

УДК 624.046.3

**ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ
КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ФІРМИ SİKA**

д.т.н., с.н.с. Бамбура А.М., інж. Сазонова І.Р.*,
к.т.н., доц. Собко Ю.М.***

**ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»,
м. Київ*

***НУ «Львівська політехніка», м. Львів*

Композитні матеріали використовуються в будівельній галузі вже багато років. Галузь їх застосування є достатньо широкою. Це і системи гідроізоляції, і ремонт тріщин, і з'єднання різнорідних матеріалів, і жорстке склеювання збірних будівельних елементів. Останнім часом все більшого поширення набуває використання композитних матеріалів для підсилення існуючих конструкцій шляхопроводів, будівель житлового та громадського призначення, терміналів аеропортів та ін. В Україні композитні матеріали використовувались при ремонті моста «Метро» в Києві, при реконструкції автодорожніх мостів та шляхопроводів автомагістралі М06 «Київ-Чоп», при реконструкції моста №1 через Дніпро в Дніпропетровську та ін. Але проекти підсилення та роботи по підсиленню конструкцій виконувались на основі європейських рекомендацій і методів розрахунку. У зв'язку з цим, на замовлення фірми «SİKA Україна», ДП НДІБК були розроблені «Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SİKA для підсилення залізобетонних конструкцій» [3] відповідно до вимог вітчизняних нормативних документів. В даних методичних рекомендаціях наведено основні вимоги і фізико-механічні властивості композитних матеріалів та методику розрахунку підсилення залізобетонних конструкцій зовнішнім армуванням композиційними матеріалами фірми SİKA на основі вуглецевих волокон. Рекомендації розроблені з урахуванням результатів експериментальних досліджень та досвіду використання для підсилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами фірми SİKA в Європейському Союзі і відповідають вимогам нормативних документів України (ДБН В.2.6-98 [1] та ДСТУ Б В.2.6-156 [2]).

У рекомендаціях розглядається підсилення конструкцій композитними матеріалами як заводського виготовлення (стрічки), так і створюваними безпосередньо на будівельному об'єкті з тканин за рахунок просочення і наклейки їх спеціальними полімерними сумішами (в основному на епоксидній основі).

Для зовнішнього підсилення матеріали Sika використовуються для поздовжнього і поперечного армування стержневих елементів, для створення армуючих підсилюючих оболонок на колонах і опорах мостів, естакад, консолях колон, для посилення плит, оболонок, елементів ферм та інших конструкцій. При цьому, раціональним ступенем підсилення за допомогою системи Sika є діапазон 10-50% від початкової несучої здатності конструкції.

Розрахунок підсилених конструкцій за першою групою граничних станів проводиться у всіх випадках. Розрахунок за другою групою граничних станів проводиться тільки в тих випадках, коли підсилення виконується з умови збільшення розрахункового навантаження.

Розрахунок системи підсилення на основі матеріалів Sika вимагає розгляду декількох видів руйнування і граничних станів підсиленого елемента. Тому спочатку рекомендується орієнтовно призначити площу перерізу елементів підсилення обраного типу і потім змінювати її відповідно з результатами перевірок відповідних граничних станів. Розрахунки проводяться ітераційно, тому доцільно застосування комп'ютерних програм для автоматизації обчислень.

Підсилення на основі систем Sika повинно сприймати зусилля розтягу за умови забезпечення спільності деформацій зовнішнього армування і бетону конструкції. У граничному стані згинального елемента зусилля в стиснутій зоні сприймаються бетоном і стиснутою стрижневою арматурою, а в розтягнутій зоні - стрижневою арматурою і зовнішньою композитною арматурою.

Розрахунок виконується за нелінійною деформаційною методикою, сутність якої полягає в тому, що враховується приріст не зусиль (дій), а деформацій в бетоні та арматурі перерізу. За критерій вичерпання несучої здатності перерізу приймається:

- втрата рівноваги між внутрішніми та зовнішніми зусиллями (досягнення максимуму на діаграмах "момент-кривизна (прогин)" або «стискаюча сила – деформація бетону найбільш стиснутої фібри») – екстремальний критерій;
- руйнування стиснутого бетону при досягненні фібровими деформаціями граничних значень ε_{cul} (див 3.1.5 ДБН В.2.6-98) або розрив усіх розтягнутих стрижнів арматури внаслідок досягнення в них граничних деформацій ε_{ud} ;
- розрив при досягненні граничних значень деформацій композитного матеріалу підсилення ε_{fu} ;
- відшарування елементів підсилення з композиційних матеріалів.

Розглянемо приклад розрахунку балки, що підсилюється композитним матеріалом Sika® CarboDur®M ($E_f=210000$ МПа, $f_{td}=1130$ МПа, $\varepsilon_{fu}=0,00476$).

Вихідні дані для розрахунку: залізобетонна балка перекриття таврового перерізу довжиною 9 м з розмірами перерізу $b_w=300$ мм, $b_{ef}=75$ мм, $h=700$ мм, $h_{ef}=75$ мм; клас міцності бетону C25/30 ($E_{cm}=32500$ МПа, $f_{cd}=17$ МПа, $f_{ck}=22$ МПа, $f_{ctm}=2,6$ МПа; $\varepsilon_{cu1,cd}=0,00328$; $\varepsilon_{cu1,ck}=0,00355$; $\varepsilon_{c1,cd}=0,00169$; $\varepsilon_{c1,ck}=0,00176$); клас поздовжньої арматури A400C ($E_s=210000$ МПа, $f_{yd}=363,6$ МПа, $f_{yk}=400$ МПа). Поздовжня арматура розташована у два ряди: $z_{s1}=40$ мм, $A_{s1}=9,42$ см² =0,000942 м² (3Ø20); $z_{s2}=642$ мм, $A_{s2}=24,13$ см² =0,002413 м² (3Ø32). Розрахункове навантаження, на яке була запроєктована балка, 54 кН/м, граничний розрахунковий момент $M_{tr}=550$ кН·м.

Необхідно виконати підсилення балки, щоб вона сприймала навантаження 74 кН/м (граничний розрахунковий момент $M_{gr}=750$ кН·м, експлуатаційний розрахунковий момент $M_{ex}=625$ кН·м). Для цього

визначити необхідне армування композитними матеріалами, обчислити ширину розкриття тріщин від короткочасних навантажень і максимальний прогин в прольоті балки.

Розглянемо випадок, коли виконати піддомкращування балки неможливо, і на момент підсилення розрахунковий момент в прольоті дорівнює 360 кН·м.

Розрахунок виконується в два етапи. На першому етапі розрахунку визначається на момент підсилення. Розрахунки виконуємо за наведеним в Додатку А ДСТУ Б В.2.6-156 [2] алгоритмом. В результаті при дії згинального моменту 360 кН·м отримуємо параметри напружено-деформованого стану балки, що наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри напружено-деформованого стану балки на момент підсилення

$\varepsilon_{c(1)}^{(2)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(2)}$	\aleph	$x_1, м$	$\sigma_{s1}, МПа$	$\sigma_{s2}, МПа$	$M, кН·м$
0,000656	-0,001188	0,002624	0,25	121,23	-212,70	360,3

Примітки: Деформації та напруження стиску мають знак «+», а деформації та напруження розтягу мають знак «-».

На другому етапі розрахунку визначається несуча здатність перерізу балки з підсиленням. При цьому, деформації арматури в основному перерізі після підсилення знаходяться як сума незалежних деформацій від навантаження до підсилення і додаткових деформацій.

Для підсилення приймаємо 4 полоси товщиною 1,4 мм, шириною 90 мм. Площа армуючого композита $A_f = 5,04 \text{ см}^2 = 0,000504 \text{ м}^2$, відстань від стиснутої грані перерізу до шару композита $z_f = 700 \text{ мм}$.

При збільшенні навантаження в шарі армуючого композиту виникають напруження, які обчислюються за формулою

$$\sigma_{fi} = E_{fi} \cdot \varepsilon_{fi} = E_{fi} \cdot (\aleph(x_1 - z_{fi}) - \varepsilon_{c(2)}^{(2)}). \quad (1)$$

Тобто, віднімаються деформації $\varepsilon_{c(2)}^{(2)}$, що існують на момент підсилення на розтягнутій грані перерізу. Подальший розрахунок виконуємо за алгоритмом, наведеним в Додатку А ДСТУ Б В.2.6-156 [2], для другої форми рівноваги, що відповідає згину.

Для другої форми рівноваги, рівняння в розгорнутому вигляді записуються:

$$\frac{bf_{cd}}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} (x_1 - z_{fi}) = M. \quad (3)$$

У формулах (2) - (3): \aleph – кривизна вигнутої осі в перерізі; $\varepsilon_{c(1)}$ – деформації бетону стиснутої фібри; $\varepsilon_{c(2)}$ – осереднені деформації розтягнутої фібри бетону; $\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}}$, x_1 – висота стиснутої зони; $\bar{\aleph} = \aleph / \varepsilon_{c1}$ – відносна кривизна; z_{s_i} – відстань i-го стрижня або прошарку арматури від найбільш стиснутої грані перерізу; z_{f_i} – відстань до середини i-го прошарку композиційного армування від найбільш стиснутої грані перерізу; M – значення згинального моменту в перерізі.

Результати розрахунку перерізу балки наведені в таблиці 2, а повна крива стану перерізу до руйнування бетону показана на рисунку 1.

Таблиця 2

Номер точки	$\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$	\aleph	$x_1, \text{ м}$	$\sigma_{s1}, \text{ МПа}$	$\sigma_{s2}, \text{ МПа}$	$\sigma_{f_i}, \text{ МПа}$	$M, \text{ кН}\cdot\text{м}$
1	0.000328	-0.000623	0.00135	0.241379	60.3	-112.6	0	193
2	0.000656	-0.00119	0.00262	0.25	121.23	-212.70	0	360.3
3	0.000984	-0.001607	0.00370	0.265823	183.3	-287.7	-89.5	509.6
4	0.001312	-0.001968	0.00468	0.28	246	-350.3	-165.3	633
5	0.00164	-0.002624	0.00609	0.269231	306	-363.6	-303	702
6	0.001968	-0.003345	0.00759	0.259259	363.6	-363.6	-454.6	753
7	0.002296	-0.003837	0.00876	0.262032	363.6	-363.6	-557.9	779
8	0.002624	-0.004264	0.00984	0.266667	363.6	-363.6	-647.5	790
9	0.002952	-0.004592	0.01077	0.273913	363.6	-363.6	-716.3	801
10	0.00328	-0.004821	0.01157	0.283401	363.6	-363.6	-764.6	816

$M, \text{ МН}\cdot\text{м}$

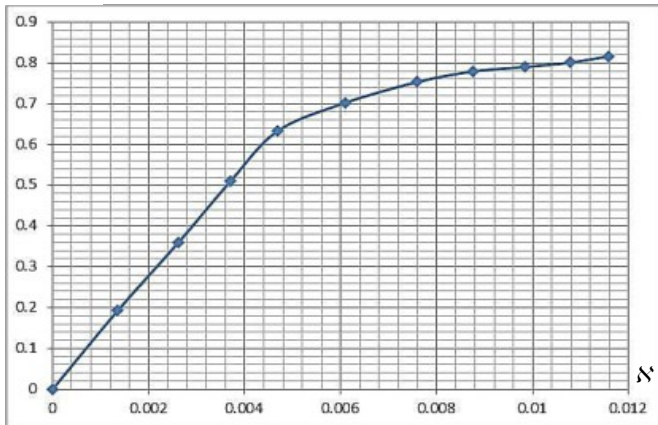


Рис. 1 – Залежність «момент-кривизна» для перерізу після підсилення композитними матеріалами

Як бачимо з результатів розрахунків, несуча здатність перерізу балки після підсилення сягає величини 812 кН·м, що більше за граничний розрахунковий момент 750 кН·м. Величина необхідного анкерного закріплення визначається за формулою

$$l_w = \frac{\gamma_R \sigma_{Ld} t_L}{\tau_{Rd}} + 0,5h \geq 0,5 \text{ м,}$$

де $t_L = 0,0014 \text{ м}$ – товщина стрічки (м); $\gamma_R = 1,2$ – коефіцієнт надійності; σ_{Ld} – розрахункове значення напружень в стрічці підсилення для перерізу, що розглядається; $\beta_m = 2,2 \text{ МПа}$ – заміряна міцність бетону на відрив при обстеженнях підсилюваної конструкції; $\tau_{Rd} = 1,16 \text{ МПа}$ – розрахункова міцність бетону на відрив, яка приймається згідно [3] в залежності від величини β_m .

Розрахунки виконуються для двох перерізів:

- для перерізу, розташованого на відстані $0,25l = 0,25 \cdot 9 = 2,25 \text{ м}$ від опори;
- для перерізу, в якому підсилення не потрібне (тобто, розрахунковий момент може сприйматися перерізом без підсилення).

Довжина необхідного анкерного закріплення приймається більшою з двох отриманих величин і складає 0,59 м для перерізу, в якому підсилення не потрібне і що знаходиться на відстані 2,62 м від опори. Тобто, довжина зони анкетування достатня.

Розрахунки за граничними станами другої групи виконуються відповідно до вказівок розділу 5 ДСТУ Б В.2.6-156 [2]. Отримуємо ширину розкриття тріщин $0,142 \text{ мм} < 0,4 \text{ мм}$ та прогин $0,0367 \text{ м} < 0,041 \text{ м}$. Таким чином, переріз балки, підсиленої полосами композитного матеріалу, задовольняє вимогам нормативних документів за I та II групами граничних станів.

Висновки: Розроблена в документі «Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKA для підсилення залізобетонних конструкцій» методика розрахунку дозволяє отримати достовірні результати щодо напружено-деформованого стану перерізу конструкцій з підсиленням і відповідає вимогам діючих нормативних документів України.

ВИКОРИСТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.6.-98:2009 «Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення»
2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування»
3. ДП «НДІБК» Звіт про науково-технічну роботу «Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми SIKA для підсилення залізобетонних конструкцій». Договір № 2167 від 4 лютого 2013 р.