

УДК 624.012.035

**НАПРУЖЕНО–ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ПІДСИЛЕНИХ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ СТАЛЕФІБРОБЕТОНОМ І КОМПОЗИТАМИ ПРИ ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

**НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК УСИЛЕННЫХ ПОД НАГРУЗКОЙ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОМ И КОМПОЗИТАМИ ПРИ ДЕЙСТВИИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗОК**

**REINFORCED CONCRETE BEAMS STRESS-STRAIN STRENGTHENED UNDER LOADING STEELFIBERCONCRETE AND COMPOSITES AT ACTION LOWCYCLE LOAD**

**Борисюк О.П., к.т.н., проф., Зятюк Ю.Ю., аспірант** (Національний університет водного господарства та природокористування м. Рівне).

**Борисюк А.П., к.т.н., проф., Зятюк Ю.Ю., аспірант** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования г. Ровно).

**Borysyuk A.P., candidate of engineering sciences, associate professor, Ziatyuk Y.Y., postgraduate** (National university of water management and nature resources used, Rivne).

**Наведено дослідження одночасного підсилення залізобетонних балок під навантаженням наклеєними композитами у вигляді вуглецевих волокон в розтягнутій зоні та сталевібробетонном з металевою фіброю у стиснутій зоні.**

**Приведено исследование одновременного усиления железобетонных балок под нагрузкой наклеенными композитами в виде углеродных волокон в растянутой зоне и сталевібробетонном с металлической фиброй в сжатой зоне.**

**Reinforced concrete beams simultaneous strengthening under load research is resulted by the glued on compos as carbon fibres in the stretched area, and steelfiberconcrete with metallic fiber in the compressed zones.**

**Ключові слова :**

Підсилення, під навантаженням, балка, сталевібробетон, композити.

Усиление, под нагрузкой, балка, сталевібробетон, композити.

Strengthen, under load, beam, steelfiberconcrete, composites.

**Вступ.** На сьогоднішній день найбільш поширеним матеріалом для об'єктів промислового, цивільного, сільськогосподарського, гідротехнічного, спеціального будівництва є залізобетон.

Всі зовнішні навантаження періодично повторюються, тобто мають змінний характер як у часі, так і за своїм значенням. Під малоцикловими навантаженнями розуміють навантаження, кількість повторення яких за граничний термін служби складає десятки, сотні, а деколи й тисячі разів. Серед зовнішніх впливів найбільш значною є частка малоциклових навантажень (вітрове, снігове, навантаження від ваги людей, меблів, складованих матеріалів і т.д.). У кожному випадку дія малоциклових навантажень спричиняє специфічні особливості деформування та руйнування конструкцій і матеріалів [1].

Існує багато причин, при яких необхідно виконувати ремонт існуючих залізобетонних елементів. У кожному конкретному випадку при проектуванні підсилення конструкцій вирішуються два завдання, одне з яких пов'язане із забезпеченням необхідної міцності та стійкості будівель і споруд, а друге - з прийняттям найкращого економічного рішення, яке досягається техніко-економічним порівнянням різних варіантів підсилення та швидкістю виконання робіт [2].

Економічна доцільність реконструкції забезпечується за рахунок зменшення капітальних вкладень, витрат та інтенсивність використання матеріальних, трудових, енергетичних ресурсів. Зменшення термінів виконання робіт порівняно з новим будівництвом [3].

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Дослідженню підсилення залізобетонних елементів від різноманітних силових впливів свої роботи присвятили: Б.А.Ашимов, А.Я. Барашиков, Є.М. Бабич, А.М. Бамбура, В.В.Білозір, З.Я. Бліхарський, Б.А. Боярчук, О.І. Валовой, І.О. Валовой, О.Б.Голишев, О.Д.Журавський, І.В. Задорожнікова, В.Г. Кваша, М.Д. Климпуш, А.І. Мальганов, І.В. Мельник, А.Я. Мурин, О.П. Перлова, Я.В. Римар, М.Ю. Смолянінов, С.Д. Семенюк, О.П. Сунак, та багато інших.

Для підсилення стиснутої зони залізобетонних елементів ефективним методом є використання високоміцних матеріалів, таких як сталеві фібробетон та полімербетон. *Переваги застосування сталеві фібри* - підвищує міцність бетону на згині і зріз; зменшується час на монтаж арматури; збільшується вібраційна стійкість бетону; знижує масу бетонних виробів; скорочує час первинного і остаточного твердіння на 25 %; збільшує міцність бетону в середньому до 20%. *Недоліки застосування сталеві фібри* - катодний ефект; нестійкість до агресивного середовища цементних розчинів[4].

При підсиленні розтягнутої зони залізобетонних елементів, значне підвищення несучої здатності отримують при наклеєні композитних матеріалів FRP. *Переваги композитних матеріалів* - корозійна стійкість; у 10 разів більша міцність; легкість, простота використання; низька вартість робочої сили; зручність транспортування; робота без рихтувань; відсутність

розмірних обмежень і стиків за довжиною до 250м; висока міцність; можливість використання в конструкціях з різних матеріалів; з'єднання з конструкцією лише за допомогою клею. *Недоліки композитних матеріалів* - відносно висока вартість матеріалу; низька міцність у поперечному до волокон напрямі [5].

І.В. Мельником та Р.З. Добрянським проведено ряд досліджень, що стосуються підсилення вуглепластиками згинальних залізобетонних елементів при різних рівнях попереднього навантаження. Чим вищий рівень попереднього завантаження до підсилення балок, тим менша їх міцність, жорсткість і тріщиностійкість [6, 7].

Я.В. Римар досліджував залізобетонні балки до підсилення та підсиленіх наروضуванням перетину арматури під навантаженням у розтягнутій зоні. Ефект підсилення є тим вищий, чим менші напруження в робочій арматурі у момент підсилення [8].

В роботі Б.А. Боярчука було передбачено два випадки підсилення: без попереднього навантаження; та підсилення під навантаженням із зусиллям 0,6...0,7 від руйнівного. У порівнянні з непідсиленими зразками, усі способи підсилення збільшують несучу здатність у 1,3...1,6 рази, а тріщиноутворення приблизно на 30 % [9].

Проведені дослідження під керівництвом Д.Н. Лазоновського, встановило вплив напружено-деформованого стану підсиленіх балок на міцність жорсткість та тріщиностійкість. Підвищення попереднього навантаження на балку, під час підсилення, підвищує несучу здатність балки в порівнянні з балкою без попереднього навантаження [10].

Дослідження Д.І. Дубіжанського були спрямовані на вивчення впливу посилення залізобетонною обоймою, при дії навантаження різної інтенсивності. Встановлено, що в балках підсиленіх при дії навантаження  $0,5M_{u0}^{exp}$ , текучість в обох шарах арматури наступала майже одночасно, При дії навантаження  $0,3M_{u0}^{exp}$  додаткова арматура обойми першою досягала напруження межі текучості, і навпаки, при підсиленні при  $0,7$  і  $0,9M_{u0}^{exp}$ , напружень межі текучості першою досягала арматура основного перерізу. Автором було встановлено, що максимальний ефект підсилення не залежить від діючого рівня навантаження при підсиленні, а залежить лише від конструкції обойми підсилення [11].

При  $\eta_{сус} \leq 0,3$  відбувається ущільнення структури бетону, що призводить до збільшення його міцності. При  $0,43 < \eta_{сус} \leq 0,85$  процеси ущільнення бетону продовжуються за рахунок утворення мікротріщин, а при  $\eta_{сус} > 0,85$  відбувається розущільнення бетону внаслідок розвитку нових мікротріщин та перетворення їх в макротріщини, що спричиняє малоциклову втомленість бетону, тобто його руйнування.

Встановлено, що повторні малоциклові навантаження експлуатаційних рівнів, які не перевищують 0,6 від руйнівного навантаження, призводять до збільшення в нормальних перерізах елементів повних і залишкових

деформацій в стиснутому бетоні і розтягнутій арматурі та прогини і ширину розкриття тріщин. Стабілізація названих процесів відбувається після п'яти – семи циклів повторного навантаження – розвантаження [12].

Досліди проведенні А.П. Погореляком свідчать, що малоциклові навантаження з верхнім рівнем  $\eta_p^{top} \leq 0,7$  сприяють підвищенню міцності балок по похилих перерізах, але збільшують ширину розкриття похилих тріщин у 2...2,5 рази [13].

При повторних навантаженнях експлуатаційних рівнів (60 ... 70 % від руйнівних) після п'яти – семи циклів відбувається стабілізація напружено-деформаційного стану елементів. Як показали подальші дослідження, при збільшенні рівня малоциклових навантажень вище  $0,6P_{cr}$  відбувається різке збільшення ширини розкриття тріщин [14, 15].

Прийнятій рівень навантаження  $0,6P_u$  у більшості випадків відповідає значенню навантажень в процесі експлуатації балок та плит покриттів і перекриттів [1].

Тому врахувавши дані попередніх досліджень було прийнято рішення підсилювати залізобетонні балки при рівні  $0,6M_u$  від руйнівного. В цьому випадку є найбільший ефект підсилення від рівня попереднього навантаження на несучу здатність експериментальних балок.

Більшість науковців акцентують увагу на тому, що введення в бетон хаотично орієнтованих коротких волокон мало впливає на міцність сталевібробетону на стиск, та приводить до суттєвого збільшення міцності на розтяг та згин. Тому було прийнято рішення стиснути зону половини балок підсилити дрібнозернистим бетоном (Б), іншу тим же бетоном тільки з додаванням сталевіброфібри (3% за масою СФБ).

Підсилення залізобетонних балкових конструкцій достатньо глибоко вивчене. Різними авторами виконано багато експериментально-теоретичних досліджень та практично перевірено різні способи підсилення. Однак дослідження особливостей роботи підсилених під навантаженням залізобетонних конструкцій за дії малоциклових навантажень, що найбільше відповідає реальній роботі конструкцій, досліджено не достатньо. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю удосконалення методики розрахунку залізобетонних згинальних елементів, підсилених одночасно в стиснутій та розтягнутій зонах за дії малоциклових навантажень.

**Мета і завдання дослідження** отримати дані про роботу залізобетонних балок підсилених під навантаженням одночасно у стиснутій і розтягнутій зоні при дії малоциклових навантажень.

**Об'єкт досліджень:** підсилені залізобетонні згинальні елементи.

**Матеріали.** Залізобетонні балки з розмірами  $100 \times 200 \times 2000$  мм, бетон класу С16/20. Поздовжня робоча стержнева арматура  $2\text{Ø}10$  А 500С та поперечна арматура  $\text{Ø}6$  А240С з кроком 50 мм, крім зони чистого згину. Верхня монтажна арматура із дроту  $\text{Ø}4$  Вр-І. Підсилення розтягнутої зони - вуглепластикові стрічки Sika® CarboDur® S-512 та полотно SikaWrap®-230

C/45 [3,4,5]. Підсилення стиснутої зони - половину балок підсилювали дрібнозернистим бетоном(Б) C16/20, іншу сталефібробетоном(СФБ 3%) товщиною 50мм. Випробовування конструкцій виконували за методикою[6].

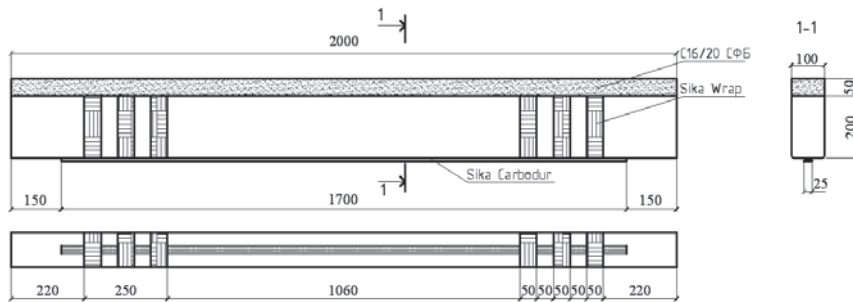


Рис.1. Конструкція підсилення дослідних балок

**Основна частина і результати досліджень.** На першому етапі випробовували балки на однократне статичне навантаження (БО-1 та БО-2). На другому етапі випробовували балки (БЦ-5, БЦ-6,) на малоциклові навантаження. Після випробовування малоцикловим навантаженням балки БЦ-5, БЦ-6 підсилювали під навантаженням  $0,6F_u$  (від руйнуючого навантаження балок БО-1, БО-2) в установці і повторно випробовувались на малоциклові навантаження. Навантаження під час підсилення створювали гвинтовими домкратами. Після витримки 28 діб гвинтовий домкрат заміняли, установлювали прилади та тензодатчики на тіло балки [16].

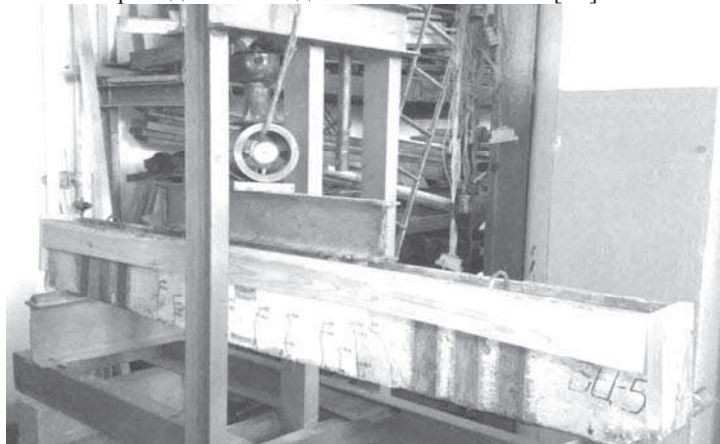


Рис.2.Підсилення дослідної балки БЦ-5 під навантаженням  $0,6F_u$



Рис.3. Підсилення дослідної балки БЦ-6 під навантаженням  $0,6F_u$

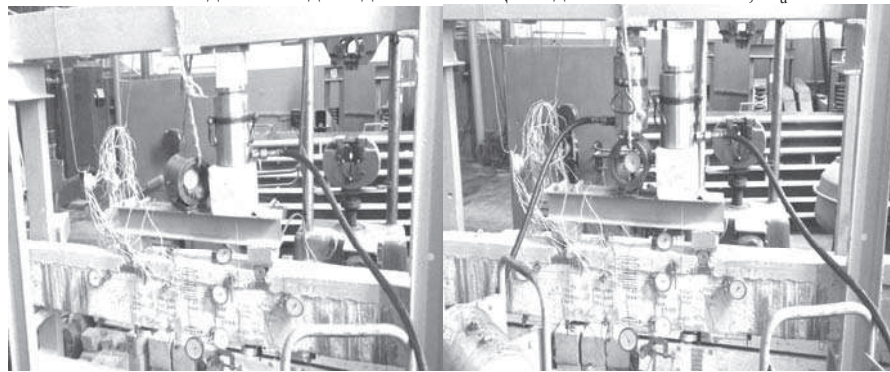


Рис.4. Підготовка дослідної балки БЦП<sub>0,6</sub>-6<sub>сф6</sub> до випробування - заміна домкрату

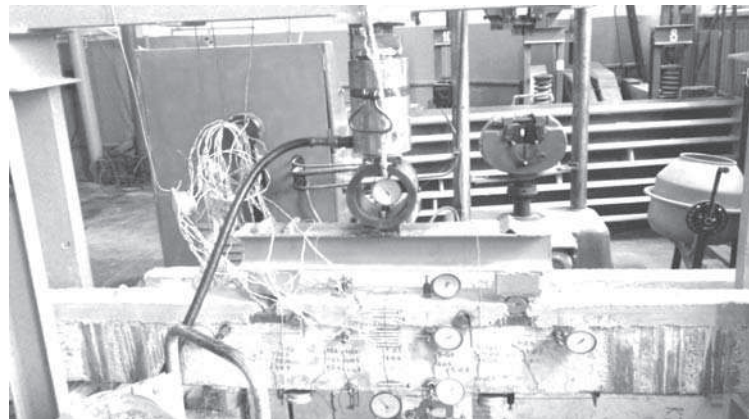


Рис.5. Загальний вигляд випробування підсилених балок під навантаженням

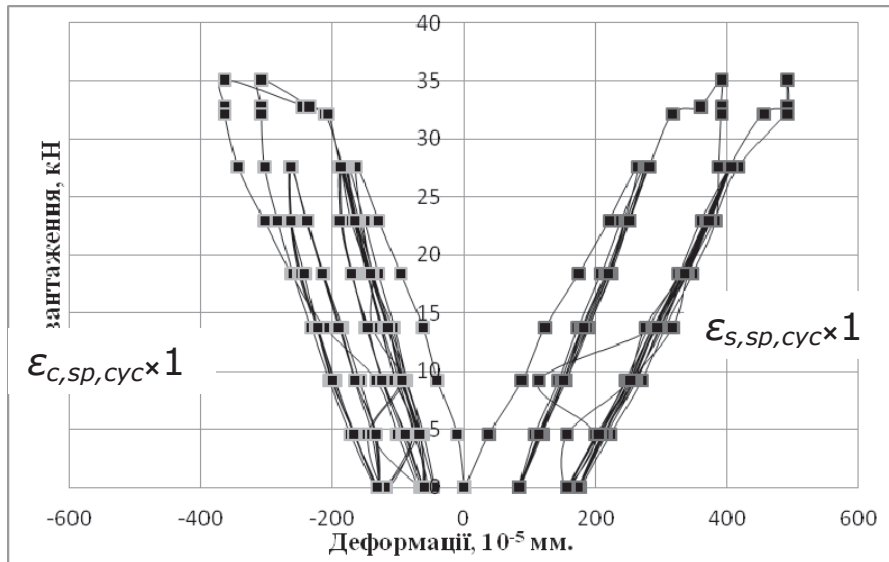


Рис. 6. Зміна деформацій розтягнутої арматури та стиснутого бетону в балці БЦ-5 до підсилення при повторних навантаженнях

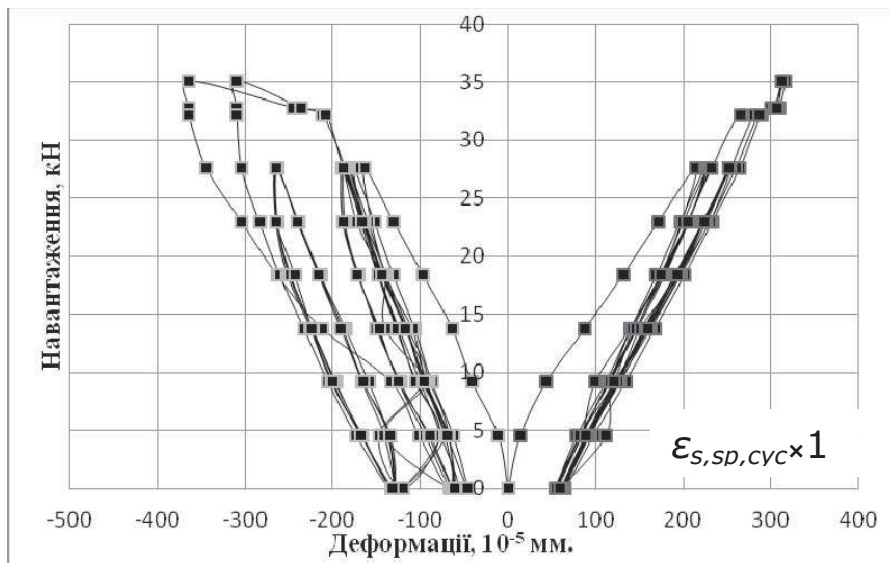


Рис. 7. Зміна деформацій розтягнутої арматури та стиснутого бетону в балці БЦ-6 до підсилення при повторних навантаженнях

Матеріали підсилення майже відразу вступає в роботу під час збільшення навантаження. Цим можна пояснити стрибки на діаграмі роботи бетону підсилення та вуглепластиків [17, 18].

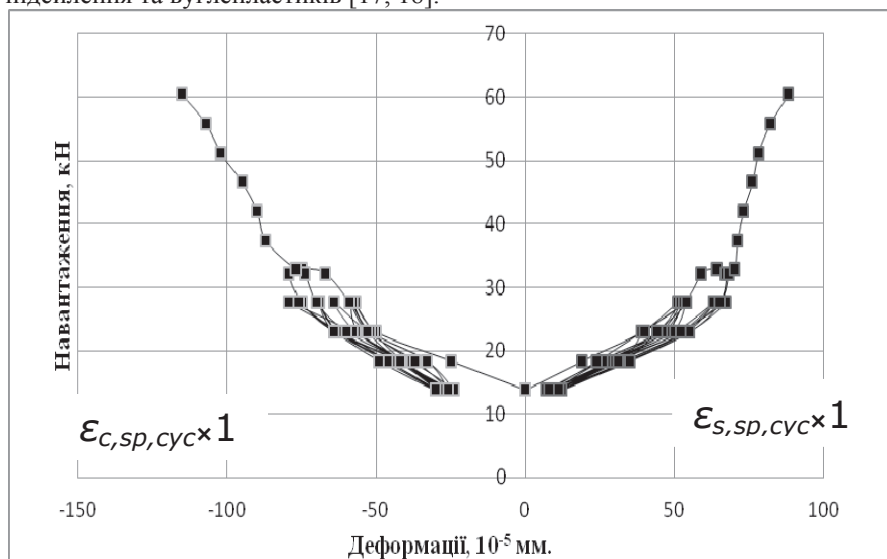


Рис.8. Зміна деформацій розтягнутої арматури та стиснутого бетону в балці БЦП<sub>0,6</sub>-6<sub>СФБ</sub> після підсилення (без залишкових деформацій)

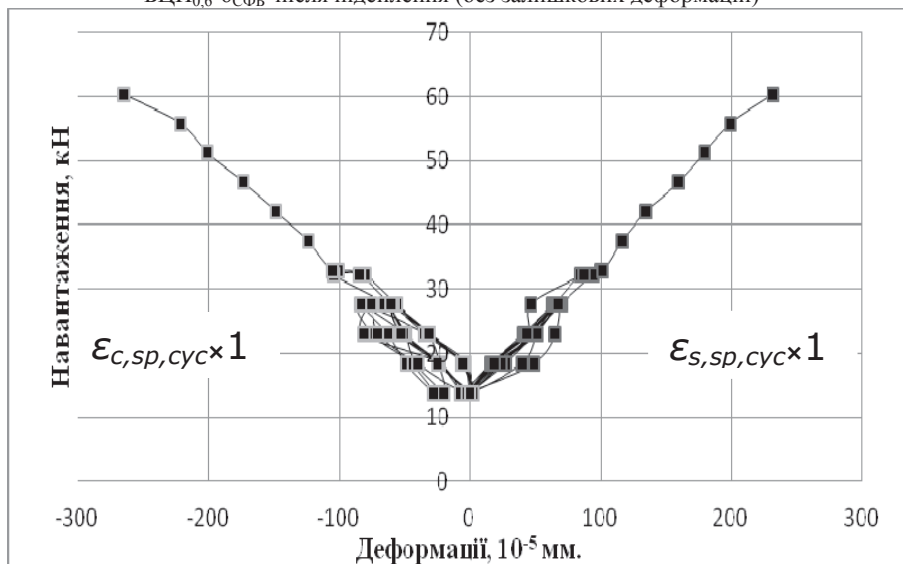


Рис.9. Зміна деформацій розтягнутої арматури та стиснутого бетону в балці БЦП<sub>0,6</sub>-5<sub>Б</sub> після підсилення (без залишкових деформацій)



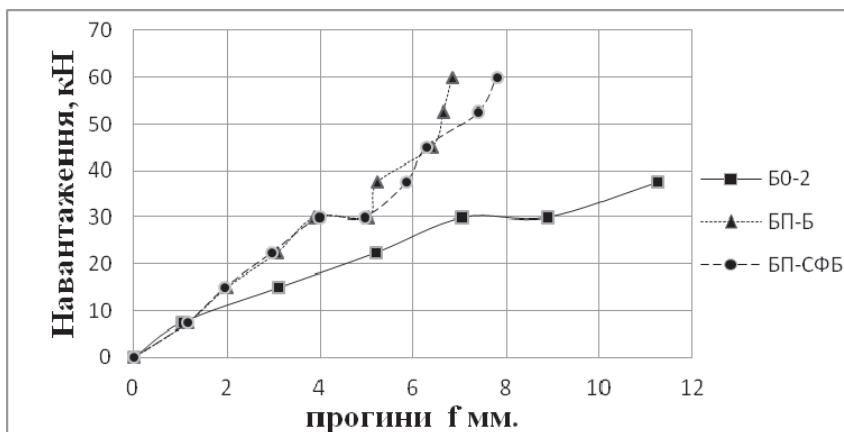


Рис.10. Зміна прогинів балок в не підсиленій B0-2 та підсилених балках B1-Б та B1-СФБ

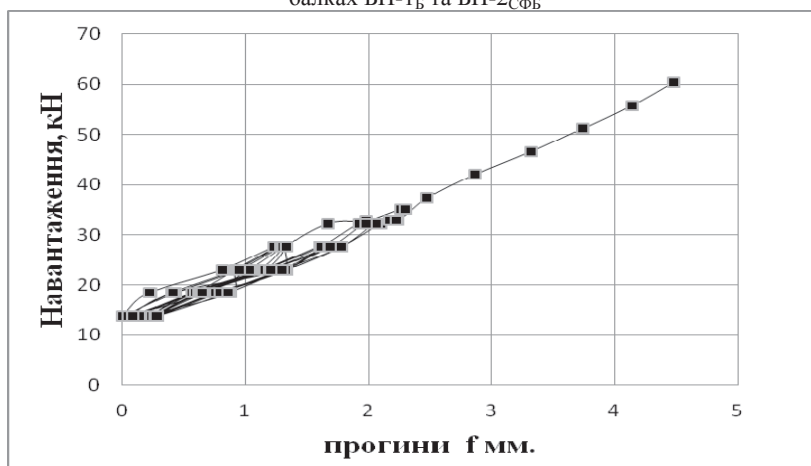


Рис.11. Зміна прогинів балки B1-СФБ (0.6-6) при повторних навантаженнях:

Непідсилені балки зруйнувалися за нормальними перерізами. Частина підсилених балок зруйнувалися за похилими перерізами - в при опорній ділянці відбувається утворення похилої тріщини другого типу. Це пояснюється розшаруванням шарів підсилення на опорах, значним збільшенням міцності нормальних перерізів і недостатнім збільшенням міцності похилих перерізів. Частина балок зруйнувалась відривом стрічки. При досягненні граничного навантаження по грані стрічки та балки відбулося зминання волокон полотна анкерування, відбувся стрімкий відрив стрічки на ділянках між точкою прикладання сили і опорою. Стрімке розкриття тріщин з подальшим зростанням прогину, відшарування та зминання верхнього шару підсилення.

На експлуатаційній стадії роботи основні конструкції балок та шари підсилення працюють спільно. На останніх стадіях напружено-деформованого стану виникає розшарування.

Таблиця.1

Характер руйнування та несуча здатність балок

Тип балки	Величина згинального моменту перед руйнуванням М,кНм	Характер руйнування
БЦП <sub>0,6-5</sub> Б; БЦП-1 <sub>СФБ</sub> ; БП-1 <sub>СФБ</sub>	22,72 21,96 20,91	за похилими перерізами
БП-2 <sub>Б</sub> ; БЦП <sub>0,6-6</sub> СФБ; БЦП-2 <sub>Б</sub>	22,46 22,59 21,10*	за нормальними перерізами (відрив стрічки)
БО-1; БО-2; БЦ-3; БЦ-4	14,4 14,1 13,8 13,5	за нормальними перерізами

**Висновки.** Підсилені балки показали підвищені експлуатаційні якості у порівнянні з непідсиленими. Зусилля тріщиностійкості для балок збільшилося від 80 ...100%. Несуча здатність підсиленних залізобетонних балок під навантаженням БЦП<sub>0,6-5</sub> Б, БЦП<sub>0,6-6</sub> СФБ, на 56% більша ніж в непідсиленних залізобетонних балок при одноразовому навантаженні. Прогин залізобетонних балок підсиленних під навантаженням на 48 % менший ніж в непідсиленних балок при повторних навантаженнях.

Підвищення несучої здатності для балок підсиленних під навантаженням можна пояснити більш високим напруженням в арматурі перед підсиленням, в порівнянні з балками підсиленними без попереднього навантаження. При підсиленні балок за дії навантаження з'являється ефект попереднього напруження арматури основного перерізу. Але це підсилення під навантаженням відповідно збільшує ширину розкриття тріщин.

1. Бабич Є.М., Крусь Ю.О. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень. – Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999. – 119 с.
2. Консервація і реставрація пам'яток архітектури. Методичний посібник, - Київ – Львів: -Укрреставрація, 1996. – 586с.
3. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будинків та споруд: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 108с.
4. Зятюк Ю.Ю. Исследование деформационных характеристик фибробетона со стальной фиброй / Ю.Ю.Зятюк// Весник Белорусско-Российского университета, УПКП МЭУП.–№ 3 (52). Могилев.– 2016. – С.160-168.
5. Зятюк Ю.Ю. Операційність

технології виконання робіт при підсиленні дослідних залізобетонних зразків (матеріалами фірми «Sika») / Ю.Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2016. – вип. 32. – С. 466 – 475.

**6.** Мельник І.В. Експериментальні дослідження міцності, жорсткості і тріщиностійкості залізобетонних балок, підсиленних вуглепластиками при різних рівнях попереднього навантаження / І.В. Мельник, Р.З. Добрянський, Н.Б. Давидовський // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2011. – Вип. 22. – С. 814 – 821.

**7.** Мельник І.В. Міцність і деформативність залізобетонних балок підсиленних конструкційними композитами при різних умовах попереднього завантаження / І.В. Мельник, Р.З. Добрянський, А.Я. Мурин // Зб. наук. праць "Будівельні конструкції". – Київ, 2005. – Вип. 56. – С. 121 – 129.

**8.** Римар Я.В. Міцність та деформативність залізобетонних балок, підсиленних під навантаженням нарощуванням арматури: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Я.В. Римар // Львів: НУ "Львівська політехніка", 2010. – 20 с.

**9.** Боярчук Б.А. Міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних конструкцій при різних способах підсилення розтягнутої зони: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Б.А. Боярчук // Луцьк, 2003. – 157 с.

**10.** Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Издательство Полоцкого гос ун-та, 1998. – 240 с.

**11.** Дубіжанський Д.І. Міцність та деформативність залізобетонних балок, посиленних залізобетонною обоймою під навантаженням: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Д.І. Дубіжанський // Львів, 2013. – 183 с.

**12.** Бабич Є.М. Міцність і деформативність важкого бетону при малоцикловому стисненні / Є.М. Бабич, Н.І. Ільчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: УДУВГП, 2003. – Вип. 9. – С. 116 – 123.

**13.** Погореляк А.П. Исследование работы железобетонных изгибаемых элементов на поперечную силу при многократно повторных нагружениях: Дис. ...канд. техн. Наук. – Ровно, 1981. – 174с.

**14.** Коваль П.М. Малоциклові навантаження в роботі автодорожніх мостів / Коваль П.М., Полюга Р.І. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2008. – Вип. 17. – С. 341 – 347.

**15.** Полюга Р.І. Тріщиностійкість залізобетонних балкових конструкцій автодорожніх мостів в умовах малоциклових навантажень: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Р.І. Полюга // Львів., НУ "Львівська політехніка", 2006. – 18 с.

**16.** Борисюк О.П., Зятюк Ю.Ю. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсиленних у стиснутій і розтягнутій зоні / О.П. Борисюк, Ю.Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2013. – вип. 27. – С. 27 – 33.

**17.** Зятюк Ю.Ю. Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок підсиленних в стиснутій та розтягнутій зонах / Ю.Ю. Зятюк // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. Збірник / Відпов. ред. М.М. Осетрін. – К., КНУБА, 2016. – Вип. 61 (спеціальний) – С. 216 – 222.

**18.** Зятюк Ю.Ю. Робота залізобетонних балок підсиленних у стиснутій та розтягнутій зонах при дії малоциклових навантажень. / Ю.Ю. Зятюк // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – Випуск 5. – С. 215 -223.