

УДК 624.012.25

*Є.М. Бабич, д.т.н., професор  
В.С. Довбенко, асистент  
Національний університет водного господарства  
та природокористування, м. Рівне*

## **ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ПОЛІМЕРНОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ**

*Наведено результати експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсиленних полімерною композицією, за дії одноразових та малоциклових навантажень.*

**Ключові слова:** залізобетонні балки, полімерна композиція, підсилення, міцність, деформативність.

УДК 624.012.25

*Е.М. Бабич, д.т.н., профессор  
В.С. Довбенко, ассистент  
Национальный университет водного хозяйства  
и природопользования, г. Ровно*

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ**

*Приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных балок, усиленных полимерной композицией при действии однократных и малоцикловых нагрузок.*

**Ключевые слова:** железобетонные балки, полимерная композиция, усиление, прочность, деформативность.

UDC 624.012.25

*Y.M. Babich, ScD, Professor  
V.S. Dovbenko, assistant  
National University of Water Management  
and Nature Resources Use, Rivne*

## **RISE OF STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH POLYMER COMPOSITION**

*The results of experimental researches of reinforced concrete beams have been given in the article, which strengthened with polymer compound under the influence of one-time and few-cyclic loads.*

**Keywords:** reinforced concrete beams, polymer composition, strengthening, strength, deformability.

**Вступ.** Важливим напрямом при реконструкції та відновленні існуючих будівель і споруд є їх підсилення полімерними матеріалами.

Необхідність підсилення будівельних конструкцій будівель і споруд може бути зумовлено їх експлуатаційним зносом (спрацюванням) у результаті тривалої експлуатації, втратою міцності при різних видах навантажень, перевантаженням при неправильній експлуатації, механічними пошкодженнями й дефектами, модернізацією технологічного устаткування та природними стихійними явищами. Поєднання різних причин пошкодження потребують прийняття рішень з підсилення. Метою підсилення є збільшення несучої здатності, забезпечення надійності й довговічності при подальшій експлуатації підсилених конструкцій будівель і споруд.

На сьогодні накопичено значний досвід підсилення залізобетонних конструкцій. Наразі розроблено та перевірено на практиці значну кількість різноманітних способів підсилення, які класифікують і систематизують за певними спільними ознаками, що наведено в роботі [1].

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Проблемі підсилення залізобетонних конструкцій багато уваги приділяли такі вчені, як: А.Я. Барашиков, С.В. Бондаренко, З.Я. Бліхарський, О.І. Валовой, О.Б. Голишев, Ю.І. Лозовий, М.М. Онуфрієв, Б.С. Попович, П.О. Сунак, Е.Р. Хіло, О.Л. Шагін та багато інших.

Застосування полімерних матеріалів, розчинів і клеїв при підсиленні розглянуто в роботах Б.А. Боярчука, Р.О. Веселовського, М.С. Золотова, В.Г. Кваши, В.В. Козлова, М.Д. Климпуша, І.В. Мельника, В.Г. Мікульського, Ю.М. Смолянінова, Л.М. Шутенка та інших.

Полімерні матеріали, розчини, композиції, клеї все частіше використовуються в будівництві нових і підсиленні існуючих будівель та споруд. Нині відомо декілька способів застосування цих матеріалів, бетони з полімерними домішками [2], полімербетони та полімеррозчини [3, 4], бетони, армовані полімерними волокнами [5], бетони у поєднанні з композитним (вуглецевим) матеріалом [6, 7], бетонополімери, або бетони, просочені різними речовинами [8 – 10].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Прості й надійні методи підсилення на основі полімерних матеріалів складають альтернативу підсиленню традиційним методам (розчин, бетон, арматура тощо). Широке застосування полімерних матеріалів як засобів і методів підсилення стримується кількома факторами, а саме: невеликим досвідом використання, недостатньою кількістю наукових досліджень, відсутністю розрахунково-нормативної бази, адаптованої до чинних нормативних документів.

На сьогодні не існує відповідного узагальнення міцності, деформативності та тріщиностійкості підсилених конструкцій, полімерними матеріалами. Практично не впроваджено методіку розрахунку підсилених конструкцій згідно із чинними нормативними документами.

**Постановка завдання.** У роботі поставлено за мету дослідити міцність, жорсткість та тріщиностійкість згинальних залізобетонних елементів, підсилених полімерною композицією, встановити вплив полімерної композиції на залізобетонні балки за дії одноразових та малоциклових навантажень, порівняти прогини і тріщиностійкість контрольних та підсилених зразків.

Для поставленої мети було виготовлено три серії дослідних зразків. Детальний опис кожної серії та методику випробувань наведено в роботах [9 – 10].

**Основний матеріал і результати.** З метою глибокого та повного вивчення особливостей роботи залізобетонних елементів, підсилених полімерною композицією, випробувано 30 залізобетонних зразків – балок трьох розмірів.

Випробування дослідних балок проводилось у спеціально виготовлених установках, що забезпечували стабільність зовнішнього навантаження, яке передавалося з гідравлічного домкрата на траверсу і контролювалося за показниками кільцевого динамометра. Усі серії балок випробувано за схемою вільно лежачої балки на двох опорах. Балки статично завантажувалися двома зосередженими силами  $F$ , які прикладалися до балок у третині розрахункового прольоту.

Першу та другу серію дослідних балок випробувано за дії короткочасних одноразових навантажень, а третю – за дії повторних малоциклових навантажень. Кожну серію зразків випробувано в обсязі контрольних, підсилених та відновлених балок, які піддавалися навантаженню до руйнування.

Контрольними балками слугували звичайні залізобетонні балки (без підсилення). До підсилених балок віднесено залізобетонні балки, що було підсилено (просочено) полімерною композицією до початку випробувань. Відновлені балки – це балки, які спочатку навантажувалися як звичайні залізобетонні, імітуючи процес експлуатації конструкції, а потім розвантажувалися. Після цього виконувалося підсилення (просочення) їх полімерною композицією, а далі відбувалося випробування до руйнування.

Підсилення виконували полімерною композицією, яка належить до групи матеріалів проникаючої дії. Ця композиція є останньою модифікацією полімерних композицій на основі полізоціанатів, розробленням якої займався колектив під керівництвом професора Р.О. Веселовського, її запатентовано та сертифіковано.

Полімерна композиція є одно- або двокомпонентною низьков'язкою рідиною, яка за зовнішнім виглядом нагадує гас. Основним компонентом полімерної системи є спеціальний мономер – полізоціанат (низькомолекулярна речовина), який після полімеризації (хімічна реакція, при якій з низькомолекулярної речовини утворюється високомолекулярна сполука) перетворюється на полімер, твердіння якого відбувається під дією катіонів

солей та основ, що завжди наявні в структурі бетону. Рідкий мономер перетворюється на твердий полімер, щільно заповнюючи, ніби заклеюючи всі пори та дефекти бетону. Утворений полімер має такий же елементний склад, як і вихідна речовина – мономер. Процес полімеризації мономеру поліізоціанату відбувається при нормальних температурах. Твердий полімер є екологічно безпечним, не токсичним і не горючим.

Композиція на основі поліізоціанату має ряд переваг порівняно з іншими композиціями, тому що затверджувачем частково чи повністю служить вода або луг. При поверхневому нанесенні на бетонні чи залізобетонні конструкції композиція проникає всередину та просочує пори і хімічно взаємодіє з бетоном. Після взаємодії утворюється новий композиційний матеріал, що відрізняється від необробленого матеріалу своєю високою міцністю, герметичністю й одночасно виконує такі функції: проникає в об'єм і заповнює структуру пор; зміцнює поверхневі шари бетону; утворює захисне гідрофобне покриття; створює допоміжний адгезійний шар при накладанні нового будівельного розчину на «стару» поверхню; захищає поверхню від дії агресивного середовища й проникнення вологи, грибків та інших бактерій.

Особливий інтерес для залізобетонних конструкцій являє полімерна композиція, здатна просочувати продукти корозії металу і надалі запобігати можливості її виникнення.

Полімерну композицію для підсилення закупляли в готовому вигляді, її приготування в лабораторних умовах полягало лише у змішуванні компонента 1 з компонентом 2. Композиція характеризується простотою в застосуванні (готову продукцію наносять на поверхні бетонних та залізобетонних елементів вручну або механічним способом).

Одноразові короткочасні випробування балок першої серії здійснювали поетапно.

На першому етапі випробовували контрольні балки (маркування балок 1БК), на другому – підсилені (балки 1БП), а третьому – відновлені (1БВ). Руйнування контрольних балок відбувалося по нормальних перерізах у зоні чистого згину внаслідок текучості нижньої поздовжньої розтягнутої арматури.

Середнє значення згинального моменту при руйнуванні контрольних зразків- близнюків становило  $M_d = 8,3$  кНм (табл. 1). Підсилені балки 1БП також зруйновано по нормальних перерізах, але для них середнє значення згинального моменту при руйнуванні  $M_d = 10,3$  кНм, що приблизно на 20 % більше, ніж для контрольних. Крім того, більшу міцність зафіксовано у відновлених балках 1БВ, які попередньо було навантажено до рівня, на якому утворилися нормальні тріщини шириною 0,3 мм. Руйнівний момент балок 1БВ склав  $M_d = 10,3$  кНм. Отже, попереднє навантаження на міцність відновлених балок не вплинуло, а порівняно з контрольними балками збільшилося на 20%.

**Таблиця 1. Результати випробування дослідних балок**

Маркування балок	Руйнівний згинальний момент $M_d$ , кНм	Деформації		Прогини в середині прольоту $f$ , мм	Максимальна ширина розкриття нормальних тріщин $W_{max}$ , мм	Момент утворення перших тріщин $M_{d, wk}$ , кНм
		бетон $\epsilon_{cl} \times 10^{-5}$	арматур $\epsilon_s \times 10^{-5}$			
Балки першої серії						
1БК	8,3	177,7	293,4	9,4	0,49	1,28
1БП	10,3	148,9	311,9	8,5	0,37	1,99
1БВ	10,1	166,8	243,0	7,6	0,33	2,13
Балки другої серії						
2БК	23,7	251,5	327,7	18,8	0,37	2,4
2БП	25,7	266,4	365,5	16,1	0,23	7,2
2БВ	30,4	269,9	354,3	16,0	0,23	7,2
Балки третьої серії						
3БК	29,9	255,4	343,5	13,7	0,64	3,0
3БП	32,4	226,4	371,6	10,8	0,46	4,5
3БКц	31,1	230,2	376,0	12,5	0,64	3,0
3БПц	33,6	227,0	363,2	10,6	0,50	4,5
3БВц	31,8	216,7	366,9	10,5	0,48	4,5

У контрольних балках 1БК перші нормальні тріщини виникли при згинальному моменті  $M_{d, wk} = 1,28$  кНм, а середня ширина їх розкриття складала  $W_k = 0,04$  мм. Зі збільшенням навантаження кількість, ширина розкриття та висота тріщин збільшувалися. Момент утворення перших нормальних тріщин у підсилених балках 1БП зафіксовано при  $M_{d, wk} = 1,99$  кНм, а середня ширина розкриття  $W_k = 0,05$  мм.

Для відновлених балок згинальний момент, що сприяв утворенню перших нормальних тріщин, дорівнював  $M_{d, wk} = 2,13$  кНм, що на 40% більший порівняно з балками 1БК.

Підсилення балок композицією уповільнило процес розкриття тріщин. Максимальна ширина розкриття тріщин у контрольних балках першої серії складала  $W_{max} = 0,49$  мм, підсилених –  $W_{max} = 0,37$  мм, а відновлених –  $W_{max} = 0,33$  мм. У підсилених і відновлених балках ширина розкриття тріщин відповідно на 25 та 33% менша, порівняно з контрольними. Як видно, для відновлених балок максимальне значення ширини розкриття тріщин є найменшим, це можна пояснити тим, що для відновлених балок виконувалось імітування процесу експлуатації конструкцій. Внаслідок цього, при знятті навантаження залишалися волосяні тріщини, в які при

підсиленні потрапляла полімерна композиція. За рахунок значних адгезійних властивостей композиція зчіплювала бетон, утворюючи різновид дисперсного армування, що призвело до значного зменшення тріщиностійкості в цих балках.

Застосування полімерної композиції суттєво підвищило жорсткість балок. Середній максимальний прогин контрольних балок склав  $f_{max} = 9,4$  мм. Максимальні прогини підсиленних і відновлених балок склали відповідно  $f_{max} = 8,5$  та  $7,6$  мм, що на 10 і 19% менше, ніж у контрольних. У відновлених балках прогини на всіх ступенях навантаження були меншими, ніж у балок без підсилення.

Одноразові короткочасні випробування балок другої серії проводили у віці 180 діб. Балки другої серії випробовували аналогічно до балок першої: контрольні – 2БК, підсилені – 2БП, відновлені – 2БВ. Незначною відмінністю було випробування відновлених балок 2БВ, які спочатку піддавали навантаженню до рівня приблизно  $0,8N_u$  ( $N_u$  – очікуване руйнівне навантаження), що спричинило виникнення нормальних тріщин із шириною розкриття приблизно 0,2 мм, після чого навантаження повністю знімалось. Виконували підсилення та випробування до руйнування.

Руйнування дослідних балок другої серії відбувалось одночасно по розтягнутій і стиснутій зонах, унаслідок досягнення в арматурі напружень межі текучості та виколювання бетону. Середній руйнівний момент за результатами контрольних балок- близнюків становив  $M_d = 23,7$  кНм, а підсиленних –  $M_d = 25,7$  кНм. Руйнівний згинальний момент відновлених балок 2БВ склав  $M_d = 30,4$  кНм, що на 21% більше, ніж середнє для контрольних балок 2БК. Варто також порівняти руйнівний момент відновлених і підсиленних балок, який на 16% більший. Результати випробувань наведено в табл. 1. В усіх балках другої серії, підсиленних полімерною композицією, спостерігалось суттєве уповільнення процесу утворення та розкриття тріщин. Перші нормальні тріщини у контрольних балках виникли при моменті  $M_{d, wk} = 2,4$  кНм, а в підсиленних і відновлених балках перші нормальні тріщини зафіксовано при  $M_{d, wk} = 7,2$  кНм. Момент виникнення та утворення перших тріщин віддалено на 67%. Зі збільшенням навантаження довжина та ширина розкриття тріщин збільшувалась.

Для контрольних балок максимальна ширина розкриття тріщин зафіксована  $W_{max} = 0,37$  мм, у той час як для підсиленних балок 2БП і відновлених 2БВ максимальна ширина розкриття склала  $W_{max} = 0,23$  мм, що на 38% менше.

Слід відзначити, що застосування полімерної композиції, як і в балках першої серії, значно підвищує жорсткість. Максимальний прогин балок 2БК склав  $f_{max} = 18,8$  мм, а прогин балок 2БП –  $f_{max} = 16,1$  мм. Отже, навіть при більшому згинальному моменті прогин підсиленних балок менший

на 15%. У відновлених балках максимальний прогин склав  $f_{max} = 16,0$  мм, але слід звернути увагу не лише на прогин, який став меншим на 15%, а на руйнівний момент  $M_d = 30,4$  кНм, що збільшився на 15% порівняно з контрольними балками.

Випробування дослідних зразків третьої серії за дії малоциклових навантажень проводили у віці 160 – 180 діб, за цей період суттєвих змін у міцності та деформативності не відбулось.

Контрольні балки (маркування ЗБК) в кількості 2 шт. випробовували одноразовим короткочасним навантаженням. За результатами визначено рівні повторних навантажень для контрольних балок. Підсилені балки (ЗБП) в кількості 2 шт. також випробовували одноразовим короткочасним навантаженням для визначення руйнівного зусилля. За результатами визначено рівні повторних навантажень для підсилених балок.

Наступним етапом досліджень було випробування контрольних балок (ЗБКц) повторними малоцикловими навантаженнями в кількості 5 шт. Балки ЗБКц піддавали десяти циклам навантажень з рівнем  $\eta_{cyc} = 0,3 \dots 0,7$ . Рівень відносних навантажень вибрано такими, щоб найближче імітувати дію навантажень у процесі реальної експлуатації балок (експлуатаційне навантаження). Дві балки ЗБКц на одинадцятому циклі зруйнували, а інші три після десятого циклу розвантажували. Розвантаженим балкам ЗБКц, що підсилювали полімерною композицією, надавали нове маркування (ЗБВц). До початку випробування балки витримували 10 діб.

Підсилені балки (ЗБПц) в кількості 3 шт. випробовували повторними малоцикловими навантаженнями десять циклів з рівнем  $\eta_{cyc} = 0,3 - 0,7$  та на одинадцятому циклі доводили до руйнування.

Несуча здатність контрольних балок ЗБК при одноразовому навантаженні становила  $M_d = 29,9$  кНм, а для підсилених балок ЗБП –  $M_d = 32,4$  кНм, що на 8 % більше, ніж у балок ЗБК (див. табл. 1).

Балки ЗБКц піддавали повторним навантаженням з рівнем завантаження  $\eta_{cyc} = 0,3 \dots 0,7$ . Після десяти циклів завантажень на одинадцятому здійснювали руйнування балок, яке склало  $M_d = 31,1$  кНм. Інші балки ЗБКц після 10-го циклу завантаження розвантажено, а потім відновлено. Процес відновлення полягав у підсиленні дослідних балок ЗБКц полімерною композицією після 10-ти циклів навантажень – розвантажень. Відновлені балки по-новому маркували – ЗБВц, їх знову піддавали повторним навантаженням. Кількість циклів залишалася не змінною, але зусилля при кожному ступені завантаження збільшувалося за рахунок рівнів повторних навантажень підсилених балок. На одинадцятому циклі руйнівний момент балок ЗБВц становив  $M_d = 31,8$  кНм, що порівняно з контрольними балками ЗБКц більше лише на 6%. Проте потрібно відзначити той факт, що відновлені балки ЗБВц піддавалися двадцяти циклам завантажень – розвантажень, а не десяти, як контрольні балки ЗБКц.

На першому циклі навантаження для балок ЗБКц тріщини почали з'являтися при  $M_{d, w_k} = 3,0$  кНм, а ширина їх розкриття складала  $W_k = 0,09$  мм. Зі збільшенням рівнів навантажень ширина розкриття тріщин та їх кількість збільшувалася. Перед руйнуванням балок ЗБКц максимальна ширина розкриття тріщин становила  $W_{max} = 0,64$  мм.

У підсилених ЗБПц та відновлених ЗБВц балках на першому циклі навантаження тріщини зафіксовано при  $M_{d, w_k} = 4,5$  кНм, а ширина їх розкриття складала відповідно  $W_k = 0,08$  мм і  $W_k = 0,1$  мм. Момент утворення перших тріщин віддаляється більш ніж на 33%. Перед руйнуванням балок ЗБПц і ЗБВц максимальна ширина розкриття нормальних тріщин становила  $W_{max} = 0,50$  мм і  $W_{max} = 0,48$  мм відповідно, що на 22 і 25% менше, ніж у контрольних ЗБКц.

Дослідження третьої серії, як і двох попередніх, підтвердило зростання жорсткості підсилених балок. Максимальні прогини контрольних балок ЗБКц перед руйнуванням складала  $f_{max} = 12,5$  мм, підсилених ЗБПц –  $f_{max} = 10,6$  мм та відновлених ЗБВц –  $f_{max} = 10,5$  мм. Порівняно з контрольними балками ЗБКц максимальні прогини балок ЗБПц і ЗБВц зменшилися відповідно на 15 та 16%. У процесі випробування балок третьої серії спостерігалось збільшення прогинів від циклу на верхньому рівні завантаження та накопичення залишкових деформацій при зменшенні навантаження. Починаючи із шостого циклу, прогини стабілізувалися, що свідчить про перехід роботи балок у циклічний стан.

### **Висновки:**

1. Експериментально встановлено, що підсилення залізобетонних балок полімерною композицією збільшує міцність, тріщиностійкість та жорсткість конструкцій як при одноразовому короткочасному навантаженні, так і при повторних малоциклових навантаженнях.

2. Міцність залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, зростає на 8 – 22% порівняно з балками без підсилення. Підсилені залізобетонні балки мають підвищену тріщиностійкість: у них повільно зростала ширина розкриття тріщин, а їх величина була найменшою. Момент утворення перших тріщин у підсилених балках віддаляється на 33 – 67 %, порівняно з контрольними, що дозволяє поліпшити експлуатаційні характеристики балок в агресивному середовищі. Ширина розкриття тріщин у підсилених балках на 22 – 38 % менша, ніж у контрольних.

3. Використання полімерної композиції суттєво збільшувало жорсткість балок. Прогини підсилених балок зменшилися на 10 – 19 % порівняно з контрольними.

4. Підсилені балки за дії малоциклових навантажень працюють аналогічно до тих, що випробувано без підсилення, при цьому мають більшу несучу здатність.

5. Виконані експериментальні дослідження дозволяють рекомендувати полімерну композицію для підсилення залізобетонних конструкцій.



### Література

1. Хило, Е.Р. Усиление строительных конструкций / Е.Р. Хило, Б.С. Попович. – Львов: Вища шк.: Издательство при Львовском университете, 1985. – 156 с.
2. Соломатов, В.И. Бетоны на ВНВ, модифицированные ацетоноформальдегидной смолой / В.И. Соломатов, В.И. Наназашвили // Бетон и железобетон. – 1990. – № 10. – 1990. – С. 17 – 19.
3. Боярчук, Б.А. Міцність, тріциностійкість та деформації залізобетонних конструкцій при різних способах підсилення розтягнутої зони: дис. канд. техн. наук. – Луцьк, 2003. – 156 с.
4. Смолянинов, М.Ю. Повышение прочности и трещиностойкости железобетонных элементов, усиленных акриловым полимерраствором, при действии кратковременных статических и многократно повторных нагружений : дис. канд. техн. наук. – Харьков, 2007. – 216 с.
5. Шладиц, Ф. Несущая способность железобетонных плит с текстильбетонным армированием / Ф. Шладиц, Э. Лоренц, М. Курбах // Бетон и железобетон. – 2012. – № 4. – С. 25 – 30.
6. Климпуш, М.Д. Міцність, витривалість та деформативність залізобетонних згинальних елементів, підсилені накладними композитними стрічками: дис. канд. техн. наук. – Львів, 2010. – 262 с.
7. Борисюк, О.П. Міцність, жорсткість та тріциностійкість нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилені композитними матеріалами / О.П. Борисюк, О.П. Конончук // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Випуск 2 (32), Т.2. – С. 3 – 10.
8. Веселовский, Р.А. Восстановление эксплуатационных свойств строительных конструкций с применением новых полимерных материалов / Р.А. Веселовский, Е.Н. Шаля // Новини науки Придніпров'я. Сер.: Інженерні дисципліни, 2004. – №4. – С. 12 – 13.
9. Бабич, Є.М. Особливості роботи залізобетонних балок, підсилені полімерною композицією «Силор» / Є.М. Бабич, В.С. Довбенко // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. наук. праць. – Київ: ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74, кн. 2. – С. 19 – 27.
10. Довбенко, В.С. Дослідження роботи залізобетонних балок, підсилені полімерною композицією при дії малоциклових навантажень / В.С. Довбенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: Вид-во НУВГП, 2011. – Вип. 22. – С. 787 – 794.

Надійшла до редакції 16.10.2013

© Є.М. Бабич, В.С. Довбенко