

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ СИСТЕМИ «МЕТАЛЕВА ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНА ОБОЙМА ПІДСИЛЕННЯ - ПОШКОДЖЕНА ЗАЛІЗОБЕТОННА БАЛКА»

Карпюк В. М., д.т.н., професор,
ORCID: 0000-0002-4088-6489

Даниленко Д.С., аспірант,
ddsnauka@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7517-5767

Карпюк І.А., к.т.н., доцент,
ORCID: 0000-0003-3437-5882

Даниленко А.В., к.т.н., асистент,
ORCID: 0000-0002-0204-6972

Сьоміна Ю.А., к.т.н., асистент,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0002-6330-0137

Анотація. Представлені результати системних експериментальних досліджень несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості пошкоджених залізобетонних балок, підсиленних попередньо напруженими металевими обоймами, при статичному та малоцикловому знакозмінному навантаженні високих рівнів. Зокрема, наведені експериментально-статистичні залежності міцності похилих перерізів (руйнуючої поперечної сили), стріли прогинів та ширини розкриття нормальних і похилих тріщин перед руйнуванням балок, довжини проекції небезпечних похилих тріщин на повздовжню вісь та середньої відстані між нормальними тріщинами по довжині елементів від конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії. Усі дослідні зразки-балки були виготовлені та випробувані згідно з теорією планування експерименту за Д-оптимальним планом Бокса В4.

Ключові слова: пошкоджена силовими тріщинами залізобетонна балка, металева попередньо напружена обойма, малоциклове знакозмінне навантаження.

Вступ. Підвищення сейсмічності територій, на яких розташовані будівлі та споруди, їхнього фізичного зносу з накопиченням пошкоджень і зміною функціонального призначення зі збільшенням навантажень на них потребує прийняття нестандартних рішень. Заміна пошкоджених залізобетонних конструкцій вимагає значних трудових ресурсів, фінансових витрат і зупинки виробництва на тривалий час. Разом з тим, аналіз пошкоджень, що характеризують «життєдіяльність» прогінної залізобетонної конструкції, споруди чи будівлі, в цілому, показав, що у процесі її експлуатації відбувається значне руйнування захисного шару бетону, корозія арматури, утворення і надмірне розкриття тріщин, досягнення недопустимих прогинів тощо.

Накопичений досвід показав, що експлуатацію і «життєвий цикл» пошкоджених конструкцій можна продовжити за рахунок їх підсилення і відновлення у процесі проведення капітального ремонту без зупинки технологічного процесу.

Підсилення залізобетонних конструкцій за допомогою армованих бетонних або розчинних сумішей окрім збільшення їх ваги та інших відомих незручностей має такі недоліки: включення системи підсилення в сумісну роботу з пошкодженим елементом можливе тільки після набору достатньої міцності матеріалами нарощування перерізів; відсутність повного контролю за сумісною роботою пошкодженої конструкції та системи підсилення.

Останнім часом все частіше застосовується підсилення конструкцій наклеєними композитними матеріалами. Проте, висока вартість цих матеріалів, відсутність прямого контролю за якістю підсилення, чутливість до температурних впливів, можливість крихкого

руйнування приопорних ділянок та недосконалість існуючих методів їх розрахунку стримують можливість більш широкого використання цього прогресивного, в цілому, методу підсилення пошкоджених конструкцій.

Більшість прогінних залізобетонних конструкцій під час експлуатації зазнає дії циклічних або малоциклових повторних та знакозмінних навантажень, які виникають у межах експлуатаційного рівня, а інколи й перевищують його. Зміна знака навантаження, його рівня та невизначене повторення в процесі експлуатації часто призводить до наслідків, якісно відмінних від отриманих при розрахунку на стале навантаження одного знаку максимальної інтенсивності, на яке орієнтовані більшість діючих норм проектування. Підсилення пошкоджених наскрізними нормальними і похилими перехресними надмірно розкритими тріщинами балкових залізобетонних конструкцій, доведених в процесі вказаної вище експлуатації до граничного або передаварійного стану, за дії зростаючого циклічного навантаження високих рівнів без зупинки технологічного процесу виробництва за допомогою попередньо напружених металевих обойм є безальтернативним. Проте, проектування такого підсилення стримується відсутністю нормативної методики та чітких рекомендацій в авторських методиках, які адекватно б відображали реальний напружено-деформований стан як пошкодженої конструкції, так і елементів підсилення. Цим і зумовлена актуальність даної роботи.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Експериментально [1] встановлено, малоциклове знакозмінне та знакопостійне навантаження високих рівнів не тільки зменшує несучу здатність дослідних зразків – залізобетонних балок до 20% та їхню тріщиностійкість, суттєво збільшує ширину розкриття нормальних і, особливо, похилих тріщин, величину прогинів до 35%, а також змінює характер їх руйнування порівняно з одноразовим статичним пропорційно зростаючим навантаженням. При багатократному циклічному навантаженні за несприятливих умов абсолютна межа витривалості бетону і арматури зменшується до 50% від їх розрахункового опору, внаслідок чого ще більше зменшується тріщиностійкість та несуча здатність таких конструкцій, збільшується їхня деформативність та прискорюється процес руйнування.

Очевидно, що для підсилення залізобетонних конструкцій, доведених в таких умовах експлуатації до граничного або аварійного стану, слід використовувати метал, як один із найбільш вивчених матеріалів зі стабільними міцнісними і фізико-хімічними показниками, які легко контролювати. При цьому, наявність пластичних властивостей у сталі сприяє перерозподілу внутрішніх зусиль між елементами підсилення та пошкодженою конструкцією.

Розглянемо існуючі способи підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій з використанням сталевих пристроїв. Відомий спосіб підсилення залізобетонної конструкції [2] шляхом прикріплення додаткової арматури до оголеної робочої арматури розтягнутої зони, попереднього її натягу "на бетон" і наступного обетонування. Проте, у даному способі попередньо стискається розтягнута зона, а тому збільшується опірність тільки розтягнутої зони елемента, що згинається, тобто має місце неповне підсилення пошкодженої конструкції, що веде до часткового і не завжди прийнятного (при підвищених статичних, пульсуючих або сейсмічних впливах) збільшення несучої здатності конструкції, що підсилюється.

Серед багатьох інших способів заслуговує уваги спосіб [3], який передбачає закріплення елемента підсилення в стиснутій зоні залізобетонної балки і подальше двостадійне його попереднє стиснення: до і після попереднього напруження елемента підсилення розтягнутої зони. Однак, даний спосіб дозволяє підсилити тільки нормальні перерізи цільної (без тріщин) залізобетонної балки на дію тільки знакопостійного поперечного навантаження або згинального моменту в головній вертикальній силовій площині і не призводить до підсилення похилих перерізів і приопорних ділянок, в цілому, на дію того ж знакопостійного навантаження. А при впливі знакозмінного поперечного навантаження (наприклад, під час землетрусу) цей спосіб, навпаки, може призвести до

передчасного руйнування як за нормальними, попередньо розтягнутими верхніми елементами підсилення перерізами, так і за перехресними похилими перерізами.

Одним із перших у Радянському Союзі проф. Пинаджян В.В. [4] вивчав можливість застосування різних металевих пристроїв для підсилення прогінних залізобетонних конструкцій. Зокрема, він встановив, що підсилення пошкодженої таврової залізобетонної балки під навантаженням армованою розчинною "сорочкою" підвищило її несучу здатність на 42%, а підсилення такої ж балки за допомогою попередньо напружених поздовжніх сталевих стержнів на 8%; підсилення її за допомогою двох описаних вище пристроїв одночасно – на 71%, а підсилення балки тільки на приопорних ділянках попередньо напруженими U-подібними хомутами – на 10%. Для більш надійного з'єднання старого з новим бетоном автор [4] рекомендує встановлювати додаткові металеві зв'язки для запобігання їх взаємного зсуву. Він стверджував, що підсилення розтягнутої зони конструкції попередньо напруженою поздовжньою арматурою у вигляді шпренгельної затяжки є одним із найбільш ефективних пристроїв.

Цей висновок підтвердили випробовування [5] залізобетонних балок, підсилених попередньо напруженими металевими затяжками, які показали одночасне збільшення їхньої несучої здатності та жорсткості зі збільшенням поперечного перерізу затяжок. Випробовування автором [5] підсилених двопролітних балок показали, що попередньо напружені затяжки перетворювали балки в позацентрово стиснуті елементи, а також виявили залежність перерозподілу внутрішніх зусиль у балці від величини стискаючих зусиль у затяжках. Ці випробовування також підтвердили доцільність створення попереднього напруження і у вертикальних поперечних стержнях.

Детальна кваліфікація найбільш розповсюджених причин та технічних станів будівельних конструкцій, які підкреслюють необхідність їх підсилення, а також методів їх здійснення наведена у роботі [6]. Вона містить у собі повний набір різноманітних пристроїв підсилення залізобетонних конструкцій, завдяки чому стала незамінною книгою багатьох фахівців у галузі реконструкції. Проте, як виявилось, наведений у [6] атлас схем і креслень все ж не містить пристроїв для підсилення аварійних конструкцій за дії циклічного знакозмінного або його зростаючого навантаження.

Відома конструкція пристрою [7] для підсилення залізобетонної балки з приклеєним до її нижньої грані металевим листом і пов'язаними з нею попередньо напруженими горизонтальними елементами у вигляді двох гнучких тяжів на бічних поверхах, напруження в яких створюється шляхом затягування (напруження) вертикальних елементів, заанкерених у верхній стиснутій зоні. Однак, за допомогою описаної вище конструкції можна підсилити тільки нижню розтягнуту зону та приопорні ділянки балки за сталого або знакопостійного циклічного поперечного навантаження.

Оригінальний пристрій для підсилення будівельних конструкцій, що згинаються [8], містить жорсткий хвилеподібний елемент підсилення, напружені вертикальні хомути, напружену арматуру і опорні котки. Елемент підсилення прикріплений кінцями на опорах і в місцях дотику до підсилюваної конструкції, що згинається, з боку стиснутої зони. Поздовжня напружена арматура закріплена в торцях конструкції, що підсилюється, а опорні котки розташовані між напруженою арматурою і розтягнутою гранню конструкції. Висота підйому гребенів хвилеподібного елемента підсилення виконана зі зменшенням від середини до кінців конструкції, що підсилюється з охопленням напруженої арматури між опорними котками. Хомут виготовлений у вигляді сережки з різьбовими ділянками на кінцях для гайок з установкою перемички. При закручуванні гайок відбувається натягування хомутів і арматури. Обтиснення конструкції здійснюють від її середини до країв. При цьому, верхня стиснута зона частково розвантажується, а в нижній арматурі підсилення створюється момент, протилежний за знаком моменту від зовнішнього навантаження. Отже, даний пристрій дозволяє підсилити верхню стиснуту і нижню розтягнуту зони, а також, частково, приопорні ділянки, внаслідок чого підвищується її несуча здатність, але за дії поперечного навантаження тільки одного знака.

Представляє інтерес підсилення залізобетонних стиснутих та зігнутих елементів за допомогою сталевих листів, прикріплених по їх боках болтовим з'єднанням [9]. У цій роботі автори встановили зв'язок між проковзуванням болтового з'єднання та несучою здатністю балки. Зважаючи на циклічний характер навантаження, автори [10, 11, 12] підкреслюють як позитивну якість роботи даного пристрою, так і пластичний характер руйнування підсиленої конструкції.

Проведені експериментальні дослідження [13] підсиленої шляхом приклеювання сталевих смуг на непошкоджену залізобетонну балку показали приріст її несучої здатності до 300%. При цьому, автори [13] продовжують дослідження по закріпленню кінців смуг підсилення з метою більш повного використання їх міцності та запобігання крихкого руйнування балки.

Автори [14] випробували чотири балки: одну – без підсилення; другу, підсилену знизу у розтягнутій зоні приклеєною сталеву смугу; третю, підсилену у стиснутій та розтягнутій зонах аналогічними сталевими смугами без приклеювання їх до тіла балки; четверту, підсилену такими ж смугами зверху і знизу, приклеєними до тіла балки за допомогою епоксидного клею. Усі підсилені балки мали однакове анкерне кріплення сталевих пластин на їх торцях. Відзначається підвищення несучої здатності на 130 ... 160%, зменшення деформативності підсилених на епоксидному клею балок і пластичний характер їх руйнування. А балка, підсилена металевими пластинами без їх приклеювання, працювала як балка із затяжкою і мала підвищену деформативність.

Експериментальні дослідження [15] трьох залізобетонних балок, підсилених сталевим листом, розташованим у розтягнутій зоні та прикріплених за допомогою конічних анкерів і епоксидного клею, показали підвищення несучої здатності до 48%. А в роботі [16] вказується на те, що застосування аналогічного пристрою підсилення (тільки з іншою конструкцією анкера) дало підвищення несучої здатності тільки на 10% порівняно з балкою без анкерного кріплення.

За результатами експериментальних досліджень пристрою підсилення зовнішньою стержнево-котковою шпренгельною системою залізобетонних балок авторами [17] було досягнуто збільшення їхньої несучої здатності до 4,5 разів та суттєво зменшення деформативності.

Будівельні конструкції в момент підсилення, в основному, знаходяться під навантаженням, від величини якого згідно [18] залежить надійність підсиленого залізобетонного елемента. У результаті досліджень напруженого стану залізобетонних балок, підсилених наросуванням розтягнутої стержневої арматури за дії навантаження авторами [19] були запропоновані дві нові методики оцінки надійності підсилених залізобетонних елементів.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У національних нормах проектування і відомих авторських методиках відсутні чіткі рекомендації з розрахунку сумісної роботи пошкоджених і доведених до граничного або аварійного стану прогінних залізобетонних конструкцій з елементами попередньо напружених металевих об'єктів.

Розрахунок металевих елементів підсилення залізобетонних конструкцій у авторських методиках здійснюється згідно існуючих положень чинних норм проектування вказаних конструкцій, у розрахункових формулах яких замість робочої, монтажної та поперечної арматури використовуються повздовжні, поперечні та похилі елементи підсилення без достатнього урахування їх взаємодії з пошкодженими конструкціями та реального їх технічного стану, вирівнювання, за потреби, рихтування та придання їм початкової форми у більшості випадків.

Аналіз наявних публікацій показав, що існуючі способи підсилення прогінних залізобетонних конструкцій мають наступні спільні ознаки:

- закріплення елементів підсилення на пошкодженій балці;

- створення попереднього напруження в ній (балці) в поздовжньому і вертикальному поперечному напрямку.

Пристрої, що використовуються для підсилення прогінних конструкцій, мають такі спільні ознаки:

- поздовжні елементи підсилення;
- поперечні вертикальні елементи підсилення;
- поперечні вертикальні елементи підсилення, з'єднані з поздовжніми елементами підсилення.

Недоліками описаних вище способів та пристроїв підсилення балкових залізобетонних конструкцій являються:

- посилення, в основному, нормальних (частіше) і похилих (рідше) перерізів цільної залізобетонної балки на дію тільки знакопостійного поперечного навантаження в головній площині. При впливі знакозмінного навантаження більшість існуючих способів та пристроїв може призвести до передчасного руйнування дослідних елементів;
- неспроможність відновити або підвищити, за потреби, несучу здатність аварійних або доведених до граничного стану балкових конструкцій за дії знакозмінного циклічного чи пульсуючого навантаження високих рівнів, або сейсмічних впливів, а також нездатність їх до перерозподілу внутрішніх зусиль в нерозрізних балках.

Порівняння наявних дослідних даних несучої здатності як звичайних, так і підсилених металевими обоймами пошкоджених наскрізними нормальними і перехресними похилими тріщинами залізобетонних балок за дії малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів з результатами розрахунків за існуючими авторськими методиками показало, в цілому, незадовільну їх збіжність як для звичайних, так і підсилених дослідних балок. При цьому, основна частина публікацій приходить на визначення несучої здатності нормальних перерізів звичайних і підсилених металевими елементами конструкцій за першими і другими групами граничних станів, в той час як міцність їхніх похилих перерізів та приопорних ділянок, в цілому, залишається ще далеко не вивченою.

Постановка завдання. Мета даної роботи полягає в експериментально-теоретичному дослідженні несучої здатності, тріщиностійкості та деформативності підсилених попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджених наскрізними нормальними і перехресними похилими тріщинами залізобетонних балок за дії малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів для вдосконалення існуючих та подальшої розробки нової фізичної і математичної моделей несучої здатності нормальних і похилих перерізів пошкоджених прогінних залізобетонних конструкцій, в тому числі під час бойових дій.

Завдання досліджень:

- розробити оригінальний спосіб відновлення та підсилення пошкоджених наскрізними нормальними і перехресними похилими тріщинами залізобетонних балок і пристрій для його здійснення, а також отримати, по можливості, відповідний патент на винахід;
- вивчити напружено-деформований стан, несучу здатність, ширину розкриття нормальних і похилих тріщин, прогинів, характеру руйнування звичайних цільних і підсилених попередньо напруженими металевими обоймами залізобетонних балок, які отримали суттєві пошкодження і були доведені майже до руйнування у попередніх дослідженнях за дії статичного і малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів з використанням теорії планування експерименту;
- дослідити вплив основних конструктивних чинників на несучу здатність приопорних ділянок дослідних звичайних та підсилених попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджених залізобетонних балок, їхню тріщиностійкість та деформативність за допомогою експериментально-статистичних залежностей, отриманих у процесі обробки одержаних даних;
- зробити порівняльний аналіз впливу основних конструктивних чинників на вказані параметри звичайних цільних і підсилених попередньо напруженими металевими обоймами

пошкоджених залізобетонних балок з урахуванням дії статичного і малоциклового знакозмінного навантаження.

Методика проведення експериментів, матеріалів та обладнання. В Одеській державній академії будівництва та архітектури проводяться системні експериментальні дослідження [1, 20, 21, 22] несучої здатності приопорних ділянок складнонапружених залізобетонних прогінних конструкцій. Для досягнення вказаної мети в академії були створені спосіб та пристрій для відновлення і підсилення пошкоджених залізобетонних балок, що знаходяться у передаварійному стані внаслідок їх поділу наскрізними нормальними і перехресними похилими тріщинами на окремі блоки, з'єднані між собою поздовжньою і поперечною арматурою за дії знакозмінного циклічного чи пульсуючого навантаження високих рівнів, а також підсилення звичайної прогінної залізобетонної конструкції, яка хоча й знаходиться у задовільному технічному стані, проте може зазнати вказаного навантаження або сейсмічних впливів [23]. Поставлена задача була вирішена двома винаходами, об'єднаними єдиним задумом:

а) способом відновлення і підсилення пошкодженої залізобетонної балки шляхом закріплення елементів підсилення на ній з подальшим створенням в них попереднього напруження і тристороннього її (балки) обтиснення;

б) пристроєм для відновлення і підсилення пошкодженої балки, що містить з'єднані між собою поздовжні та поперечні вертикальні і горизонтальні елементи, стягнуті між собою різьбовими муфтами.

Заявлений спосіб відновлення та підсилення пошкоджених залізобетонних балок і пристрій для його здійснення забезпечують наступний технічний результат:

1. Повне відновлення пошкодженої балки.

2. Підвищення, за необхідності, несучої здатності підсиленої попередньо напруженою металевою обоймою залізобетонної балки.

3. Здійснюються значна економія матеріально-технічних ресурсів за рахунок заощадження відновлення і посилення, у разі необхідності, існуючих балкових конструкцій на навантаження, яке змінилося, в тому числі зростаюче, знакозмінне, пульсуюче або інше динамічне навантаження.

4. Роботи з монтажу пристрою і способу його включення в роботу не вимагають зупинки основного технологічного процесу.

Виходячи з наведеного вище додатково була реалізована ще одна серія натурних дослідів з однопрогінними пошкодженими у попередніх експериментах балками, підсилених попередньо напруженими металевими обоймами за дії малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів з використанням теорії планування експерименту та ефективної комп'ютерної програми COMPEX проф. Вознесенського В.А.

Із літературних джерел відомо, що основні параметри працездатності залізобетонних конструкцій підпорядковані нормальному закону розподілу Гаусса і при їхній обробці можна застосовувати метод найменших квадратів. Оскільки дослідні фактори можуть впливати на функцію "виходу" нелінійно, то її доцільно апроксимувати поліномом другого ступеня. Тому дослідні зразки були виготовлені та двічі випробувані за чотирьохфакторним трирівневим Д-оптимальним планом Бокса В-4 [24], який забезпечує однакову точність прогнозу вихідного параметра з області, яка описується радіусом, що дорівнює умовній "1" відносно центральної "нульової" точки.

У якості дослідних обрані наступні фактори (конструктивні чинники), які змінювалися на трьох рівнях:

X_1 – відносний проліт зрізу (віддаль від опори до лінії дії зосередженої сили), $a/h_0=1, 2, 3$ при $h_0=d=175$ мм;

X_2 – клас бетону С, МПа, С16/20, С30/35, С40/50;

X_3 – коефіцієнт поперечного армування: зовнішньої металевої обойми $\rho_{fw}(A240C)=0,0046; 0,0105; 0,0263$; $\rho_{sw}(BpI)=0,0016; 0,0029; 0,0044$;

X_4 – рівень зовнішнього поперечного навантаження в залізобетонних балках першої (АСД) та другої серії (А) $\eta_{1, 2}=0,5; 0,65; 0,80$; рівень попереднього напруження в елементах обойми $\eta_{\sigma f}=0,25; 0,50; 0,75$.

Коефіцієнти верхнього і нижнього повздовжнього армування $\rho_{ls}' = \rho_{ls} = 0,176$ для усіх типів балок. Коефіцієнти верхнього і нижнього додаткового армування пошкоджених залізобетонних балок у вигляді попередньо напружених елементів обойми із кутиків $25 \times 25 \times 4$ $\rho_{ef}' = \rho_{ef} = 0,0191$, при $l_0=9h_0$; $h_0=175$ мм і $b=100$ мм для звичайних залізобетонних балок.

Кожен дослід натурного експерименту першої (АСД) та другої (А) серій був забезпечений двома близнюками-балками з чотирма приопорними ділянками. Дослідні зразки-балки третьої серії (Д) представляли собою ті ж самі пошкоджені та поділені на окремі блоки наскрізними нормальними і похилими перехресними тріщинами балки другої серії (А), доведені під час попередніх випробувань на дію знакозмінного навантаження високих рівнів до граничного стану і які у третій серії (Д) були відновлені та підсилені запатентованими авторами способом та пристроєм [23]. Отже, усього було виготовлено у перших двох серіях 100 залізобетонних балок і випробувано на дію, відповідно, статично ступенево зростаючого і малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів аж до настання граничного стану, який виникає у дослідних елементах нарівні навантаження $\eta \approx 0,95 F_{ult}$, тобто напередодні руйнування. А у третій серії (Д) усі відновлені та посилені попередньо напруженими металевими обоймами [23] пошкоджені дослідні зразки-балки другої серії (А) повторно були випробувані на дію малоциклового знакозмінного навантаження аж до їх руйнування.

Дослідні зразки-залізобетонні балки були армовані згідно плану експерименту В4 двома плоскими зварними каркасами. Для виготовлення зазначених елементів використовували важкий бетон вказаних вище класів на гранітному щебені фракцій 5-10 мм і кварцовому піску з модулями крупності 1,5. В якості в'язучого застосовували портландцемент марки 500 без добавок. Для зменшення водоцементного відношення, поліпшення легкоукладності бетонної суміші та скорочення термінів набору міцності бетону у всіх дослідах використовували комплексну добавку Релаксол-Супер М у кількості 1% від ваги цементу в перерахунку на суху речовину.

Для відновлення і підсилення пошкоджених силовими тріщинами залізобетонних балок згідно патенту на винахід №119294 [23] були виготовлені спеціальні пристрої для його здійснення заявленим способом, а для випробовування – сертифікована спеціальна силова установка. Навантаження у циклах прикладали за чотирьохточковою схемою за допомогою гідравлічного домкрату ДГ-50 і двох розподільних балок-траверс двома зосередженими силами ступенями: по $(0,04 \dots 0,06) F_{ult}$ до появи перших нормальних і похилих тріщин, а потім – по $(0,08 \dots 0,12) F_{ult}$ до руйнування у першій серії (АСД) або до заданого рівня η знакозмінного навантаження у першому його циклі, а згодом – аж до руйнування на завершальному етапі у другій (А) та третій (Д) серіях. Витримка навантаження на ступені становила до 15 хвилин зі всіма вимірами на початку й наприкінці кожної ступені навантаження.

Перед бетонуванням дослідних балок на розтягнуту арматуру одного із плоских каркасів були наклеєні ланцюжки тензорезисторів КФ5П1-5-200 (з базою 5 мм).

Деформації бетону дослідних зразків вимірювали за допомогою дротяних та фольгових тензорезисторів з базою 40 і 50 мм, приклеєних за загальноприйнятою методикою на одну бічну і верхню відшліфовані грані.

Деформації повздовжніх і поперечних елементів попередньо напруженої металеві обойми вимірювали також за допомогою аналогічних тензорезисторів. Перехід від вимірювань у досліді деформацій в арматурі і елементах обойми здійснювали за допомогою закону Гука, а в бетоні – за січним модулем пружності.

Контроль за деформаціями бетону стислої зони й розтягнутої арматури, а також за рівнем попереднього напруження у металевій обоймі здійснювали за допомогою індикаторів годинникового типу, а вертикальними переміщеннями – прогиномірів Аістова.

Основний матеріал і результати. Випробування дослідних залізобетонних зразків-балок першої (АСД) і другої (А) серій показало, що їхнє деформування, тріщиноутворення та руйнування відбулося за правилами будівельної механіки і було прогнозованим. Першими появлялися нормальні тріщини в зоні дії максимальних згинальних моментів. З подальшим збільшенням поперечного навантаження нормальні тріщини розвивалися в глиб балки, збільшувалася ширина їх розкриття й появлялися нові нормальні тріщини. Подальше збільшення статичного ступенево зростаючого навантаження призводило до подальшого розвитку нормальних і похилих тріщин з переважним розкриттям похилих аж до руйнування балок першої (АСД) серії за небезпечними похилими тріщинами.

Дослідні зразки-балки першої (АСД) і другої (А) серій були запроєктовані майже рівномічними за нормальними та похилими перерізами, але так, щоби їх руйнування відбувалося, все-таки, за похилими перерізами під дією на завершальному етапі їхньої роботи руйнуючих поперечних сил та, пов'язаних з ними, згинальних моментів.

Під час зміни знаку напівцикла навантаження балок другої (А) серії раніше утворені нормальні і похилі тріщини повністю закривалися під дією стискаючих напружень у змінній із розтягнутої у попередньому напівциклі зони на стиснуту. І навпаки, у раніше стиснутій зоні "чистого згину" у наступному напівциклі появляються нові нормальні тріщини, які з'єднуються з попередніми нормальними, утворюючи видимі наскрізні тріщини у стані спокою. А на приопорних ділянках зі зміною знаку напівциклу з'являються нові похилі тріщини, які перетинають раніше утворені похилі тріщини під кутом, близьким до 90°, що добре пояснюється напрямком головних розтягуючих напружень.

Зі збільшенням рівнів знакозмінного навантаження поступово збільшувалася висота нормальних і довжина похилих небезпечних тріщин, погіршувалося зчеплення бетону з поздовжньою і поперечною арматурою, відбувалося розуцільнення бетону і зниження його міцності, мало місце збільшення ширини розкриття тріщин, деформативності дослідних зразків-балок та взаємне зміщення окремих їх блоків. Руйнування балок другої (А) серії на високих рівнях $\eta \geq 0,8F_{ult}$ носило, як правило, крихкий характер і відбувалося, в основному, на приопорних ділянках.

Відновлення і підсилення пошкоджених у другій (А) серії балок за допомогою заявлених в [23] способу і пристрою дозволило спочатку їх вирівняти і придати їм початкову форму, потім суттєво їх відновити і підсилити, що в результаті, як показали досліді третьої (Д) серії, дозволило значно підвищити їхню несучу здатність та підтвердити доцільність застосування вказаного винаходу на практиці.

У результаті отриманих експериментальних даних, вилучення незначимих та перерахунку тих коефіцієнтів, що залишилися, за допомогою ефективної комп'ютерної програми COMPEX отримали адекватні експериментально-статистичні залежності основних параметрів працездатності дослідних зразків розглянутих серій, які мають добру інформаційну корисність та показують гарну збіжність з дослідними даними.

Міцність (несуча здатність) дослідних елементів може бути представлена наступними експериментальними залежностями:

$$\hat{Y}(V_{ul}^{exp}) = 98 - 41X_1 + 12X_2 + 6X_3 + 16X_1^2 - 7X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ kH}, \quad v = 5,2\%; \quad (1)$$

$$\hat{Y}(V_{u2}^{exp}) = 80 - 33X_1 + 13X_2 + 6X_3 - 2X_4 + 21X_1^2 - 12X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ kH} \quad v = 5,8\%; \quad (2)$$

$$\hat{Y}(V_{uf}^{exp}) = 148 - 32X_1 + 17X_2 + 2X_1^2 - 8X_2^2 - 10X_1X_2, \text{ kH} \quad v = 5,3\%; \quad (3)$$

де V_{ul}^{exp} , V_{u2}^{exp} - руйнуюча поперечна сила, відповідно, при статистичному ступенево зростаючому і малоцикловому знакозмінному навантаженнях звичайних залізобетонних балок за [1];

V_{uf}^{exp} - руйнуюча поперечна сила пошкоджених силовими нормальними і похилими тріщинами залізобетонних балок другої серії (А), підсилених попередньо напруженими металевими обоймами згідно з [23], за дії малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів при тих же значеннях конструктивних чинників.

Представлені адекватні експериментально-статистичні залежності (1) ... (3), названі проф. Вознесенським В.А. математичними моделями [24], мають суттєву перевагу над кореляційними та іншими залежностями тому, що вони дозволяють комплексно оцінити вплив кожного зазначеного вище фактора на визначальні вихідні параметри не тільки зокрема, а й у взаємодії один з одним, а також порівняти величину цього впливу як на звичайні залізобетонні балки за дії статичного ступенево зростаючого і малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів, так і на підсилені металевими попередньо напруженими обоймами пошкоджених і розділених силовими тріщинами на окремі блоки залізобетонних балок за дії аналогічного навантаження.

Серед конструктивних чинників найбільший вплив на несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів має величина відносного прольоту зрізу. В цілому, підтверджується виявлена О.С. Залесовим, Ю.А. Климовим [25], В.М. Карпюком [20, 21, 22] та іншими дослідниками закономірність зменшення міцності похилих перерізів залізобетонних балкових конструкцій зі збільшенням прольоту зрізу за нелінійним законом.

Наступним за величиною є клас бетону. При цьому, при збільшенні класу від С16/20 до С40/50 несуча здатність зростає також за нелінійним законом. Аналогічна картина спостерігається і з підвищенням коефіцієнтів поперечного армування ρ_{sw} , ρ_{fw} . Вплив збільшення рівня поперечного навантаження η від 0,5 до 0,8 виявився негативним при знакозмінному його характері тільки для звичайних балок другої (А) серії.

Аналіз залежностей (1) ... (3) показує, що вони є якісно однотипними і вплив конструктивних чинників, а також фактора малоциклового навантаження є якісно подібним. Відмінності спостерігаються у кількісних показниках. Так, несуча здатність похилих перерізів дослідних зразків-балок, виражена через руйнуючу поперечну силу V_u , збільшується по відношенню до середніх їхніх значень (вільних членів b_0), відповідно, 98, 80 і 148 кН:

- зі зменшенням величини відносного прольоту зрізу a/h_0 від 3 до 1 у першій (АСД), другій (А) і третій (Д) серіях на 84, 83 і 43%;
- зі збільшенням класу бетону від С16/20 до С40/50, відповідно на 24, 33 і 23%;
- зі збільшенням кількості поперечної сталеві арматури ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 (вирази (1), (2)) на 12 і 15%;
- зі збільшенням кількості попередньо напружених поперечних хомутів металеві обойми ρ_{fw} від 0,0046 до 0,0263 значення V_{uf}^{exp} залишається сталим, очевидно, із-за ефекта сумісної роботи усіх попередньо напружених елементів металеві обойми та частково відновленої шляхом тристороннього обтиснення попередньо пошкодженої залізобетонної балки;
- при зменшенні рівня малоциклового знакозмінного навантаження η від 0,8 до 0,5 у залізобетонних балках другої (А) серії на 5%;

Наявність квадратичних ефектів при факторах X_1^2 , X_2^2 і X_3^2 зі знаками, протилежними прямому впливу вказаних чинників, свідчить про те, що за межами зміни дослідних факторів ($a/h_0 > 3$, $C > 40/50$ МПа, $\rho_{sw} > 0,0044$ і $\rho_{fw} > 0,0263$) подальше збільшення a/h_0 не призведе до суттєвого зниження несучої здатності (руйнуючої поперечної сили), а подальше збільшення класу бетону С та кількості поперечної сталеві арматури ρ_{sw} і попередньо напружених зовнішніх хомутів ρ_{fw} є недоцільним, оскільки процес збільшення V_u , при цьому, носить затухаючий характер.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що малоциклове повторне навантаження знижує несучу здатність приопорних ділянок залізобетонних балок, в середньому, на 8% згідно [22], а малоциклове знакозмінне – аж на 18% порівняно з несучою здатністю аналогічних балок, випробуваних на статичне ступенево зростаюче навантаження. Цей висновок підтверджується працями професорів Бабица Є.М., Масюка Г.Х. та їхніх учнів.

Як показали натурні експериментальні дослідження, несуча здатність підсиленіх попередньо напруженими металевими обоймами [23], пошкоджених у попередніх дослідах

залізобетонних балок, в середньому, підвищилась на 51% порівняно зі звичайними залізобетонними балками першої серії (АСД), що свідчить про високу ефективність такого підсилення.

Кількість циклів повторного і знакозмінного навантаження у проведених дослідах була продиктована критерієм стабілізації деформацій у бетоні проф. Баби́ча Є.М. і склала не менше 10, якщо дослідні зразки-балки не зруйнувалися при меншому числі циклів.

Абсолютна більшість дослідних балок зруйнувалися за похилими перерізами в обох або одному (частіше) із прольотів зрізу. Критерієм руйнування дослідних зразків слугували досягнення граничних деформацій в бетоні або арматурі з явними ознаками виникнення в них пластичних деформацій, надмірне розкриття (до 1 мм і більше) похилих (частіше) або нормальних (рідше) тріщин, суттєве збільшення стріли прогинів ($f \geq \frac{1}{100} l_0$), відсутність

приросту або деякий спад (до 15%) показів манометра насосної станції силової установки.

Експериментально доказано, що основною причиною зниження несучої здатності експериментальних зразків-балок при малоциклового повторного і знакозмінного навантаження є порушення структури бетону, особливо на приопорних ділянках, його розущільнення та часткова втрата зчеплення з арматурою.

Найбільший приріст залишкових деформацій у бетоні й поперечній арматурі спостерігається на перших двох- трьох циклах і, як правило, вони стабілізуються до п'ятого-шостого циклів при рівнях навантаження $\eta=0 \dots 0,65$. А в деяких зразках з мінімальним класом бетону і кількістю поперечної арматури при рівнях навантаження $\eta=0 \dots 0,8$ вказані деформації не стабілізувалися і балки руйнувалися на 6 ... 9 циклах від досягнення втомної міцності або можливого зниження їхніх міцнісних параметрів внаслідок статистичної похибки при визначенні руйнуючого однократного ступенево зростаючого навантаження.

Неперearмовані ($\rho_{sw} \leq 0,003$ (ВрІ), $\rho_{fw} \leq 0,018$ (А240С)) залізобетонні дослідні балки при однократному ступенево-зростаючому статичному, малоциклового повторного та знакозмінного навантаженнях [1, 21, 22], як правило, руйнувалися за схемою В/М, тобто за похилими перерізами при переважній дії згинального моменту внаслідок текучості поздовжньої робочої арматури в усті небезпечної похилої тріщини та поперечної арматури, що перетинається нею. Зі збільшенням кількості поперечної арматури $\rho_{sw} \geq 0,0044$ аналогічні дослідні елементи з середніми ($a/h_0=2$) і великими ($a/h_0=3$) прольотами зрізу руйнувалися за схемою С/В, тобто за похилою тріщиною при переважній дії поперечної сили внаслідок текучості поперечної арматури та зрізу або зминання бетону стиснутої сили над вершиною небезпечної похилої тріщини. При малих прольотах зрізу ($a/h_0 \leq 1$) дослідні залізобетонні балки руйнувалися, як правило, за схемою Д/см за похилою стислою смугою між двома похилими тріщинами внаслідок роздроблення бетону в цій смузі за траєкторією головних стискаючих напружень або його зрізу під впливом максимальних дотичних напружень.

Руйнування підсиленних балок третьої (Д) серії починалося з поступової втрати попереднього напруження в стиснутих елементах обойми, розкриття раніше утворених тріщин, взаємного зміщення окремих блоків та надмірного деформування елементів обойми і завершувалося втратою форми приопорної ділянки.

Прогини дослідних балок перед їх руйнуванням можуть бути охарактеризовані адекватними експериментально-статистичними залежностями основних параметрів деформативності контрольних звичайних та посиленних балок:

$$\hat{Y}(f_{u1}^{exp}) = 6 + 1,5X_1 + 0,65X_2 + 0,7X_3 + 0,35X_4 - 0,5X_1^2 + 0,2X_1 X_3, \text{ мм} \quad v = 5,5\%; \quad (4)$$

$$\hat{Y}(f_{u2}^{exp}) = 7,2 + 2,1X_1 + 0,8X_2 + 0,8X_3 + 0,4X_4 - 0,5X_1^2, \text{ мм} \quad v = 5,3\%; \quad (5)$$

$$\hat{Y}(f_{uf}^{exp}) = 13,2 + 6,6X_1 - 0,7X_2 + 0,85X_3 - 0,8X_4 + 1,5X_1^2 + 0,4X_2^2 + 0,6X_1 X_3 - 0,8X_1 X_4 + 0,9X_2 X_4 - 0,6X_3 X_4, \text{ мм} \quad v = 5,1\%; \quad (6)$$

які показують, що прогини балок першої (АСД) серії дослідів, в середньому, складали (1/263) розрахункового прольоту l_0 , другої (А) серії – (1/219) l_0 , а третьої (Д) серії – (1/119) l_0 .

При цьому, дія малоциклового знакозмінного навантаження збільшувала прогини дослідних зразків-балок порівняно з одноразовим статистичним ступенево зростаючим навантаженням на 20%. Серед конструктивних чинників найбільший вплив на прогини випробовуваних і посиленних, елементів має величина відносного прольоту зрізу. З її збільшенням нелінійно зростають прогини. Наступним чинником за величиною впливу є відсоток поперечного армування. При його збільшенні лінійно зростає несуча здатність дослідних зразків, а, отже, і їхня деформативність. Збільшуючи несучу здатність похилих перерізів, тим самим отримуємо збільшену деформативність. Наступним значущим фактором, для звичайних балок є рівень поперечного навантаження η , а для посиленних балок, - рівень попереднього напруження. Так, при його збільшенні прогини лінійно зменшуються. Завдяки збільшенню класу бетону зростає несуча здатність непошкоджених дослідних зразків, а отже і їхні прогини.

Що стосується кількісних показників, то прогини дослідних зразків-балок, виражені через прогини перед руйнуванням, $f^{0.95Fu}$ збільшується порівняно із середніми їх значеннями 6; 7.2; 13.2 мм, відповідно:

- зі збільшенням величини відносного прольоту зрізу a/h_0 від 1 до 3 у першій, другій та третій серії на 50, 58.3 і 100 %;
- при збільшенні класу бетону від C16/20 до C40/50 для першої та другої серії на 21.6 і 22.2%;
- при зменшенні класу бетону для балок третьої серії на 10.6%;
- зі збільшенням проценту поперечного армування ρ_{sw} балок від 0.0016 до 0.0044 для балок першої та другої серії, й проценту поперечного армування додатковою арматурою посилення ρ_{fw} від 0.0046 до 0.0263 у третій серії, відповідно, на 23.3, 22.2 і 12.9%;
- при збільшенні рівня малоциклового знакозмінного навантаження η від 0.5 до 0.8 для першої та другої серії балок на 11.7 і 11.1%;
- зі зменшенням рівня попереднього напруження в прогінних елементах обойми η_{sf} від 0.75 до 0.25 на 12.1%;
- при одночасному збільшенні величини відносного прольоту зрізу та проценту поперечного армування балок першої та третьої серії на 3.3, 4.5%;
- при одночасному збільшенні величини відносного прольоту зрізу та зменшенні рівня попереднього напруження прогінних елементів обойми третьої серії на 6.1%;
- при одночасному зменшенні класу бетону та попереднього напруження прогінних елементів обойми третьої серії на 6.8%;
- при одночасному збільшенні проценту поперечного армування додатковою арматурою посилення та зменшенні попереднього напруження прогінних елементів обойми третьої серії на 4.5%;

Стосовно першої та другої серії - наявність квадратичного ефекту при факторі зі знаком, протилежними прямому впливу вказаного чиннику, свідчить про те, що за межами зміни дослідного фактору $a/h_0 > 3$ подальше збільшення a/h_0 не призведе до суттєвого підвищення прогину (перед руйнуванням). Що до третьої серії квадратичні ефекти при факторах та зі знаками, котрі не суперечать знакам основних факторів, свідчать про те, що за межами зміни дослідних факторів ($a/h_0 > 3$, $C > 40/50$ МПа) подальше збільшення a/h_0 призведе до суттєвого збільшення прогинів, а подальше збільшення класу бетону C має сенс, оскільки процес зниження $f^{0.95Fu}$ ще не стабілізувався. Але цей висновок носить теоретичний характер, основні класи бетону, з котрих виготовлюються й виготовлялися згинані конструкції, були охопленні даним експериментальним дослідженням.

Перед руйнування прогини підсиленних металевою попередньо-напруженою обоймою пошкоджених наскрізними похилими та нормальними тріщинами, залізобетонних балок збільшились у 2 рази в порівнянні зі статично навантаженими звичайними залізобетонними балками першої серії, й в 1,8 разів в порівнянні з балками з пошкодженнями другої серії. При цьому, слід відзначити, що несуча здатність пошкоджених у попередніх дослідженнях і підсиленних попередньо напруженими металевими обоймами повторно випробовуваних балок

третьої серії перевищувала міцність дослідних зразків – балок, які до початку випробувань першої та другої серій не мали силових пошкоджень, відповідно, у 1,51 та в 1,85 разів.

Ширина розкриття нормальних тріщин в зоні "чистого згину" може бути представлена залежностями (7), (8):

$$\hat{Y}(W_{cr1,2}^{\perp exp}) = 0,14 + 0,02X_1 + 0,03X_2 + 0,01X_3 + 0,05X_4 + 0,01X_1^2 - 0,03X_2^2 + 0,02X_4^2 + 0,01X_1X_3 + 0,01X_1X_4 + 0,02X_2X_4 + 0,01X_3X_4, \text{ мм, } v = 6,2\%; \quad (7)$$

$$\hat{Y}(W_{crf}^{\perp exp}) = 0,06 + 0,04X_1 + 0,02X_2 + 0,01X_3 - 0,01X_4 + 0,02X_1X_2 + 0,02X_1X_3 - 0,01X_1X_4 + 0,01X_2X_3, \text{ мм, } v = 21,6\%; \quad (8)$$

Ширина розкриття похилих тріщин на приопорних ділянках дослідних елементів може бути представлена експериментально-статистичними залежностями:

$$\hat{Y}(W_{cr1}^{/exp}) = 0,35 - 0,06X_1 - 0,03X_2 - 0,01X_3 - 0,14X_4 - 0,01X_1X_3 - 0,03X_2X_4 - 0,02X_3X_4, \text{ мм, } v = 10,4\%; \quad (9)$$

$$\hat{Y}(W_{cr2}^{/exp}) = 0,63 + 0,05X_1 + 0,05X_2 - 0,06X_3 + 0,24X_4 - 0,02X_2^2 + 0,02X_3^2 + 0,02X_4^2 + 0,11X_1X_2 - 0,03X_1X_3 - 0,06X_3X_4, \text{ мм, } v = 11,5\%; \quad (10)$$

$$\hat{Y}(W_{crf}^{/exp}) = 0,50 + 0,20X_1 - 0,01X_2 - 0,05X_3 - 0,09X_4 + 0,03X_1^2 - 0,03X_1X_2 - 0,04X_1X_4, \text{ мм, } v = 8,4\%; \quad (11)$$

Як видно, наявність металевої попередньо напруженої обойми стримує розвиток нормальних тріщин посередині балки і зменшує ширину їх розкриття, в середньому, в 2,3 рази. А ширина розкриття похилих тріщин у звичайних балках в 2,5 рази перевищує ширину розкриття нормальних тріщин в них при однократному статичному навантаженні. Дія малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів збільшує ширину розкриття похилих тріщин в них аж в 4,5 разів.

Ширина розкриття нормальних тріщин дослідних балок збільшується по відношенню до середніх їх значень для першої та другої серії 0,14 мм, для третьої серії 0,06 мм:

- при збільшенні відносного прольоту зрізу a/h_0 у першій, другій та третій серіях на 29, 29 і 133%;

- зі збільшенням класу бетону від C16/20 до C40/50, відповідно, на 43, 43 та 67%;

- при збільшенні кількості поперечної металевої арматури ρ_{sw} , в залізобетонних балках, першої та другої серій від 0,0016 до 0,0044 на 14%;

- зі збільшенням процента поперечного армування додатковою арматурою посилення ρ_{fw} від 0,0046 до 0,0263 для третьої серії - на 33%;

- при збільшенні рівня малоциклового знакозмінного навантаження η від 0,5 до 0,8 для першої та другої серій - на 71%;

- зі зменшенням рівня попереднього напруження в поздовжніх елементах обойми η_{cf} від 0,75 до 0,25 - на 33%.

Ширина розкриття похилих тріщин залізобетонних балок збільшується по відношенню до середніх їх значень для першої, другої і третьої серії 0,35, 0,63, 0,5 мм, відповідно:

- зі зменшенням відносного прольоту зрізу a/h_0 у першій серії на 34%;

- при збільшенні прольоту зрізу у другій та третій серіях на 16 і 80%;

- зі зменшенням класу бетону від C40/50 до C16/20 у першій та третій серіях на 17 і 4%;

- при збільшенні класу бетону у другій серії на 16%;

- зі зменшенням кількості поперечної металевої арматури ρ_{sw} , в залізобетонних балках першої та другої серій від 0,0044 до 0,0016 та проценту поперечного армування додатковою арматурою посилення ρ_{fw} , третьої серії, від 0,0263 до 0,0046 на 6, 19 і 20%;

- при збільшенні рівня малоциклового знакозмінного навантаження η від 0,5 до 0,8 на 76%;

- зі зменшенням рівня попереднього напруження в прогінних елементах обойми η_{cf} від 0,75 до 0,25 на 36%.

Наявність квадратичного ефекту при факторі у першій та другій серіях для нормальних тріщин, а у другій серії для похилих тріщин зі знаком, протилежними прямому впливу вказаного чинника, свідчить про те, що за межами зміни дослідного фактора $C > 40/50$ МПа, подальше його збільшення не призведе до суттєвої зміни ширини розкриття тріщин. Та, навпаки, квадратичні ефекти при факторах у першій та другій серіях для нормальних тріщин, а у третій серії для похилих тріщин зі знаками, що не суперечать знакам основного впливу факторів свідчать про те, що за межами зміни дослідних факторів ($a/h_0 > 3$, $\rho_{sw} > 0,0044$, $\eta > 0,8$) відбудеться збільшення ширини розкриття нормальних тріщин для першої та другої серії балок й подальший розвиток похилих тріщин у третій серії. Підвищуючи несучу здатність похилих перерізів за допомогою збільшення процента поперечного армування залізобетонних балок у другій серії ми досягаємо більшої ширини розкриття похилих тріщин. Підвищуючи рівень малоциклового знакозмінного навантаження $\eta > 0,8$ для балок другої серії, отримуємо збільшення величини ширини розкриття нормальних та похилих тріщин.

Використання металевої попередньо напруженої обойми дозволило не тільки збільшити несучу здатність пошкоджених і розділених на окремі блоки дослідних балок в 1,85 разів, а й зменшити ширину розкриття похилих тріщин на 21%, що являється ще одним свідченням переваги застосованого методу підсилення пошкоджених прогінних залізобетонних конструкцій.

Довжина проекції небезпечної похилої тріщини на горизонтальну вісь балки представлена виразами (12), (13):

$$\hat{Y}(l_{cr1}^{/exp}) = 201 + 53X_1 - 19X_3 - 4X_1X_2 - 23X_1X_3, \text{ мм}, \quad v = 8,5\%; \quad (12)$$

$$\hat{Y}(l_{cr2,f}^{/exp}) = 173 + 40X_1 - 16X_3 + 19X_4 + 16X_1X_2 - 7X_1X_3 + 14X_1X_4 - 11X_3X_4, \text{ мм}, \quad v = 8,9\%; \quad (13)$$

Як видно з (12) і (13), середня довжина проекції критичної похилої тріщини при малоцикловому знакозмінному навантаженні зменшується порівняно зі статичним одноразовим на 14% за рахунок втомного руйнування бетону стиснутої зони і руйнування захисного шару бетону на опорах.

Віддаль між нормальними тріщинами у зоні "чистого згину" характеризується залежностями (14), (15):

$$\hat{Y}(l_{cr1}^{\perp exp}) = 68 - 6X_1 + 2X_2 + 3X_1X_3, \text{ мм}, \quad v = 5,1\%; \quad (14)$$

$$\hat{Y}(l_{cr2,f}^{\perp exp}) = 70,9 - 2,15X_1 + 1,93X_2 - 1,75X_3, \text{ мм}, \quad v = 4,7\%; \quad (15)$$

Висновки. 1. Експериментально доказана можливість та доцільність використання на практиці розробленого авторами роботи оригінального способу відновлення та підсилення пошкоджених наскрізними нормальними і перехресними похилими тріщинами, поділених ними на окремі блоки залізобетонних балкових конструкцій, за рахунок тристороннього обтиснення і пристрій для його здійснення, закріплений патентом на винахід [23], за дії зростаючого статичного, циклічного знакозмінного, сейсмічного, пульсуючого та іншого динамічного навантаження, в тому числі пошкоджених під час бойових дій за умови неповного їх руйнування зі збереженням початкової форми.

2. Реалізований системний підхід до експериментально-теоретичного вивчення напружено-деформованого стану звичайних, відновлених та підсилених пошкоджених наскрізними силовими тріщинами прогінних залізобетонних конструкцій за допомогою металевих попередньо напружених обойм, вперше дозволив зробити достовірну кількісну і якісну оцінку впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на їх несучу здатність, жорсткість, тріщиностійкість та інші параметри працездатності як зокрема, так і у взаємодії один з одним, суттєво уточнити фізичну модель роботи вказаних конструкцій при їх статичному та малоцикловому знакозмінному навантаженні.

3. Малоциклове повторне навантаження знижує несучу здатність приопорних ділянок звичайних залізобетонних балок, в середньому, на 8% за [22], а малоциклове знакозмінне – на 18%.

4. Несуча здатність підсилених попередньо напруженими металевими обоймами [23] пошкоджених залізобетонних балок при знакозмінному навантаженні підвищилась, в середньому, на 51% порівняно зі звичайними залізобетонними балками, випробуваними на одноразове статичне навантаження, що свідчить про високу ефективність такого підсилення.

5. Дія малоциклового знакозмінного навантаження збільшує прогини дослідних зразків-балок порівняно з одноразовим статичним ступенево зростаючим навантаженням на 20%.

Застосування металевої попередньо напруженої обойми для підсилення пошкоджених балок збільшує як їхню несучу здатність, так і прогини в 1,85 разів при малоцикловому знакозмінному навантаженні порівняно з цими показниками в звичайних цільних балках при однократному навантаженні.

6. Ширина розкриття нормальних тріщин посередині дослідних балок всіх серій не перевищує допустимих величин і коливається в межах 0,02 ... 0,22.

Середня величина розкриття похилих тріщин при експлуатаційних рівнях навантаження у дослідних елементах не перевищує допустимих значень, а перед руйнуванням – коливається в межах 0,35 ... 0,63 мм. При цьому, застосування металевої попередньо напруженої обойми зменшує ширину розкриття похилих тріщин, в середньому, на 21%, а нормальних – в 2,3 рази.

7. Середня довжина горизонтальної проекції критичної похилої тріщини при малоцикловому знакозмінному навантаженні зменшується порівняно зі статичним одноразовим на 14% за рахунок втомного руйнування стиснутої зони бетону і руйнування його захисного шару на опорах.

Література

1. Вплив циклічного знакозмінного та малоциклового навантаження на міцність залізобетонних балок / [В. М. Карпюк, К. І. Албу, Д. С. Даниленко та ін.]. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – №58. – С. 103–119.
2. Azizov T. N. New design concepts for strengthening of continuous reinforced-concrete beams [Електронний ресурс] / T. N. Azizov, D. V. Kochkarev, T. A. Galinska // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012040/pdf>.
3. А. с. 1778250 СССР, МКИЗ Е 04 В 1/00. Способ усиления конструкций / Р. Х. Габузов, Э.П. Александрян (СССР). - №4776410/33; заявл. 03.01.90; опубл. 30.11.92, Бюл. №44.
4. Пинаджян В. В. К вопросу усиления изгибаемых конструкций / В. В. Пинаджян. // Известия Академии наук Армянской ССР. – 1947. – №9. – С. 79–108.
5. Онуфриев Н. М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений / Н. М. Онуфриев. – Ленинград: Стройиздат, 1965. – 342 с.
6. Мальганов А. И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Атлас схем и чертежей / А. И. Мальганов, В. С. Плевков, А. И. Полищук. – Томск: Томский межотраслевой ЦНТИ, 1990. – 316 с.
7. А.с. 1481359 СССР, МКИЗ Е 04 G 23/02/ Конструкция усиления железобетонной балки / Е. А. Рабинович, В. Л. Благов, А. А. Бохотский (СССР). - № 4248550/29-33; заявл. 21.05.87; опубл. 23.05.89, Бюл. №19.
8. А.с. 1574771 СССР, МКИЗ Е 04 G 23/02/ Устройство для усиления изгибаемых строительных конструкций / А. П. Лука, Ф. С. Кравченя, А. Н. Соболев (СССР). - № 4302639/23-33; заявл. 08.09.87; опубл. 30.06.90, Бюл. № 24.

9. Su R. K. Experimental and numerical studies of external steel plate strengthened reinforced concrete coupling beams / R. K. Su, Y. Zhu. // *Engineering Structures*. – 2005. – №27. – p. 1537–1550.
10. Su R. K. Effects of bolt–plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams / R. K. Su, W. H. Siu, S. T. Smith. // *Engineering Structures*. – 2010. – №32. – p. 1769–1778.
11. Aykaç S. Strengthening of reinforced concrete T-Beams with steel plates / S. Aykaç, E. Özbak. // *Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*. – 2011. – №22. – p. 5319–5334.
12. Strengthening and repair of reinforced concrete beams using external steel plates / S. Aykaç, I. Kalkan, B. Aykaç, S. Karahan. // *Journal of Structural Engineering (United States)*. – 2013. – №139. – p. 929–939.
13. Савйовський В. В. Дослідження особливостей підсилення залізобетонних балкових конструкцій зовнішнім армуванням / В. В. Савйовський, О. С. Молодід // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – 2017. – № 4. – С. 29-36.
14. Ozbek E. Strengthening of RC beams with solid steel plates / E. Ozbek, M. Bocek, S. Aykas. // *Athens Journal of Technology & Engineering*. – 2016. – №3. – С. 291–298.
15. Performance of reinforced concrete beams retrofitted by a directShear anchorage retrofitting system / [H. Ying, P. Huawei, Q. Xueyou та ін.]. // *Procedia Engineering*. – 2017. – №210. – p. 132–140.
16. Prevention of premature failures of plate bonded flexurally strengthened RC slab using end anchor and connector / A. Alam, W. Mohamed, S. Bakkar, S. Beddu. // *Alexandria Engineering Journal*. – 2018. – №51. – p. 287–299.
17. Чеканович М. Г. Підсилення залізобетонних балок зовнішньою стрижнево-котковою системою / М. Г. Чеканович, В. П. Журахівський, О. М. Чеканович. // *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції та споруди : зб. наук. праць*. – 2018. – №36. – С. 413–420.
18. Development of the procedure for the estimation of reliability of reinforced concrete beams, strengthened by building up the stretched reinforcing bars under load / R. Khmil, R. Tytarenko, Y. Blikharsky, P. Vegera. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – №7. – p. 32–42.
19. Influence of load level during strengthening of reinforced concrete beams on their reliability [Електронний ресурс] / R. Khmil, R. Tytarenko, Y. Blikharsky, R. Vashkevych // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012054/pdf>.
20. Karpiuk V. Calculation models of the bearing capacity of span reinforced concrete structure support zones, / V. Karpiuk, Y. Somina, D. Antonova. // *MSF*. – 2019. – №968.
21. Karpiuk V. Engineering Method of Calculation of Beam Structures Inclined Sections Based on the Fatigue Fracture Model / V. Karpiuk, Y. Somina, O. Maistrenko. – 2020. – №47. – p. 135–144.
22. Особливості напружено-деформованого стану і розрахунку залізобетонних конструкцій за дії циклічного навантаження високих рівнів: монографія / В. М. Карпюк, Ю. А. Сьоміна, А. І. Костюк, О. Ф. Майстренко. – Одеса: ОДАБА, 2018. – 237 с.
23. Спосіб відновлення та підсилення пошкоджених залізобетонних балок і пристрій для його здійснення : пат. 119294 Україна : МПК E04B 1/18, E04B 1/20, E04BG 23/02. № а 2018 00651 ; заявл. 23.01.2018; опубл. 27.05.2019, Бюл. №10
24. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – Москва: Финансы и статистика, 1981. – 215 с.
25. Залесов А. С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. – Киев: Будівельник, 1989. – 104 с.

References

- [1] V.M. Karpiuk, K.I. Albu, D.S. Danilenko, Y.A. Somina, „Vplyv cyklichnogo znakovinnogo ta malocyklovogo navantazhennya na micznist' zalizobetonnykh balok“, Visnyk ODABA, Odesa, Optimym, vol. 58, pp. 103-119, 2015.
- [2] T. N. Azizov, D. V. Kochkarev, T. A. Galinska, “New design concepts for strengthening of continuous reinforced-concrete beams”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pcss/vol14/1402-03.pdf. Accessed on: May 12, 2020.
- [3] R. Gabuzov, E. Aleksandryan, “Sposob usileniya konstrukcij”, MKI³ E 04 V 1/00. №4776410/33, Nov. 30, 1992.
- [4] V.V. Pinadzhyan, “K voprosu usileniya izgibaemykh konstrukcij”, In: Izvestiya Akademii nauk Armyanskoj SSR, №9, pp. 79–108, 1947.
- [5] N.M. Onufriev, “Usilenie zhelezobetonnykh konstrukcij promyshlennykh zdaniy i sooruzhenij”, Leningrad: Strojizdat, 1965.
- [6] A.I. Malganov, V.S. Plevkov, A.I. Polishuk, “Vosstanovlenie i usilenie stroitel'nykh konstrukcij avariynykh i rekonstruirovannykh zdaniy. Atlas skhem i chertezhej”, Tomsk, Tomskij mezhotraslevoj CNTI, 1990.
- [7] E. Rabinovich, V. Blagov, A. Bohotskij, “Konstrukciya usileniya zhelezobetonnoj balki”, MKI³ E 04 G 23/02. № 4248550/29-33, May 23, 1989.
- [8] A. Luka, F. Kravchenya, A. Sobol, “Ustrojstvo dlya usileniya izgibaemykh stroitel'nykh konstrukcij”, MKI³ E 04 G 23/02. № 4302639/23-33, Jun 30, 1990.
- [9] R. Su, “Experimental and numerical studies of external steel plate strengthened reinforced concrete coupling beams”, In: Engineering Structures, no. 27, pp. 1537–1550, 2005.
- [10] R. Su, “Effects of bolt–plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams”, In: Engineering Structures, no. 32, pp. 1769–1778, 2010.
- [11] S. Aykac, “Strengthening of reinforced concrete T-Beams with steel plates”, In: Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers, no. 22, pp. 5319–5334, 2011.
- [12] S. Aykac, I. Kalkan, B. Aykac, S. “Karahana, Strengthening and repair of reinforced concrete beams using external steel plates”, In: Journal of Structural Engineering, United States, no. 139, pp. 929–939, 2013.
- [13] V.V. Savjovskij, O.S. Molodid, “Doslidzhennya osoblivostej pidsilennya zalizobetonnih balkovih konstrukcij zovnishnim armuvannyam”, In: Visnik Pridniprovskoi derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi, no. 4, pp. 29-36, 2017.
- [14] E. Ozbek, M. Bocek, S. Aykac, “Strengthening of RC beams with solid steel plates”, In: Athens Journal of Technology & Engineering, no. 3, pp. 291–298, 2016.
- [15] H. Ying, P. Huawei, Q. Xueyou, P. Jun, L. Xiancun, P. Qiyun, L. Bao, “Performance of reinforced concrete beams retrofitted by a direct shear anchorage retrofitting system”, In: Procedia Engineering, no. 210, pp. 132–140, 2017.
- [16] A. Alam, W. Mohamed, S. Bakkar, S. Beddu, “Prevention of premature failures of plate bonded flexurally strengthened RC slab using end anchor and connector”, In: Alexandria Engineering Journal, no. 51, pp. 287–299, 2018.
- [17] M.G. Chekanovich, V.P. Zhurahivskij, O.M. Chekanovich, “Pidsilennya zalizobetonnih balok zovnishn'oyu strizhnevo-kotkovoyu sistemoyu”, In: Resursoekonomichni materiali, konstrukcii ta sporudi : zbirnik naukovih prac', no. 36, pp. 413–420, 2018.
- [18] R. Khmil, R. Tytarenko, Y. Blikharskyy, P. Vegera, “Development of the procedure for the estimation of reliability of reinforced concrete beams, strengthened by building up the stretched reinforcing bars under load”, In: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, no. 7, pp. 32–42, 2018.

- [19] R. Khmil, R. Tytarenko, Y. Blikharsky, Y. Vashkevych, "Influence of load level during strengthening of reinforced concrete beams on their reliability" [online]. [accesat 10.05.2020]. Disponibil: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012054/pdf>.
- [20] V. Karpiuk, Y. Somina, D. Antonova, "Calculation models of the bearing capacity of span reinforced concrete structure support zones", no. 968, MSF, 2019.
- [21] V. Karpiuk, Y. Somina, O. Maistrenko, "Engineering Method of Calculation of Beam Structures Inclined Sections Based on the Fatigue Fracture Model", no. 47, p.135-144, 2020.
- [22] V. Karpiuk, Y. Somina, A. Kostyuk, O. Maistrenko, "Osoblivosti napruzhennodeformovanogo stanu i rozrahunku zalizobetonnih konstrukcij za dii ciklichnogo navantazhennya visokih rivniv: monografiya", Odessa: OSACEA, 2018.
- [23] V.M. Karpiuk, D.S. Danilenko, I.A. Karpiuk, A.V. Danilenko, "Sposib vidnovlennya ta pidsilennya poshkodzhениh zalizobetonnih balok i pristirij dlya jogo zdiysnennya", MPK E04B 1/18, E04B 1/20, E04G 23/02. № a 2018 00651, May 27, 2019.
- [24] V. Voznesenskij, "Statisticheskie metody planirovaniya eksperementa v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyah", Moscow: Finance and Statistics, 1981.
- [25] A. Zalesov, Y. Klimov, "Prochnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii poperechnykh sil", Kiev: Budivel'nik, 1989.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННАЯ ОБОЙМА УСИЛЕНИЯ – ПОВРЕЖДЕННАЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННАЯ БАЛКА»

Карпюк В. М., д.т.н., профессор,
Даниленко Д.С., аспирант,
Карпюк И.А., к.т.н., доцент,
Даниленко А.В., к.т.н., ассистент,
Семина Ю.А., к.т.н., ассистент,

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Аннотация. Анализ повреждений, ответственных за жизнедеятельность пролетной железобетонной конструкции, сооружения или здания, в целом показал, что в процессе их эксплуатации происходит значительное разрушение защитного слоя бетона, коррозия арматуры, образование и чрезмерное раскрытие трещин, достижение недопустимых прогибов и т.п..

Цель данной работы заключается в экспериментально-теоретическом исследовании физической модели работы усиленных предварительно напряженными металлическими обоймами поврежденных сквозными нормальными и перекрестными наклонными трещинами железобетонных балок при действии малоциклового знакопеременной нагрузки высоких уровней.

Для этого авторами был создан способ для восстановления и усиления поврежденных железобетонных балок, находящихся в предаварийном состоянии в результате действия знакопеременной циклической или пульсирующей нагрузки высоких уровней, и устройство для его осуществления. Все опытные образцы-балки были изготовлены и испытаны согласно теории планирования эксперимента по Д-оптимальным планом Бокса В4.

Реализован системный подход к экспериментально-теоретическому изучению напряженно-деформированного состояния обычных, восстановленных и усиленных поврежденных сквозными силовыми трещинами пролетных железобетонных конструкций с помощью металлических предварительно напряженных обоев впервые позволил сделать достоверную количественную и качественную оценку влияния конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия на их физическую модель работы указанных конструкций при статическом и малоцикловом знакопеременном нагружении.

Експериментально доказана можливість і цілесобразність використання на практиці проведеного авторами роботи оригінального способу і пристрою для відновлення і посилення пошкоджених сквозними нормальними і перехрещеними нахилними тріщинами, розділених ними на окремі блоки, залізобетонних балочних конструкцій за рахунок трохстороннього обжаття при діянні ростищої статическої, цикліческої знакоперемінної, сейсміческої, пульсуючої або іншої динаміческої нагрукки при неуполном їх разрушенні з сохранием первоначальної форми.

Ключевые слова: пошкоджена силовими тріщинами залізобетонна балка, металіческaя попередньо напружена обойма, малоциклова знакоперемінна нагрукка.

PHYSICAL MODEL OF WORK OF THE SYSTEM «METAL PRELIMINARY TENSION REINFORCEMENT JACKET - DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAM»

Karpiuk V.M., ScD, Professor,
Danilenko D.S., post-graduate student,
Karpiuk I.A., PhD, Associate Professor,
Danilenko A.V., PhD, Assistant,
Somina Yu.A., PhD, Assistant,

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. Analysis of the damage responsible for the vital activity of a span reinforced concrete structure, structure or building, in general, showed that during their operation there is a significant destruction of the concrete protective layer, corrosion of the reinforcement, crack formation and excessive opening, achievement of unacceptable deflections, etc.

The aim of this work is to experimentally and theoretically study physical models reinforced with prestressed metal jackets damaged by through normal and transverse-inclined cracks in reinforced concrete beams under active low-cycle alternating loads of high levels.

To this end, a method was created for the restoration of damaged reinforced concrete beams needed in an anticipated state, as a result of which alternating cyclic or pulsating loads of high levels arise, and a device for providing it. All tested beam samples were manufactured and tested in accordance with the experimental design theory and D-optimum plan of Box B4.

The accomplished system approach to the experimental and theoretical research of the stress-strain behaviour of the common, renewed and strengthened reinforced concrete span structures damaged with through forced cracks with the aid of metal prestressed metal casings enabled to make a reliable quantitative and qualitative evaluation of the design factors and external factors impact on their load-bearing capacity, stiffness, crack resistance and other performance parameters, either individually or in their interaction with each other, considerably specify the physical model of said structures performance when subjected to static and low-cycle alternate loading.

The experiments have proved a possibility and expediency of practical application of the ingenious method developed by the authors which is distinctive of renewal and strengthening of the damaged reinforced concrete beam structures damaged with through normal and cross inclined cracks which divide the beam into separate blocks due to three-side clamping, and the arrangement for its accomplishment claimed by the patent of invention subjected to action of the increasing static, cyclic, alternate, seismic, fluctuating and other dynamic loading, including, among other things, the reinforced concrete beams damaged during military activity provide such beams did not collapse completely and preserve their initial shape.

Keywords: damaged reinforced concrete beam, prestressed metal casings, low-cycle alternate loading.