинності.

Поздовжні напруження зсуву, які розвиваються в зоні плинності перерізу, необхідно перевірити на гранично допустиме напруження зсуву $\tau_{lim,y}$.

Поздовжні напруження зсуву виводяться прямо пропорційно швидкості зміни осьових напружень FRP матеріалу. Враховуючи пружну область перерізу, де результуючий момент нижчий ніж момент плинності сталі M_y , збільшенню докладеного моменту в цьому перерізу буде протистояти сумісна робота сталі та FRP матеріалу. Через це градієнт осьової сили вздовж FRP змінюється від низького до помірного, отже, поздовжні напруження зсуву невеликі. Проте, необхідно зазначити, що сталь має обмежену здатність переносити додаткові напруження, які перевищують межу плинності, тому збільшенню моменту вздовж зони плинності майже виключно протистоїть FRP матеріал. Отже, швидкість зміни осьового напруження в FRP є високою при переході від пружних зон до зон плинності вздовж балки, що призводить до появи більших поздовжніх

напружень зсуву.

На поздовжні напруження зсуву також можуть впливати місцеві ефекти, такі як концентрація напружень поблизу тріщин при згині. Таким чином, загальне поздовжнє напруження виводиться як комбінація цих двох факторів.

Отже, визначення поздовжніх напружень базується на наступних припущеннях:

- повна композиційна дія, тобто ідеальний зв'язок (адгезія) матеріалів;

- плоскі перерізи залишаються плоскими, тобто з лінійним розподілом деформацій;

- бетон на розтяг не має додаткового запасу міцності;

- міцність бетону на розтяг нижче відповідної міцності клейового матеріалу.

Сумарні поздовжні напруження визначаються поетапно:

- визначається момент, при якому сталева арматура досягає межі плинності M_y , із відповідним номінальним напруженням в FRP матеріалі σ_y .

- визначається максимальний розрахунковий момент у межах зони плинності M_{Ed} , із відповідним напруженням і деформацією в FRP матеріалі, σ_{fmax} та ε_{fmax} .

- визначається відстань Δx між моментом плинності M_y і максимальним моментом M_{Ed} для докладеного навантаження.

- розраховується середнє поздовжнє напруження τ_m , через градієнт номінального осьового напруження в FRP матеріалі між точками мінімального та максимального моментів уздовж зони плинності:

$$\tau_m = t_f \left[\frac{\sigma_{fmax} - \sigma_{fy}}{\Delta x} \right], \quad (5)$$

де t_f – товщина FRP матеріалу.

- розраховується додаткове поздовжнє напруження зсуву τ_{sc} , через концентрацію напружень в безпосередній близькості від тріщин на згині:

$$\tau_{sc} = 7,8 \left[1,1 - \frac{M_y}{M_{Ed}} \right] f_{ctk}, \quad (6)$$

де f_{ctk} – характер. міцність бетону на розтяг.

- визначається повне поздовжнє напруження зсуву τ_t в межах зони плинності:

$$\tau_t = \tau_m + \tau_{sc}, \quad (7)$$

- перевіряється поздовжнє напруження зсуву (щоб переконатися, що не почалося відшарування

FRP матеріалу), при цьому τ_t має бути меншим за граничне напруження зсуву бетону $\tau_{lim,y}$, яке вважається найслабшою ланкою зв'язку між матеріалами з'єднання:

$$\tau_t \leq \tau_{lim,y} = 4,5 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}. \quad (8)$$

4) Критерій 4. Деформація в FRP матеріалі (розрив FRP).

Розрив в FRP матеріалі може статися, якщо діюча деформація FRP перевищує розрахункову деформацію на розрив. Розрив FRP досить рідко є основним режимом відмови зовнішнього армування, оскільки відшарування, зазвичай, відбувається при нижчих значеннях деформації ніж розрахункова деформація розриву.

Проте збільшення деформації через тріщини може призвести до розриву FRP. Максимальна деформація ε_{mt} розраховується як максимальна деформація на згин у поєднанні з локальною деформацією в місцях виникнення тріщин:

$$\varepsilon_{mt} \leq \varepsilon_{f \max} + 0,114 \frac{\tau_{sc}}{\sqrt{E_{fd} t_f}}. \quad (9)$$

Максимальна деформація в FRP матеріалі повинна бути меншою за розрахункову деформацію розриву ε_{fd} :

$$\varepsilon_{mt} \leq \varepsilon_{fd} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{FRP,e} \gamma_{FRP,m}}. \quad (10)$$

5) Критерій 5. Поздовжні напруження зсуву біля країв FRP матеріалу.

Для зовнішнього армування необхідно перевірити поздовжні напруження поблизу країв FRP матеріалу (рис. 3). В розрахунку припускається, що в перерізах за межами зони плинності бетон, сталь і FRP поведуться як лінійно пружні матеріали, а поздовжнє напруження зсуву τ розраховується за наведеною нижче формулою:

$$\tau = \frac{V_{add} \alpha_f A_f (h - x)}{I_{cs} b_a}, \quad (11)$$

де V_{add} – різниця між граничним зусиллям зсуву та прикладеним зусиллям зсуву під час улаштування зовнішнього підсилення;

α_f – співвідношення модулів пружності FRP та бетону E_{fd}/E_{cm} ;

A_f – площа FRP матеріалу;

x – нейтральна вісь підсиленого перерізу;

I_{cs} – момент інерції підсиленого перерізу;

b_a – ширина клейового шару;

h – висота (глибина) перерізу.

Визначення τ передбачає відсутність локального збільшення напруження зсуву через тріщини (при цьому граничне напруження зсуву обмежене $\tau_{lim,y}$):

$$\tau_{lim,y} = 0,8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}. \quad (12)$$

6) Критерій 6. Відмова в зоні анкерування (закріплення) FRP матеріалу.

Забезпечення достатньої довжини кріплення FRP, для активації необхідного рівня адгезії матеріалів, є важливою умовою безаварійної роботи з'єднання. Розрахунок анкерування виконується з метою визначення зон в прольоті елементу, де розташування FRP не потрібно.

Характеристична сила руйнування з'єднання F_k підвищується зі збільшенням анкерування FRP по довжині l_t до порогового значення $l_{t,max}$, де подальше збільшення довжини кріплення не сприяє підвищенню несучої здатності.

Максимальна ультимативна сила адгезії в залежності від довжини анкерування (закріплення) FRP матеріалу може бути визначена за допомогою наступних рівнянь:

$$T_{k,max} = 0,5 k_b b_f \sqrt{E_{fd} t_f f_{ctk}}; \quad (13)$$

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1,0, \quad (14)$$

де b_f – ширина FRP матеріалу;

b – ширина бетонної балки;

t_f – товщина FRP матеріалу;

E_{fd} – розрахунковий модуль пружності FRP;

f_{ctk} – характеристична міцність бетону на розтяг.

Відповідна максимальна довжина анкерування (закріплення) FRP визначається за допомогою виразу:

$$l_{t,max} = 0,7 \sqrt{\frac{E_{fd} t_f}{f_{ctk}}} \geq 500 \text{ мм}. \quad (15)$$

Проте, мінімально рекомендована довжина анкерування (закріплення) FRP матеріалу приймається не менше 500 мм [14].

Якщо передбачена довжина анкерування FRP l_t менша ніж значення $l_{t,max}$, то сила адгезії зменшується і може бути розрахована за формулою:

$$T_k = \left(\frac{T_{k,\max} l_t}{l_{t,\max}} \right) \times \left(2 - \frac{l_t}{l_{t,\max}} \right). \quad (16)$$

У випадку, коли довжина зони анкерування більша ніж відстань від розрахункового перерізу до грані опори, потрібно збільшити ширину елементів підсилення або встановити додаткові анкери.

Висновки

1. Проведений детальний аналіз вирішення проблематики відшарування FRP матеріалів при підсиленні залізобетонних конструкцій у різних нормативних документах. Недосконалість вітчизняних будівельних норм щодо підсилення конструкцій системами композитних матеріалів вимагає врахування рекомендацій зарубіжних нормативів.

2. Систематизовано основні режими відмови з подальшим ініціюванням відшарування FRP матеріалу від бетонної основи, із урахуванням відповідних особливостей конструктивних розрахунків при проектуванні систем підсилення.

3. Запропоновано шість критеріїв, які потребують перевірки при проектуванні систем підсилення конструкцій FRP матеріалами, а саме поверхневі нерівності бетонної основи, відрив FRP через тріщини зсуву, поява поздовжніх напружень зсуву в зоні плинності, розрив FRP матеріалу, поява поздовжніх напружень зсуву біля країв FRP, відмова в зоні анкерування (закріплення) FRP.

4. Результати даної роботи можуть бути використані для проектування вузлів підсилення конструкцій системами композитних матеріалів (на основі волокон з вуглецю, скла, арамиду тощо). Проте, конструкції, підсилені за допомогою FRP матеріалів, також потребують перевірки на можливість аварійних випадків, таких як пожежа, вибух, ударні пошкодження і сейсмічні навантаження. Ці перевірки доволі важливі для запобігання часткового або повного руйнування підсилених з/б конструкцій.

Література

1. Yuhazri M.Y., Zulfikar A.J., Ginting A. (2020) Fiber reinforced polymer composite as a strengthening of concrete structures: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1003. 12 p.
2. Кожушко В.П. Актуальність застосування композитних матеріалів для посилення залізобетонних балок прогонових будов мостів / В.П. Кожушко, Я.І. Сова, С.М. Воронова // *Збірник наукових праць "Науковий вісник будівництва"*. - Харків: ХНУБА, 2018. – Вип. 93 (3). – С. 137–143.
3. Молодід О.С. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP) / О.С. Молодід, І.М. Руднева, С.М. Богдан // *Збірник наукових праць "Дороги і мости"*.

– Київ: ДП "ДерждорНДІ імені М.П. Шульгіна", 2021. – Вип. 24. – С. 84–96.

4. Фірсов П.М. Методика розрахунку підсилення залізобетонних балочних елементів системою композитних матеріалів / П.М. Фірсов, Каафарані Башар Алі // *Збірник наукових праць "Науковий вісник будівництва"*. – Харків: ХНУБА, 2021. – Вип. 2 (108). – С. 36–43.
5. ACI 440.2R-17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. (2017) Farmington Hills: American Concrete Institute, 110 p.
6. CNR-DT 200/2004. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. (2004) Rome: Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 144 p.
7. FIB14. Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures: technical report. (2001) Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 130 p.
8. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings. (2004) Brussels: European Committee for Standardization, 225 p.
9. Kang T., Howell J., Kim S., Lee D. (2012) A state-of-art review on debonding failures of FRP laminates externally adhered to concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Vol. 6(2). Pp. 123–124.
10. Fu B., Tang X.T., Li L.J., Liu F., Lin G. (2018) Inclined FRP U-jackets for enhancing structural performance of FRP-plated RC beams suffering from IC debonding. *Composite Structures*. Vol. 200. Pp. 36–46.
11. Tworzewski P., Alexy J.K., Barnes W.B. (2022) Intermediate crack debonding of externally bonded FRP reinforcement – comparison methods. *Materials (Basel)*. Vol. 15. 19 p.
12. Al-Saawany M., El-Sayed A., Al-Negheimish, F. (2022) Inclined U-wrap anchorage for preventing concrete cover separation: experimental study and design method. *Journal of Composites for Construction*. Vol. 26. – Issue 4. – 10 p.
13. Chunyang J., Weiwen L., Chengyue H., Feng X. (2017) Data analysis on fiber-reinforced polymer shear contribution of reinforced beam shear strengthened with U-jacketing fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol. 36(2). Pp. 98–120.
14. Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій: технічний звіт / А.М. Бамбура, О.Б. Гурківський. - Київ: ДП НДІБК, 2014. – 45 с.

References

1. Yuhazri M.Y., Zulfikar A.J., Ginting A. (2020) Fiber reinforced polymer composite as a strengthening of concrete structures: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1003. 12 p.
2. Kozhushko V.P., Sova Ya.I., Voronova E.M. (2018) Actuality of application of composite materials for strengthening reinforced concrete balls of flights of bridges. *Scientific bulletin of civil engineering*. Vol. 93(3). P. 137–143.
3. Molodid O., Rudnieva I., Bogdan S. (2021) Experimental study of strengthening of metal structures with external reinforcement by the method of gluing high-strength carbon fibre-reinforced polymer (FRP) materials. *Roads and bridges*. Iss. 24. P. 84–96.
4. Firsov P.M., Kaafarani Bachar Ali (2021) Method of strengthening calculation of reinforced concrete beam elements with a system of composite materials. *Scientific bulletin of civil engineering*. Vol. 108(2). P. 36–43

5. ACI 440.2R-17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. (2017) Farmington Hills: American Concrete Institute, 110 p.
6. CNR-DT 200/2004. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. (2004) Rome: Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 144 p.
7. FIB14. Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures: technical report. (2001) Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 130 p.
8. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings. (2004) Brussels: European Committee for Standardization, 225 p.
9. Kang T., Howell J., Kim S., Lee D. (2012) A state-of-art review on debonding failures of FRP laminates externally adhered to concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Vol. 6(2). Pp. 123-124.
10. Fu B., Tang X.T., Li L.J., Liu F., Lin G. (2018) Inclined FRP U-jackets for enhancing structural performance of FRP-plated RC beams suffering from IC debonding. *Composite Structures*. Vol. 200. Pp. 36–46.
11. Tworzewski P., Alexy J.K., Barnes W.B. (2022) Intermediate crack debonding of externally bonded FRP reinforcement – comparison methods. *Materials (Basel)*. Vol. 15. 19 p.
12. Al-Saawany M., El-Sayed A., Al-Negheimish, F. (2022) Inclined U-wrap anchorage for preventing concrete cover separation: experimental study and design method. *Journal of Composites for Construction*. Vol. 26. – Issue 4. – 10 p.

13. Chunyang J., Weiwen L., Chengyue H., Feng X. (2017) Data analysis on fiber-reinforced polymer shear contribution of reinforced beam shear strengthened with U-jacketing fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol. 36(2). Pp. 98–120.
14. Rekomendatsii shchodo zastosuvannya kompozytnykh materialiv firmy Sika dlia pidsylennia zalizobetonnykh konstruksii: tekhnichnyi zvit / A.M. Bambura, O.B. Hurkivskiy. - Kyiv: DP NDIBK, 2014. – 45 s.

Рецензент: доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ФІРСОВ Павло Михайлович
кандидат технічних наук, доцент,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – pavelfirsov1991@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9119-3968>

Автор: КААФАРАНІ Башар Алі
аспірант,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – kaafaranibachar@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7165-7825>

THEORETICAL ASPECTS OF AVOIDING DELAMINATION OF COMPOSITE MATERIALS DURING STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

P. Firsov, Kaafarani Bachar Ali

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The scientific work is devoted to the improvement of the calculation methodology of reinforced concrete elements, using verification of the FRP delamination prevention, during structures strengthening with a system of composite materials (SCM) from various fibers types. During strengthening of reinforced concrete elements with composite material systems, the role of adhesion between concrete and FRP is of great importance due to the fragility of the failure mechanism due to delamination (loss of adhesion). The adhesion strength is generally much higher than the tensile strength of the concrete, so delamination always starts in concrete itself with the separation of FRP layer of different thickness. According to the load-bearing capacity requirements, such a failure mechanism should not precede the failure of the strengthened element during bending or shear. To solve the problem of possible strengthening delamination of composite materials systems, it is necessary to consider different failure modes of FRP. Due to imperfection of domestic building codes, a detailed analysis of the solution to the problem of FRP delamination was carried out in accordance with the recommendations of a number of foreign regulatory documents (ACI, CNR, FIB). The main failure modes, with subsequent initiation of delamination of FRP material from concrete base, are systematized, namely: FRP delamination due to surface irregularities, separation of FRP due to shear cracks, longitudinal shear stresses in the yield zone, excessive deformations in FRP material (FRP rupture), longitudinal shear stresses near the FRP edges, failure in anchoring (fixing) zone of FRP material. Six criteria are proposed that need to be verified during design of structures strengthening systems with FRP materials. During formulation of specified criteria, the main theoretical aspects necessary for application in structural calculations of the studied connection are given. The results of research can be used in future during the design of structures joints strengthening with systems of composite materials based on carbon fibers, glass, aramid.

Keywords: system of composite materials, external reinforcement, FRP strengthening, reinforced concrete, failure mode, calculation, delamination.