

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

ДАНИЛЕНКО ДЕНИС СЕРГІЙОВИЧ

УДК 624.012.4:624.072.4

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ПОШКОДЖЕНИХ СИЛОВИМИ ТРІЩИНАМИ
БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ МЕТАЛЕВИМИ ОБОЙМАМИ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі залізобетонних конструкцій та транспортних споруд Одеської державної академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Карпюк Василь Михайлович,
Одеська державна академія будівництва
та архітектури Міністерства освіти
і науки України, професор кафедри
залізобетонних конструкцій та
транспортних споруд.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Бліхарський Зіновій Ярославович,
Національний університет “Львівська
політехніка”, директор інституту
будівництва та інженерних систем,
м. Львів;

кандидат технічних наук, доцент
Андрійчук Олександр Валентинович,
Національний технічний університет,
доцент кафедри будівництва та цивільної
інженерії, м. Луцьк.

Захист відбудеться « 10 » листопада 2020 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.085.01 при Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, та на сайті <http://odaba.edu.ua>.

Автореферат розісланий « 5 » жовтня 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 41.085.01, д.т.н., доцент

С.О. Кровяков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Життя ставить перед інженерами все нові виклики, пов'язані з підвищенням сейсмічності території, на якій розташовані будівлі та споруди, їхнім фізичним зносом та пошкодженнями, зміною функціонального призначення зі збільшенням навантаження та ін. У зв'язку з цим їм регулярно приходиться вирішувати складні технічні проблеми заміни або підсилення пошкоджених конструкцій. Заміна пошкоджених залізобетонних конструкцій вимагає значних трудових ресурсів, фінансових витрат і зупинки виробництва на тривалий час. Разом з тим, аналіз пошкоджень, відповідальних за життєдіяльність прогінної залізобетонної конструкції (ЗБК), споруди чи будівлі, в цілому, показав, що у процесі їх експлуатації відбувається значне руйнування захисного шару бетону, корозія арматури, утворення і надмірне розкриття тріщин, досягнення недопустимих прогинів тощо.

Подальший 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.

Більшість прогінних ЗБК 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 ЗБК, доведених в процесі вказаної вище експлуатації до граничного або предаварійного 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 методах, які адекватно б відображали реальний напружено-деформований стан як пошкодженої конструкції, так і елементів підсилення. Цим і зумовлена актуальність даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі залізобетонних конструкцій та транспортних споруд Одеської державної академії будівництва та архітектури у рамках наукових досліджень кафедри за держбюджетними темами № 0119U001208 «Відновлення працездатності залізобетонних будівельних конструкцій, пошкоджених під час експлуатації та бойових дій», №118 (№ держреєстрації 0116U002340) «Розрахункові моделі силового опору складнонапружених прогінних залізобетонних конструкцій з урахуванням дії малоциклового навантаження високих рівнів», а також глобальним цілям сталого розвитку України, європейської та світової спільноти до 2030 р..

Мета роботи – отримання результатів експериментально - теоретичних досліджень несучої здатності, тріщиностійкості та деформативності підсилених попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджених наскрізними силовими нормальними і перехресними похилими тріщинами ЗБК за дії

малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів; вдосконалення існуючих та розробки нових фізичних і розрахункових моделей несучої здатності вказаних ЗБК за дії зазначеного навантаження.

Завдання досліджень:

- розробити оригінальний спосіб відновлення та підсилення пошкоджених наскрізними нормальними і перехресними похилими тріщинами залізобетонних конструкцій і пристрій для його здійснення та отримати відповідний патент на винахід;

- експериментально вивчити напружено-деформований стан, несучу здатність, ширину розкриття нормальних і перехресних похилих тріщин, прогини, характер руйнування звичайних 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 припорних 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 дослідних даних;

- зробити порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних підсилених дослідних зразків-балок з результатами розрахунків їх несучої здатності за наявними національними нормами проектування і найбільш розповсюдженими авторськими методами з метою визначення напрямку можливого вдосконалення цих методів;

- виконати комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану пошкоджених дослідних залізобетонних балок, підсилених попередньо напруженими металевими обоймами, з метою уточнення реальних механізмів їх деформування та руйнування, а також перевірки можливості чисельно відтворювати процеси, що в них відбуваються, і прогнозувати характер їх руйнування та несучу здатність;

- розробити фізичну і розрахункову моделі визначення несучої здатності пошкоджених силовими тріщинами залізобетонних балкових конструкцій, підсилених попередньо напруженими металевими обоймами.

Об'єкт дослідження – підсилені попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджені наскрізними нормальними і перехресними похилими силовими тріщинами балкові залізобетонні елементи, що зазнають впливу малоциклових знакозмінних навантажень високих рівнів.

Предмет дослідження – несуча здатність, тріщиностійкість та деформативність, а також особливості напружено-деформованого стану пошкоджених вказаними тріщинами прогінних ЗБК, підсилених зазначеними обоймами, за дії знакозмінного малоциклового навантаження високих рівнів, з послідовним доведенням їх до граничного стану або руйнування.

Методи дослідження: збір, вивчення та аналіз літературних джерел, формулювання задач досліджень, розробка методики виконання натурних та

числових експериментів із застосуванням математичної теорії планування, сучасних методів вимірювання деформацій матеріалів, обробка та аналіз отриманих результатів, математичне та фізичне моделювання напружено-деформованого стану дослідних елементів, порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, формулювання основних висновків та розробка рекомендацій по впровадженню досліджень у практику проектування; загальні методи механіки залізобетону, емпіричних та теоретичних досліджень: абстрагування, аналіз, синтез, індукція, дедукція.

Наукова новизна отриманих результатів:

- експериментально доказана можливість та доцільність використання на практиці розробленого способу відновлення та підсилення (до 1,5 разів) пошкоджених силовими наскрізними тріщинами залізобетонних балкових конструкцій за рахунок їх тристороннього обтиснення і пристрою для його здійснення, закріплених патентом України, за дії зростаючого статичного, малоциклового знакозмінного, сейсмічного та іншого динамічного навантаження, в тому числі під час бойових дій;

- реалізований комплексний підхід до експериментально-теоретичного вивчення НДС звичайних, відновлених та підсилених попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджених залізобетонних балок вперше дозволив зробити достовірну кількісну і якісну оцінку впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на їх несучу здатність, деформативність, тріщиностійкість та інші параметри працездатності як зокрема, так і у взаємодії один з одним, а також уточнити фізичну модель їх роботи за дії вказаного навантаження:

- а) за небезпечною похилою тріщиною при переважній дії згинальних моментів в балках із середніми і великими прольотами зрізу ($a/h_0=1,75 \dots 3,25$);

- б) за похилою стислою смугою між зосередженою силою та опорою у зразках з малими прольотами зрізу ($a/h_0 \leq 1,0$);

- експериментально підтверджений початок втомного руйнування звичайних залізобетонних зразків-балок за дії малоциклового знакозмінного навантаження відносно високих рівнів, який супроводжувався поступовим накопиченням пошкоджень та дефектів, внаслідок чого їхня несуча здатність за 10 повних циклів зі стабілізацією деформацій знизилась, в середньому, на 18%, ширина розкриття похилих тріщин збільшилася до 0,63 мм, прогини зросли на порівняно з одноразовим статичним навантаженням на 20%, а підсилених обоймами – майже у 2 рази при одночасному підвищенні їхньої міцності в 1,5 рази;

- розроблена розрахункова модель несучої здатності приопорних ділянок, пошкоджених силовими тріщинами і підсилених попередньо напруженими металевими обоймами залізобетонних балок, яка опирається на реальні фізичні моделі їх роботи, дозволяє краще за інші існуючі нормативні та авторські методи прогнозувати їхню несучу здатність, зокрема по поперечній руйнуючій силі і моменту (коефіцієнт варіації $v=7\%$);

- комп'ютерне моделювання в ПК "Ліра-САПР" напружено-деформованого стану елементів металевої обойми, сталевий арматури і пошкодженого наскрізними тріщинами і обтисненого обоймою бетону з виключенням із розрахунку частини діаграми $\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$ що відповідає розтягу бетону, дозволило чисельно анімовувати усі

процеси, які відбуваються у системі «пошкоджена тріщинами балка – обойма», характер її деформування та руйнування, вирішувати оптимізаційні задачі при проектуванні підсилення;

- виконаними експериментально-теоретичними дослідженнями встановлено, що прийнята у діючих нормативних документах і авторських методиках фізична і розрахункова модель роботи пошкоджених і підсилених приопорних ділянок залізобетонних балок за небезпечною похилою тріщиною при переважній дії поперечної сили є справедливою тільки при статичному або малоцикловому повторному (одного знаку) навантаженні, а при малоцикловому знакозмінному навантаженні наскрізні перехресні похилі тріщини повністю перерізають тіло бетону і руйнування балок відбувається за однією з небезпечних похилих тріщин при переважній дії згинального моменту. Такий характер роботи і руйнування дослідних елементів повністю підтвердився результатами комп'ютерного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів роботи:

- запропонований спосіб і пристрій дозволяють здійснювати підсилення пошкоджених силовими тріщинами під час експлуатації, а також під час бойових дій, балкових ЗБК без зупинки виробництва;

- поповнений банк дослідних та теоретичних даних, корисних для вдосконалення існуючих методів розрахунку несучої здатності підсилених залізобетонних елементів за дії малоциклового знакозмінного навантаження;

- запропонована розрахункова модель визначення несучої здатності приопорних ділянок підсилюваних прогінних ЗБК комплексно ураховує вплив найбільш значимих конструктивних чинників і доведена до практичного застосування на практиці, що, в цілому, підвищує надійність проектування та безпеку експлуатації таких конструкцій;

- перевірена можливість та експериментально встановлені межі застосування відомих авторських методів розрахунку несучої здатності приопорних ділянок підсилених прогінних ЗБК за дії вказаного навантаження;

- розроблені нелінійні деформаційні скінчено-елементні розрахункові моделі дозволяють за допомогою сучасного обчислювального комплексу анімувати процеси на всіх стадіях роботи прогінних ЗБК з урахуванням їх складного напружено-деформованого стану, реальних фізико-механічних і реологічних властивостей використаних матеріалів;

- результати досліджень за дисертаційною роботою впроваджені у навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів за спеціальністю «Будівельні конструкції, будівлі та споруди», а також у проектній практиці провідних будівельних організацій м. Одеси, зокрема ТОВ «Стікон».

Особистий внесок здобувача заключається у:

- плануванні та проведенні експериментальних досліджень роботи залізобетонних елементів за дії короткочасного ступенево зростаючого та підсилених залізобетонних балок малоциклового знакозмінного навантажень високих рівнів;

- аналізі отриманих результатів експериментів з визначення несучої здатності, тріщиностійкості та деформативності дослідних зразків-балок за вказаних умов навантаження;

- підготовці практичних передумов механіки роботи матеріалів конструкцій за умов їхньої малоциклової витривалості для вдосконалення існуючих методів розрахунку дослідних елементів;

- внесенні пропозицій щодо розрахунку несучої здатності підсилених попередньо напруженими металевими обоймами залізобетонних згинальних елементів на основі проведених досліджень.

Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримано здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких конференціях: II інтернаціональному академічному конгресі “Fundamental and Applied Studies in America, Europe, Asia and Africa” (США, м. Нью-Йорк, 27 вересня 2014 р.), X ювілейній всеукраїнській науково-технічній конференції “Будівництво у сейсмічних районах України” (Україна, м. Одеса, 14 – 18 вересня 2015 р.), IV міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми інженерної механіки” (Україна, м. Одеса, 16 – 19 травня 2017 р.), міжнародній конференції “Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних матеріалів і конструкцій” (Україна, м. Одеса, 11-13 квітня 2018 р.), XI всеукраїнській науково-технічній конференції “Будівництво в сейсмічних районах України” (Україна, м. Одеса, 10 – 14 вересня 2018 р.), 75-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу (Україна, м. Одеса, 16 – 17 травня 2019 р.), III міжнародній науково-практичній конференції “Експлуатація та реконструкція будівель і споруд” (Україна, м. Одеса, 26 – 28 вересня 2019 р.), VII міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми інженерної механіки” (Україна, м. Одеса, 12 – 15 травня 2020 р.), 76-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу (Україна, м. Одеса, 21 – 22 травня 2020 р.), міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини” (Україна, м. Одеса, 11 – 12 червня 2020 р.).

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковані у 20 наукових працях, в тому числі у 7 наукових публікаціях у спеціалізованих фахових виданнях України, 1 – у періодичному закордонному виданні, 1 патент на винахід, 9 тез доповідей.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Робота викладена на 204 сторінках, які включають 121 сторінок основного тексту, 16 таблиць та 30 рисунків, 3 додатки на 12 сторінках та список використаних джерел із 217 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** приведені обґрунтування вибору теми дослідження, сформульовані мета та завдання досліджень, наукова новизна та практичне значення роботи,

представлена її загальна характеристика та зв'язок з науковими планами і програмами.

У **першому розділі** наведений детальний огляд та критичний аналіз існуючих досліджень стосовно вивчення несучої здатності та напружено-деформованого стану (НДС) як бетону й арматури, так і елементів підсилення підсилених залізобетонних конструкцій, в цілому, за дії статичних та знакозмінних навантажень. Особливу увагу приділено розгляду існуючих нормативних та авторських методів розрахунку несучої здатності нормальних та похилих перерізів підсилених за допомогою металевих елементів залізобетонних конструкцій, що згинаються, з урахуванням дії статичних та повторних навантажень.

Значний вклад у розвиток науки по вивченню особливостей НДС, звичайних, пошкоджених та підсилених ЗБК зробили Т.Н. Азізов, Є.М. Бабич, В.А. Баженов, А.М. Бамбура, А.О. Белятинський, З.Я. Бліхарський, Г.Л. Ватуля, О.І. Голоднов, В.С. Дорофєєв, Д.В. Кочкар'єв, О.І. Лапенко, Й.Й. Лучко, М.Г. Мар'єнков, Г.Х. Масюк, В.А. Пашинський, В.М. Ромашко, М.В. Савицький, Л.І. Стороженко, К.В. Єгупов, І.А. Яковенко.

Однак, підсилення ЗБК за допомогою армованих бетонних або розчинних сумішей окрім збільшення їх ваги, інших відомих незручностей має такі недоліки: включення системи підсилення в сумісну роботу з пошкодженим елементом можливе тільки після набору 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.

Окрім вищезазначених видів підсилення окремим, високоефективним, видом являється підсилення за допомогою металевих елементів. Аналіз літературних джерел показав, що великий вклад в розвиток науки по підсиленню пошкоджених ЗБК, підсилених металевими елементами, зробили експериментально-теоретичні дослідження В.В. Пінаджяна, М.М. Онуфрієва, А. І. Мальганова, В.І. Рімшина, В.І. Мартем'янова, С.Д. Семенюка, І.І. Міхеева, М.Г. Чекановича, М.А. Alam, S. Aykaç, K. Hong, M. Hussain, A. Napoli, E. Ozbek, M. Raoof, B. Schranz, M. Shahverdi, R.K. Su, H. Yıngm та інших учених. Разом з тим, залишилося ще багато нерозв'язаних частин цієї загальної проблеми. Так, у національних нормах проектування і у відомих авторських методах відсутні чіткі рекомендації з розрахунку сумісної роботи пошкоджених і доведених до граничного або аварійного стану прогінних ЗБК з елементами попередньо напружених металевих обойм. Розрахунок металевих елементів підсилення ЗБК у авторських методах здійснюється згідно з існуючими положеннями чинних норм проектування вказаних конструкцій, у розрахункових формулах яких замість робочої, монтажної та поперечної арматури використовуються поздовжні, 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.

Недоліками існуючих способів та пристроїв підсилення балкових ЗБК являються:

- підсилення, в основному, нормальних (частіше) і похилих (рідше) перерізів цілої ЗБК на дію тільки знакопостійного поперечного навантаження в головній площині. А при впливі знакозмінного навантаження застосування більшості 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 залізобетонних конструкцій за дії знакозмінного циклічного чи пульсуючого навантаження високих рівнів або сейсмічних впливів, а також нездатність їх до перерозподілу внутрішніх зусиль у нерозрізних балках.

Аналіз цих та інших, ще не вирішених частин вказаної проблеми, дозволив сформулювати мету та завдання досліджень даної дисертаційної роботи.

У другому розділі описаний план експериментальних досліджень, обґрунтування та передумови вибору дослідних факторів. Наведений детальний опис методики проведення випробувань дослідних зразків-балок.

Означені дослідження входять до складу комплексних досліджень кафедри залізобетонних конструкцій та транспортних споруд Одеської державної академії будівництва та архітектури в рамках зазначених вище держбюджетних. Комплексність цих і раніше проведених досліджень полягає в тому, що всі дослідні зразки-балки за серіями можна порівняти за конструкцією. А відрізняються вони видом навантаження, в тому числі малоциклового, та способом їх підсилення після основних випробувань. Разом вони створюють складну мозаїку цілісної картини несучої здатності дослідних елементів.

Так, в першій серії дослідні зразки випробовували всі виконавці тем на дію статичного пропорційно зростаючого навантаження для встановлення еталонного руйнівного зусилля. У другій серії аналогічні зразки випробовували на дію знакозмінного малоциклового навантаження, у третій – на дію аналогічного знакопостійного навантаження. А у четвертій серії дослідів випробовували пошкоджені і доведені до граничного стану зразки другої серії, підсилені металевими попередньо напруженими обоймами, на дію знакозмінного малоциклового навантаження високих рівнів, з послідовним доведенням їх до граничного стану та руйнування.

Дослідні фактори та рівні їх зміни представлені в табл. 1. Оскільки вони можуть впливати нелінійно на функцію виходу, то їх доцільно апроксимувати поліномом другого ступеня. У зв'язку з цим заплановані серії дослідів виконували за чотирьохфакторним трирівневим D-оптимальним планом Бокса В₄, який забезпечує однакову точність прогнозування вихідного параметра в області, що описується радіусом, рівним 1. Розвернутий план експериментів в кодованих і натуральних значеннях факторів представлений в дисертації.

Дослідні зразки – це вільно обперті звичайні однопрогінні та пошкоджені і доведені до граничного стану, балки першої та другої серій прямокутного перерізу

Таблиця 1

Характеристика дослідних факторів та рівнів їх варіювання

Код	Найменування фактору	Рівні варіювання		
		« - 1 »	« 0 »	« +1 »
X ₁	Відносний прольот зрізу, a/h_0	1	2	3
X ₂	Клас бетону, C, МПа	C16/20	C30/35	C40/50
X ₃	Коефіцієнт поперечного армування зовнішньої металевої обойми ρ_{fw} , (A240C)	0,0046	0,0105	0,0263
X ₃ [*]	Коефіцієнт поперечного армування балок ρ_{sw} , (BpI)	0,0016	0,0029	0,0044
X ₄	Рівні попереднього напруження в елементах обойми η_{sf} , (4 серія)	0,25	0,50	0,75
X ₄ [*]	Рівні навантаження балок, η	0,5	0,65	0,8

з номінальними розмірами 1975×200×100мм і розрахунковою довжиною прольоту $L = 9 \cdot h_0 = 1575$ мм, де $h_0=d$ – робоча висота перерізу, що дорівнює 175мм, підсилені металевими попередньо напруженими обоймами. Балки армовані двома пласкими каркасами з поздовжньою верхньою і нижньою (по 2ø14 A500C) арматурою. Поперечна арматура на приопорних ділянках складається з 2ø3, 4, 5 BpI з кроком 87,5мм, а на інших ділянках – 2ø6 A240C. Металеві обойми містять поздовжні елементи підсилення (кутики 25х4), до кінців яких приварені металеві стержні ø18 A240C з різьбою для притягування опорних елементів-пластин 30х210х270 мм, за допомогою гайок. З боків, зверху і знизу пошкоджені залізобетонні балки розташовані поперечні вертикальні та горизонтальні елементи підсилення, стержні - 2ø6, 8, 14 A240C, з відповідними кроком, котрі з одного кінця були приварені до поздовжніх елементів підсилення, а з іншого - мають різьбу для створення попереднього напруження в них. В реальності при підсиленні конструкцій значних розмірів замість гайок будуть використовуватися стяжні муфти (див. патент на винахід України [8]).

Конструкція і армування зразків-балок наведені на рис. 1.

Для випробування дослідних зразків-балок була запроектована, виготовлена і сертифікована універсальна силова установка (рис. 2), поперечне навантаження в якій створювали за допомогою гідравлічного домкрату ДГ-50, яке передавали на дослідний зразок по чергові за чотирьохточковою схемою за допомогою відповідних траверс у вигляді двох однаково розташованих зосереджених сил та опорних реакцій, контрольованих манометром насосної станції й силовим динамометром. Навантаження прикладали ступенями з витримкою до 15 хвилин і усіма вимірами на початку і в кінці кожного ступеня навантаження.

Деформації арматури і бетону, а також поздовжніх і поперечних елементів попередньо напруженої металевої обойми вимірювали за допомогою дротяних та фольгових тензорезисторів з базою 20, 40 і 50 мм, приклеєних за загальноприйнятою методикою. Перехід від вимірювань у досліді деформацій до напружень 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

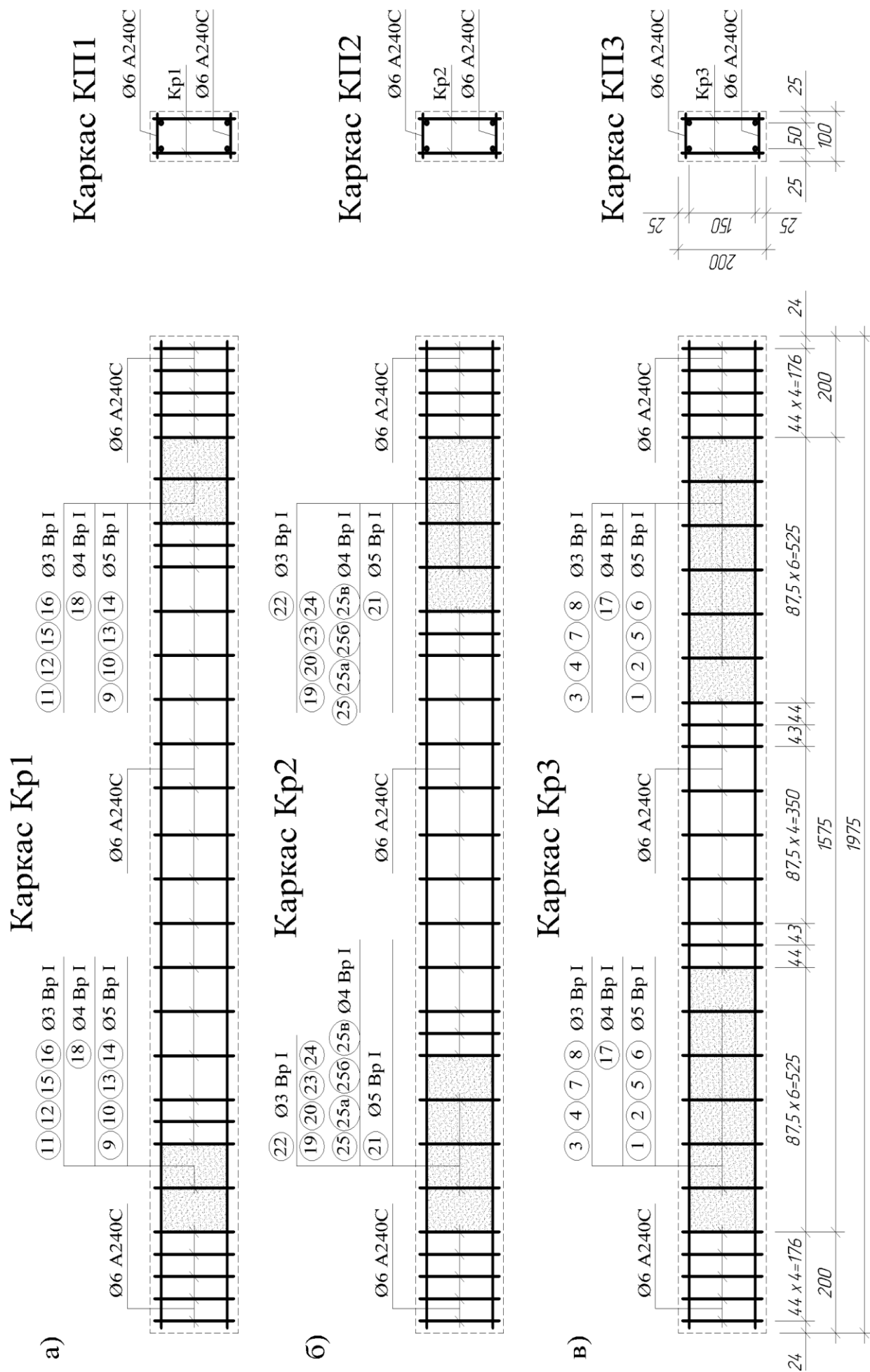


Рис. 1 Конструкція та армування дослідних зразків-балок з малим (а), середнім (б) та великим (в) прольотами зрізу (і – номер досліджу)

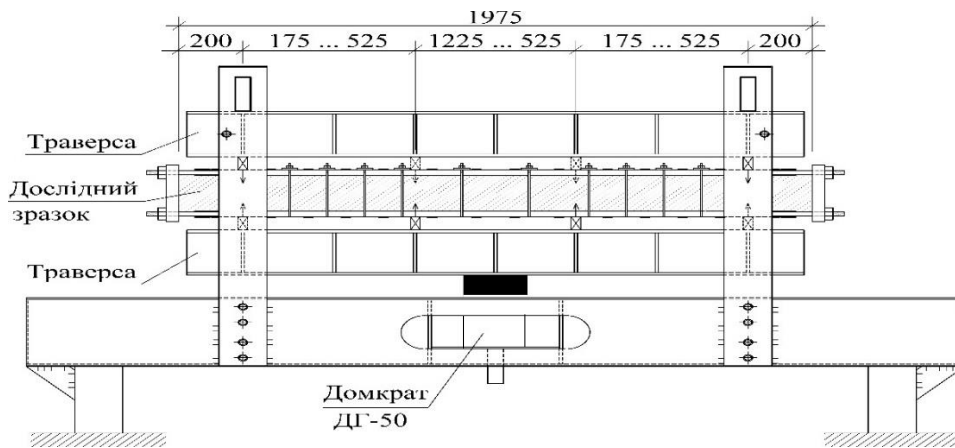


Рис. 2 Схема універсальної силової установки

здійснювали за допомогою індикаторів годинникового типу, а за вертикальними переміщеннями – прогиномірів Аістова. Схема розташування вимірювальних приладів показана на рис. 3. Для визначення ширини розкриття похилих і нормальних тріщин використовували мікроскоп марки МПБ-2 з ціною поділки 0,05мм. Ширину розкриття нормальних тріщин заміряли на рівні розташування нижньої розтягнутої арматури, а похилих тріщин – в прольоті зрізу в місці, де вона візуально здавалася найбільшою. Перед основним експериментом спочатку по черзі випробовували 28 дослідних балок (зразків-близнюків) першої серії на дію одноразового короткочасного ступінчасто зростаючого навантаження, практично, до граничного стану, коли ширина розкриття похилих тріщин та/або стріла прогинів перевищували допустимі значення ($w_k \geq 0,8$ мм, $f \geq \ell / 150$). Після цього випробовували аналогічні дослідні балки другої серії при впливі знакозмінного малоциклового поперечного навантаження зазначених рівнів з базою випробувань $N=20$ циклів, після чого відбувалося довантаження зразка, практично, до руйнування або досягнення граничного стану, якщо цього не відбулося раніше на попередніх циклах. Після цього пошкодженні або доведені до граничного стану балки другої серії підсилювалися металевими попередньо напруженими обоймами, й піддавалися знакозмінному навантаженню з базою $N=20$ циклів, після чого відбувалося довантаження зразків, практично, до руйнування або досягнення ними граничного стану.

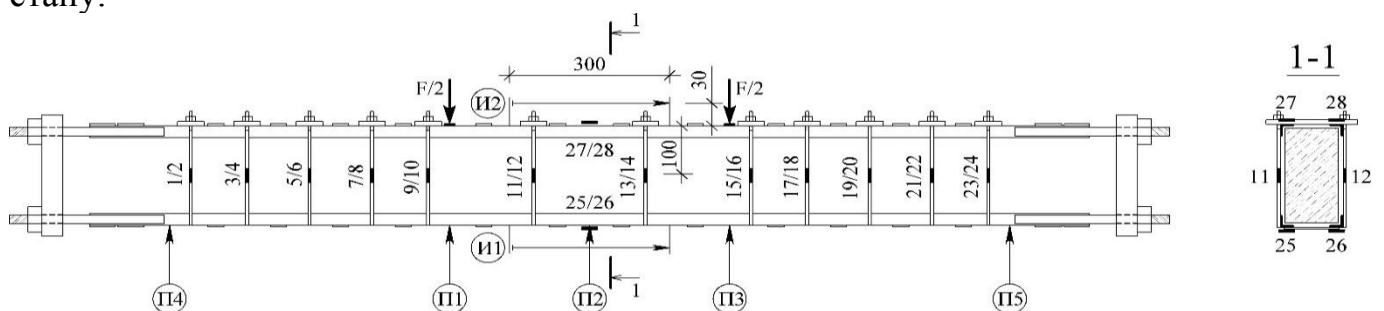


Рис. 3 Схема розташування вимірювальних приладів у дослідних зразках

Дослідні призми з розмірами 400x100x100мм випробовували по аналогії з балками на пресі марки ЗІМ П-125. Частина дослідних зразків-призм піддавалась дії короткочасного статичного навантаження, а частина – впливу циклічного навантаження з базою випробувань $N = 20$ циклів. На рис. 4 показані осереднені діаграми деформування цих бетонних призм.

C 16/20

C 30/35

C 40/50

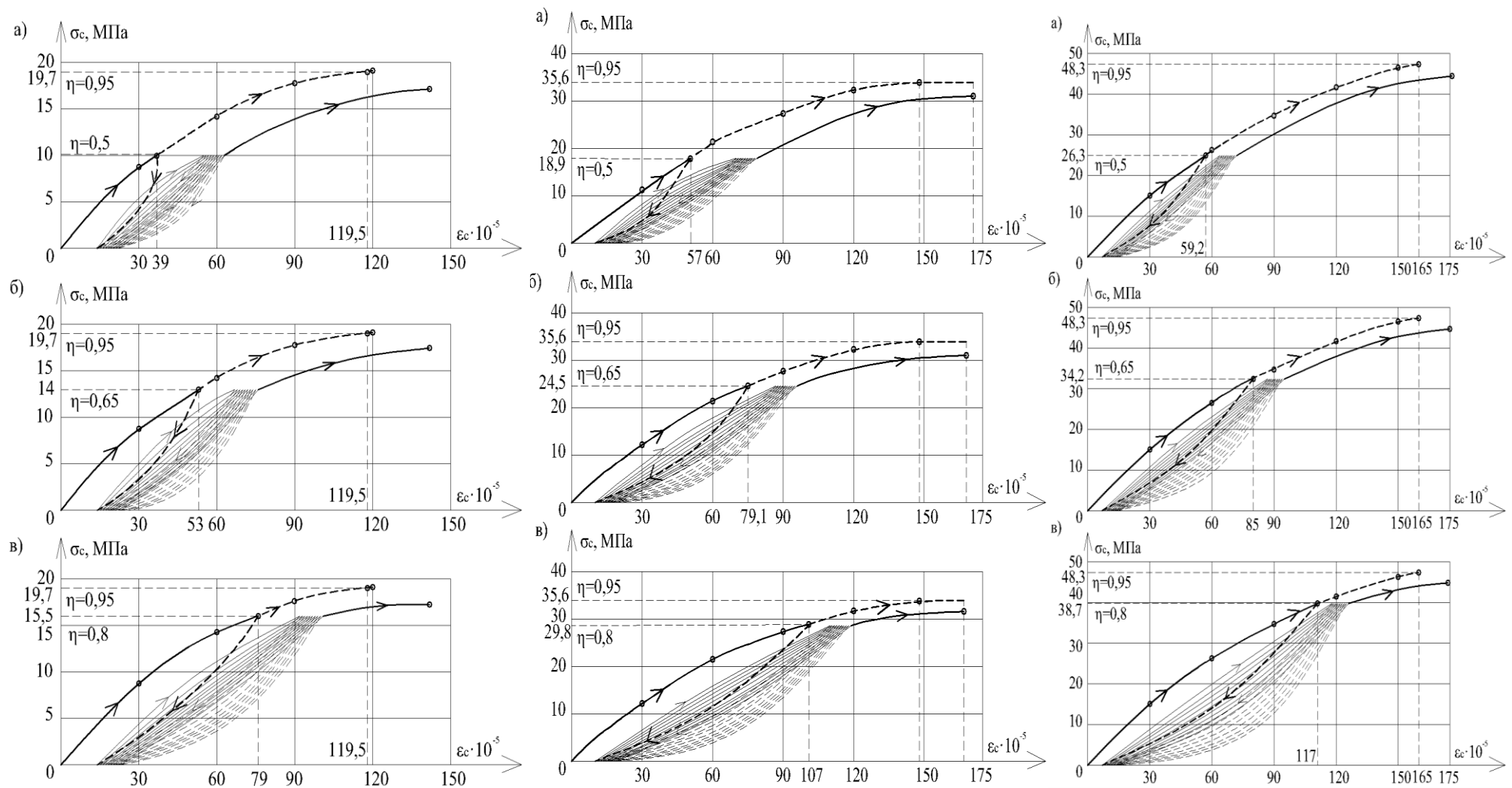


Рис. 4 Осереднені деформації дослідних призм при їхньому малоцикловому навантаженні до рівнів $\eta = 0,5$ (а), $\eta = 0,65$ (б), $\eta = 0,8$ (в) з наступним довантаженням до руйнування, виготовлених з бетонів класів C16/20, C30/35, C40/50

У третьому розділі дисертації наведені результати експериментальних досліджень несучої здатності дослідних зразків-балок, після обробки яких були отримані адекватні експериментально-статистичні залежності несучої здатності, тріщиностійкості та деформативності дослідних елементів з достатньою інформаційною корисністю, які дозволили оцінити вплив на вихідні параметри кожного дослідного конструктивного чинника та фактора зовнішньої дії як зокрема, так і у взаємодії один з одним.

Так, міцність (несуча здатність) дослідних елементів може бути представлена наступними експериментальними залежностями:

$$\hat{Y}(V_{u1}^{exp}) = 98 - 41X_1 + 12X_2 + 6X_3 + 16X_1^2 - 7X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{кН}, \quad v = 5,2\%; \quad (1)$$

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

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

Геометрична інтерпретація залежності несучої здатності похилих перерізів дослідних балок від конструктивних чинників та зовнішнього навантаження показана на рис. 5, із якого видно, що найбільший вплив на неї має відносний проліт зрізу. При цьому, несуча здатність підсилених зразків є значно вищою від міцності похилих перерізів звичайних балок. В цілому, підтверджується виявлена О.С. Залесовим, Ю.А. Климовим, В.М. Карпюком та іншими дослідниками закономірність зменшення міцності похилих перерізів звичайних непідслених балок зі збільшенням прольоту зрізу за нелінійним законом. В свою чергу, завдяки перерозподільчим властивостям металевих обойм ця закономірність у підслених балках перетворюється на лінійну. Наступним за величиною впливу є клас бетону. При цьому, при збільшенні класу від C16/20 до C40/50 несуча здатність зростає також за нелінійним законом. Аналогічна картина спостерігається з підвищенням коефіцієнтів поперечного армування ρ_{sw} , ρ_{fw} . Збільшення рівня малоциклового поперечного навантаження η від 0,5 до 0,8 виявився негативним при знакозмінному його характері тільки для звичайних непідслених балок другої серії.

Також були отримані адекватні математичні моделі передруйнівних прольотних прогинів:

$$\hat{Y}(f_{u1}^{exp}) = 6 + 1,5X_1 + 0,65X_2 + 0,7X_3 + 0,35X_4 - 0,5X_1^2 + 0,2X_1X_3, \text{мм} \quad v = 5,5\%; \quad (4)$$

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

$$\hat{Y}(f_{uf}^{exp}) = 13,2 + 6,6X_1 - 0,7X_2 + 0,85X_3 - 0,8X_4 + 1,5X_1^2 + 0,4X_2^2 + 0,6X_1X_3 - 0,8X_1X_4 + 0,9X_2X_4 - 0,6X_3X_4, \text{мм} \quad v = 5,1\%. \quad (6)$$

Прогини підслених балок значно перевищують прогини звичайних елементів із-за піддатливості з'єднання "металева обойма підсилення – пошкоджена балка". А найбільший вплив має величина прольоту зрізу. З його збільшенням прогини зростають нелінійно.

Отриманні данні максимальної ширини розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину, після обробки, дозволили отримати наступні математичні моделі:

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

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

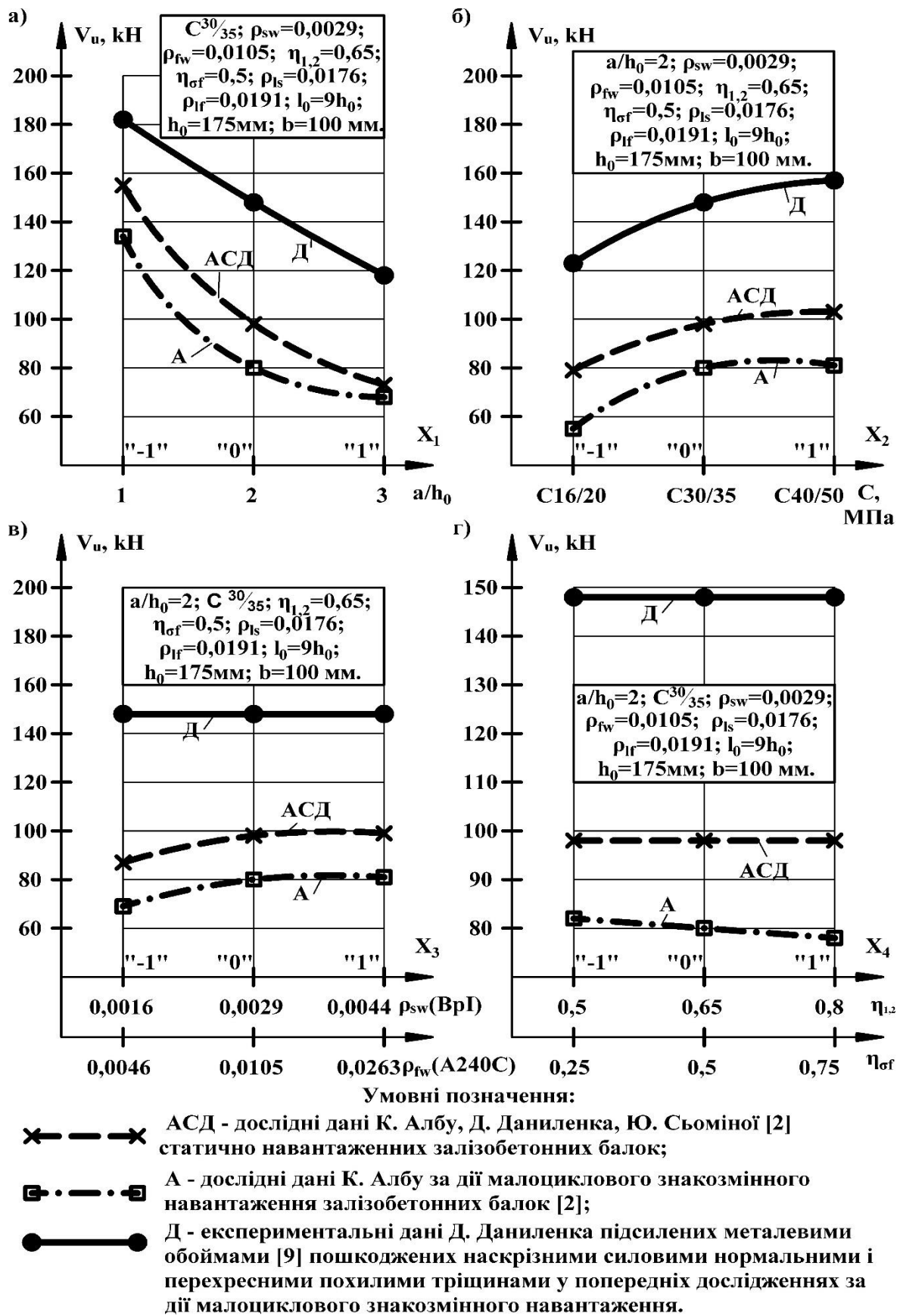


Рис. 5 Вплив відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в) та рівнів поперечного навантаження і попереднього напруження в елементах обойми (г) на несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів перед їхнім руйнуванням

Максимальна ширина розкриття нормальних тріщин у всіх дослідних зразках не перевищувала допустимих значень.

Оброблені експериментальні данні, максимальної ширини розкриття похилих тріщин, можуть бути охарактеризовані наступними статистичними залежностями:

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

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

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

Максимальна ширина розкриття похилих тріщин на приопорних ділянках значно перевищувала ширину розкриття нормальних тріщин у зоні “чистого” згину. Характерно, що в усіх дослідах другої та четвертої серій ширина розкриття похилих тріщин у підсиленних обоймами балках була меншою від ширини розкриття похилих тріщин у звичайних балках при однократному статичному навантаженні.

Максимальна довжина проекції небезпечної похилої тріщини на горизонтальну вісь балки може бути представлена наступними адекватними статистичними моделями:

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

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

Довжина проекції небезпечної похилої тріщини збільшується, насамперед, при збільшенні прольоту зрізу і зменшується при збільшенні кількості поперечного армування.

Віддаль між нормальними тріщинами у зоні "чистого згину" характеризується залежностями:

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

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

Середня віддаль між нормальними тріщинами у зоні “чистого” згину зменшується при збільшенні прольоту зрізу, а класу бетону – навпаки, збільшується.

У **четвертому розділі дисертації** зроблене порівняння несучої здатності дослідних пошкоджених наскрізними силовими тріщинами залізобетонних балок, підсиленних попередньо напруженими металевими обоймами, з результатами розрахунків за національними нормами проектування України, Білорусі і Росії, а також найбільш розповсюдженими авторськими методами В.В. Пінаджяна, Н.М. Онуфрієва, А.І. Мальганова та ін. показало, в цілому, незадовільну їх збіжність.

По поперечній силі ця розбіжність у національних нормах проектування коливається в межах від 22,9% до 47,5%, а за авторськими методами – від 15% до 26,3% (рис. 6). Родзинкою у даному питанні є: урахування (більшість авторських методів) чи не урахування (норми проектування) роботи пошкодженого силовими тріщинами бетону у складі підсилюваної конструкції.

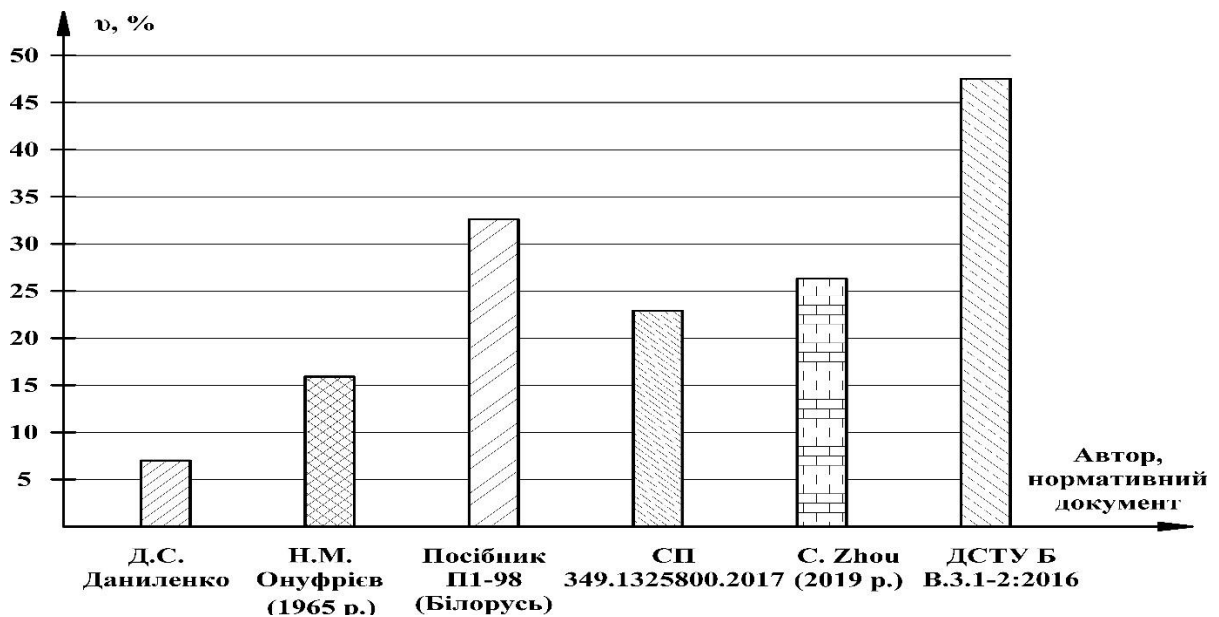


Рис. 6 Порівняння несучої здатності, по поперечній силі, дослідних пошкоджених наскрізними силовими тріщинами залізобетонних балок, підсилених попередньо напруженими металевими обоймами, з результатами розрахунків за національними нормами проектування та авторськими методами

Виконане у цьому ж розділі моделювання напружено-деформованого стану елементів попередньо напруженої металевої обойми, бетону з наскрізними перехресними похилими і нормальними тріщинами, а також стержнів поздовжньої і поперечної арматури балок за допомогою нелінійного скінчено-елементного програмного комплексу "Ліра - САПР" версії 2018 року дозволили чисельно його відтворити та більш повно розкрити механізм деформування і руйнування системи "пошкоджена балка – металева обойма підсилення", виявити критерії руйнування вказаної системи і достовірно прогнозувати її несучу здатність (рис. 7).

Так, зокрема, моделювання роботи такої системи підтвердили дані про те, що руйнування дослідних елементів з великими і середніми прольотами зрізу ($a/h_0=3$ і 2) починається з текучості крайніх поздовжніх елементів обойми і закінчується текучістю найближчих до цих елементів поздовжніх стержнів арматурного каркаса. А руйнування балок з малими прольотами зрізу ($a/h_0=1$) починається в той момент, коли максимальні дотичні напруження в бетоні стислої смуги між зосередженою силою і опорою по величині досягають половини нормальних стискаючих напружень в ньому.

Опираючись на дані експериментальних досліджень, виявлені механізми деформування і руйнування, а також результати моделювання напружено-деформованого стану пошкоджених балок і елементів обойми підсилення запропонована розрахункова модель несучої здатності приопорних ділянок і сумісної роботи вказаних балок з попередньо напруженими металевими обоймами які містять у собі дві розрахункові схеми:

1) розрахунок підсилених попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджених дослідних залізобетонних балок з середніми і великими ($a/h_0=1,75 \dots 3,25$) прольотами зрізу на дію згинального моменту для забезпечення

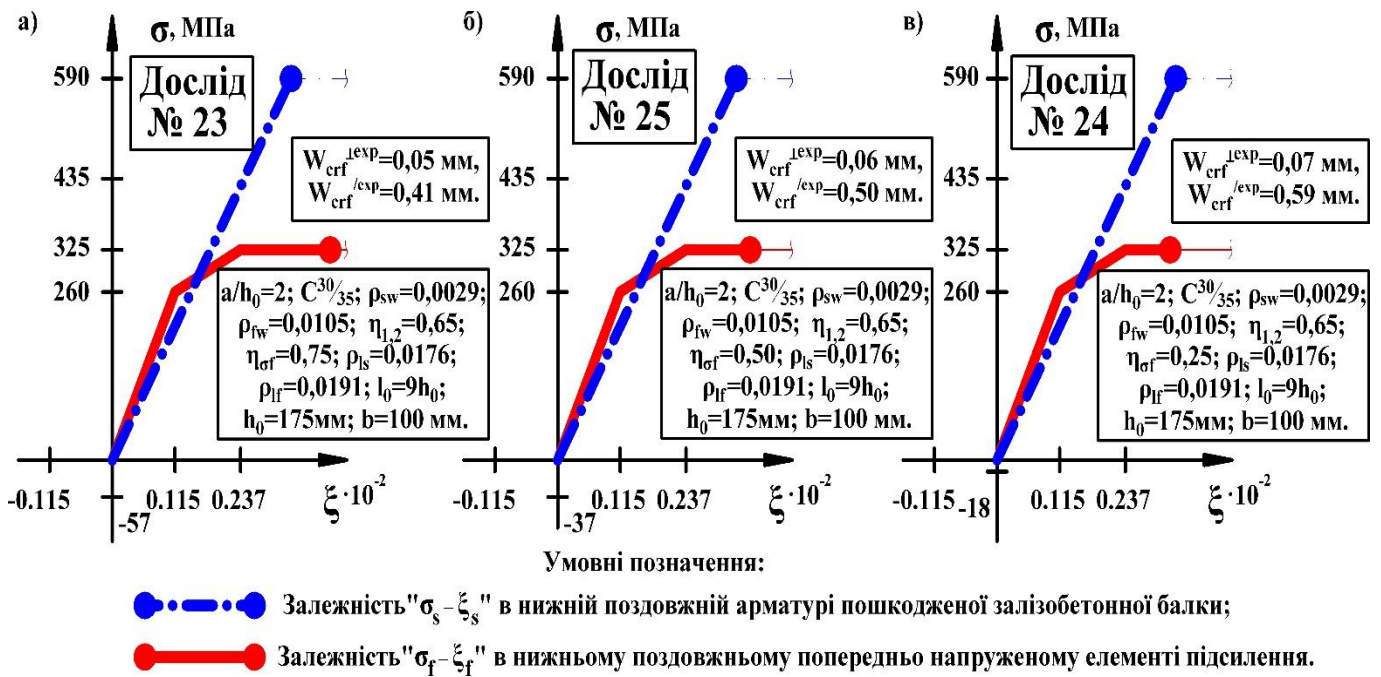


Рис. 7 Нормальні напруження і деформації в поздовжніх стержнях арматури пошкодженої залізобетонної балки та нижніх елементах металевої обойми підсилення при навантаженні $F=V=150$ кН і рівнях попереднього напруження в них: $\eta_{sf}=0,75\sigma_{uf}$ (а); $\eta_{sf}=0,50\sigma_{uf}$ (б); $\eta_{sf}=0,25\sigma_{uf}$ (в) при напівциклі поперечного навантаження зверху-вниз.

міцності по похилій тріщині здійснюється по аналогії з методикою О.С. Залєсова, О.Ф. Ільїна, Ю.А. Климова за небезпечним похилим перерізом за умови:

$$M < M_f + M_s + M_{fw} + M_{sw}, \quad (16)$$

Момент M визначається від зовнішнього навантаження, розташованого по один бік від перерізу, що розглядається, відносно осі, перпендикулярній площині дії моменту і яка приблизно проходить через точку прикладення рівнодійної стискаючих зусиль у стиснутій зоні (рис. 8).

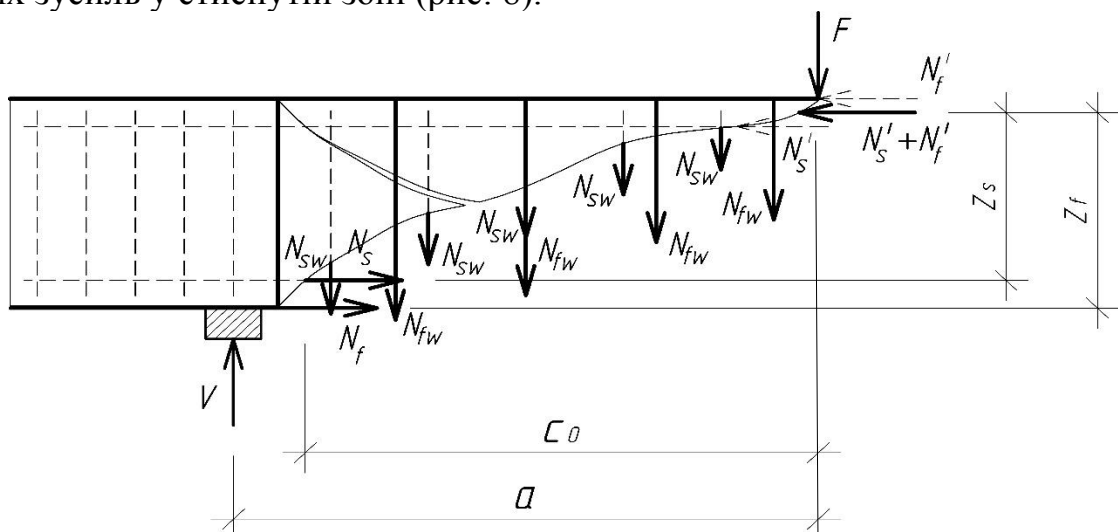


Рис. 8 Схема внутрішніх зусиль в похилому перерізі при розрахунку його на дію згинального моменту

Моменти M_f , M_s , M_{fw} , M_{sw} на напівциклі поперечного навантаження “зверху-вниз” повинні визначатися як сума моментів відносно тієї ж осі від зусиль, відповідно, в поздовжніх нижніх розтягнутих кутиках обойми, нижній робочій арматурі балки, вертикальних попередньо напружених елементах обойми та вертикальних хомутах балки, що перетинаються небезпечною похилою тріщиною (перерізом).

Залишки висоти стиснутої зони над похилим перерізом можна визначити за умови рівноваги проекцій зусиль в бетоні та арматурі балки, а також елементах обойми на поздовжню вісь балки. При цьому:

$$M_f = \sigma_f \cdot A_f \cdot z_f, M_s = \sigma_s \cdot A_s \cdot z_s, M_{fw} = q_{fw} \cdot a^2/2, M_{sw} = q_{sw} \cdot a^2/2, \quad (17)$$

де σ_f , σ_s - напруження, відповідно, у поздовжніх елементах обойми і арматури;

q_{fw} , q_{sw} - зусилля (інтенсивність) відповідно, у вертикальних елементах обойми і хомутах балки на одиницю довжини елемента, що підсилюється.

2) розрахунок несучої здатності підсилених попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджених залізобетонних балок з малими ($a/h_0=0,75\dots1,25$) прольотами зрізу на дію поперечної сили для забезпечення міцності стиснутої похилої смуги бетону балки між похилими тріщинами, по аналогії з методикою О.С. Залесова, О.Ф. Ільїна, Ю.А. Климова:

$$V < 0,3 \cdot \varphi_{w1} \cdot \varphi_{c1} \cdot f_{ck} \cdot b \cdot h_{red}, \quad (18)$$

де φ_{w1} – коефіцієнт, що ураховує вплив хомутів, нормальних до поздовжньої осі елемента визначається за формулою $\varphi_{w1}=1+5 \cdot \alpha \cdot \mu_w$;

φ_{c1} – коефіцієнт, який оцінює здатність різних видів бетону до перерозподілу зусиль $\varphi_{c1}=1-\beta \cdot f_{ck}$. $\beta=0,01$ – для важкого, дрібнозернистого та ніздрюватого бетону;

f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск, МПа;

b – ширина перерізу;

h_{red} – приведена робоча висота перерізу підсиленої балки, $h_{red} = h_0 + \Delta z$;

α – коефіцієнт приведення пружних властивостей арматури E_s до початкового модуля пружності бетону E_c , $\alpha=E_s/E_c$;

μ_w – коефіцієнт поперечного армування пошкодженої балки по її довжині, $\mu_w=A_{sw}/(b \cdot s)$.

При цьому, ураховуються зменшення міцності пошкодженого тріщинами бетону коефіцієнтом $K=0,8$ згідно рекомендацій М.І. Карпенка, Т.М. Петцольда, Ю.Г. Болошенка та ін..

Для пошкоджених балок з проміжними значеннями прольоту зрізу від малого до середнього ($a/h_0=1,25-1,75$) рекомендується почергово розглянути обидві, представлені вище, розрахункові схеми і для подальшого розрахунку прийняти середнє значення несучої здатності припорних ділянок вказаних конструкцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Експериментально доказана можливість та доцільність використання на практиці розробленого способу відновлення та підсилення (до 1,5разів) пошкоджених силовими наскрізними тріщинами залізобетонних балкових конструкцій за рахунок їх тристороннього обтиснення і пристрою для його здійснення, закріплених патентом, за дії зростаючого статичного, малоциклового

знакозмінного, сейсмічного та іншого динамічного навантаження, в тому числі під час бойових дій.

Застосування металевої попередньо напруженої обойми для підсилення пошкоджених балок збільшує їхню несучу здатність в 1,5 і прогини перед руйнуванням в 1,8 разів, а максимальну ширину розкриття похилих тріщин зменшує в 1,2 рази.

2. Реалізований комплексний підхід до експериментально-теоретичного вивчення НДС звичайних, відновлених та підсилених вказаним в п.1 способом балок дозволив зробити кількісну і якісну оцінку впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на їх несучу здатність, деформативність, тріщиностійкість та інші параметри працездатності як зокрема, так і у взаємодії один з одним, а також уточнити фізичну картину їх роботи. Зокрема було встановлено, що несуча здатність дослідних елементів за I групою граничних станів нелінійно збільшується:

- зі зменшенням величини відносного прольоту зрізу a/h_0 від 3 до 1 у першій (АСД), другій (А) і четвертій (Д) серіях на 43-84%;
- зі збільшенням класу бетону від С16/20 до С40/50 – на 23-33%;
- зі збільшенням кількості поперечної арматури ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 на 12-15%;
- при зменшенні рівня малоциклового знакозмінного навантаження η від 0,8 до 0,5 на 5%;
- при одночасному зменшенні відносного прольоту зрізу a/h_0 і збільшенні класу бетону – до 9 %.

3. Малоциклове повторне навантаження звичайних непідсилених балок знижує несучу здатність приопорних ділянок, в середньому, на 8% за дослідом у третій (С) серії, а малоциклове знакозмінне за дослідом у другій (А) серії – на 18%. При цьому, їхні прогини збільшуються на 20%. Характер малоциклового навантаження не впливає на несучу здатність вказаних ділянок підсилених попередньо напруженими металевими обоймами пошкоджених балок.

4. Порівняння несучої здатності дослідних пошкоджених наскрізними силовими тріщинами залізобетонних балок, підсилених попередньо напруженими металевими обоймами, з результатами розрахунків за національними нормами проектування України, Білорусі, Росії, а також найбільш розповсюдженими авторськими методами В.В. Пінаджяна, М.М. Онуфрієва, А.І. Мальганова, Chunli Zhou та ін. показало, в цілому, незадовільну їх збіжність. Це зумовлено недосконалістю закладених в них передумов і розрахункових схем. Зокрема з урахуванням або не урахуванням роботи пошкодженого тріщинами бетону.

5. Виконане моделювання напружено - деформованого стану елементів попередньо напруженої металевої обойми, бетону з наскрізними перехресними похилими і нормальними тріщинами, а також стержнів поздовжньої і поперечної арматури за допомогою нелінійно-скінчено-елементного програмного комплексу «Ліра- САПР» версії 2018 року дозволило чисельно його відтворити, більш повно розкрити механізм деформування і руйнування системи «пошкоджена балка – металева обойма підсилення», виявити критерії руйнування вказаної системи. Зокрема, було підтверджено, що руйнування дослідних елементів з великими і середніми прольотами зрізу починається з текучості поздовжніх елементів обойми і закінчується текучістю найближчих до цих елементів поздовжніх стержнів

арматурного каркаса. А руйнування балок з малими прольотами зрізу починається в той момент, коли максимальні дотичні напруження в бетоні стислої смуги між зосередженою силою і опорою по величині досягають половини максимальних нормальних стискаючих напружень в ньому. За допомогою такого моделювання можна анімувати усі процеси, що відбуваються у зазначеній системі, чисельно вирішувати оптимізаційні задачі.

6. Запропонована розрахункова модель несучої здатності приопорних ділянок і сумісної роботи пошкоджених балок з попередньо напруженими металевими обоймами містить у собі дві розрахункові схеми:

- на дію згинального моменту для забезпечення несучої здатності за небезпечною похилою тріщиною в пошкоджених залізобетонних балках із середніми і великим ($a/h_0 = 1,75-3,25$) прольотами зрізу без урахування роботи пошкодженого бетону;

- на дію поперечної сили для забезпечення несучої здатності пошкодженого силовими тріщинами стиснутого бетону похилої смуги між зосередженою силою і опорою в балках з малими ($a/h_0 = 0,75-1,25$) прольотами зрізу урахуванням зменшення міцності пошкодженого тріщинами бетону коефіцієнтом $K=0,8$. В балках з проміжними значеннями відносного прольоту зрізу ($a/h_0 = 1,25-1,75$) рекомендується по чергову розглядати обидві розрахункові схеми і для подальшого розрахунку приймати середнє значення несучої здатності їхніх приопорних ділянок.

Застосування прийнятої моделі дозволяє досягти задовільної (коефіцієнт варіації $v=7\%$) збіжності між дослідними і розрахунковими значеннями несучої здатності пошкоджених балок, підсиленних вказаною обоймою.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Несущая способность железобетонных балок, усиленных углепластиковыми при немногочисленных циклических нагрузках / Е. И. Албу, Д. С. Даниленко, Ю. А. Семина, В. М. Карпюк. // Галузеве машинобудування, будівництво. Збірник наукових праць ПолтНТУ. – 2014. – №3. – С. 5–10. (індексується базами Index Copernicus, EBSCO, DOAJ).

(Внесок здобувача: планування та підготовка до експериментальних досліджень роботи пошкоджених залізобетонних балок з використанням підсилення їх вуглецевими полотнами і ламелями).

2. 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.

(Внесок здобувача: оцінка зміни міцності нормальних та похилих перерізів дослідних конструкцій у залежності від характеру малоциклового навантаження).

3. Вплив конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на несучу здатність балкових конструкцій при малоцикловому навантаженні / [В. М. Карпюк, К. І. Албу, Д. С. Даниленко та ін.]. // Вісник Одеської державної академії

будівництва та архітектури. – 2016. – №61. – С. 130–136. (*індексується базою Index Copernicus*).

(*Внесок здобувача: досліджений вплив дослідних факторів на несучу здатність балок за дії малоциклового навантаження*).

4. Параметри тріщиностійкості балкових залізобетонних елементів при дії знакозмінного та знакопостійного циклічних навантажень / [В. М. Карпюк, К. І. Албу, Д. С. Даниленко та ін.]. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – №62. – С. 220–228. (*індексується базою Index Copernicus*).

(*Внесок здобувача: обробка та аналіз експериментальних даних по тріщиностійкості дослідних елементів з урахуванням змінних факторів*).

5. Використання деформаційно-силової моделі при розрахунку нормальних перерізів бетонних та залізобетонних елементів за першою групою граничних станів / В. М. Карпюк, А. І. Костюк, Ю. А. Сьоміна, Д. С. Даниленко. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – №66. – С. 28–34. (*індексується базою Index Copernicus*).

(*Внесок здобувача: апробація використання деформаційно-силової моделі нормальних перерізів за методикою проф. В.М. Ромашка*).

6. Deformation-strength model application at the determining of reinforced concrete structures stress-strain state / V. M. Karpiuk, A. I. Kostyuk, Y. A. Somina, D. S. Danilenko. // Праці Одеського національного політехнічного університету. – 2017. – №2. – С. 18–23. (*індексується базами Index Copernicus, EBSCO, DOAJ*).

(*Внесок здобувача: розробка рекомендацій до практичного застосування деформаційно-силового методу проф. В.М. Ромашка для розрахунку прогінних ЗБК*).

7. Karpiuk V. M. Method of the restoring and reinforcement of damaged bending reinforced concrete elements under cyclic loading / V. M. Karpiuk, D. S. Danilenko, Y. A. Somina. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2018. – №72. – С. 33–39. (*індексується базою Index Copernicus*).

(*Внесок здобувача: розробка способу відновлення та підсилення пошкоджених ЗБК, що згинаються, а також пристрою для його здійснення*).

Патент на винахід

8. Пат. 119294 Україна, МПК E04B 1/18, E04B 1/20, E04BG 23/02. Спосіб відновлення та підсилення пошкоджених залізобетонних балок і пристрій для його здійснення / Карпюк В.М., Даниленко Д.С., Карпюк І.А., Даниленко А.В.; заявник та патентовласник Одеська державна академія будівництва та архітектури. – № а2018 00651 ; заявл. 23.01.2018 ; опубл. 27.05.2019, Бюл. №10.

(*Внесок здобувача: подана ідея тристороннього обтискання пошкоджених залізобетонних конструкцій та запропонований пристрій для його здійснення*).

Стаття у науковому періодичному виданні іншої держави

9. Load-bearing capacity of damaged reinforced concrete span structures strengthened with prestressed metal casings / [D. Danilenko, M. Zavoloka, V. Karpiuk та ін.]. // Journal of Engineering Science. – 2020. – №2. – С. 106–127. (*індексується базою Open AIRE*).

(Внесок здобувача: представленні результати комплексних експериментальних досліджень звичайних та підсилених залізобетонних балок за дії статичних і знакозмінних малоциклових навантажень високих рівнів).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

10. Вплив циклічного знакозмінного навантаження на міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних елементів, що згинаються / [В. М. Карпюк, К. І. Албу, Д. С. Даниленко та ін.]. // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика. – 2014. – №6. – С. 146–163. *(індексується базою Google Scholar).*

(Внесок здобувача: обробка та висвітлення частини результатів експериментальних досліджень за обраною темою).

11. Математичні моделі силового опору складнонапружених прогінних залізобетонних конструкцій з урахуванням дії малоциклового навантаження високих рівнів / В. М. Карпюк, К. І. Албу, Д. С. Даниленко, Ю. А. Сьоміна. // Будівельні конструкції. Збірник наукових праць.. – 2015. – №82. – С. 424–435.

(Внесок здобувача: виведені експериментально-статистичні залежності впливу дослідних факторів на несучу здатність зразків та побудова відповідних графіків).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

12. Карпюк В., Албу К., Даниленко Д., Сьоміна Ю. Експериментальні дослідження працездатності залізобетонних балок при дії циклічного навантаження. Papers and commentaries of the 2nd International Academic Congress «Fundamental and Applied Studies in America, Europe, Asia and Africa», USA, New York, 2014. P. 682-696.

(Внесок здобувача: розробка методики експериментальних випробувань дослідних елементів, представлення частини отриманих результатів досліджень працездатності експериментальних зразків).

13. Застосування деформаційно-силової моделі при визначенні напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій / В. М. Карпюк, А. І. Костюк, Ю. А. Сьоміна, Д. С. Даниленко. // Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки». – Одеса : ОДАБА, 2017. – С. 125–127.

(Внесок здобувача: виконання прогностичних розрахунків несучої здатності та деформативності дослідних зразків за дії статичного і малоциклового навантажень).

14. Способ восстановления и усиления поврежденных железобетонных балок при циклическом действии нагрузки / В. М. Карпюк, Д. С. Даниленко, Ю. А. Семина, Е. И. Албу. // Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій : зб. тез доп. міжнародної конф. – Одеса : ОДАБА, 2018. – С. 51–54.

(Внесок здобувача: розробка способу відновлення та підсилення пошкоджених залізобетонних балок з використанням клеєвих сумішей на контакті з металевими поздовжніми елементами обойм).

15. Карпюк В. М. Восстановление и усиление железобетонных конструкций, поврежденных в результате сейсмического воздействия / В. М. Карпюк, Д. С. Даниленко, Ю. А. Семина. // Будівництво в сейсмічних районах України : зб. тез доп. XI Всеукр. наук.-техн. конф. – Одеса : ОДАБА, 2018. – С. 80–82.

(Внесок здобувача: розробка способу і пристрою відновлення та підсилення пошкоджених залізобетонних балок при сейсмічних впливах).

16. Даниленко Д. С. Моделирование напряженно-деформируемого состояния поврежденной железобетонной балки, усиленной металлической преднапряженной обоймой / Д. С. Даниленко, Ю. А. Семина, В. М. Карпюк. // 75 науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської академії будівництва та архітектури, 16-17 травня, 2019 р. – Одеса : ОДАБА, 2019. – С. 79.

(Внесок здобувача: моделювання роботи пошкоджених залізобетонних балок, підсилених металевими попередньо напруженими обоймами у фізично нелінійній постановці завдання за допомогою ПК «Ліра-САПР»)

17. Даниленко Д. С. Напряженно-деформированное состояние железобетонной балки с перекрестными трещинами, усиленной металлической обоймой / Д. С. Даниленко, Ю. А. Семина, В. М. Карпюк. // Експлуатація та реконструкція будівель і споруд : тези доп. III міжнар. конф. – Одеса : ОДАБА, 2019. – С. 55.

(Внесок здобувача: аналіз напружено-деформованого стану пошкоджених тріщинами залізобетонних балок, підсилених металевими обоймами, з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів).

18. Напружено-деформований стан підсилених металевою обоймою, залізобетонних балок за дії циклічного знакозмінного навантаження / В. М. Карпюк, Д. С. Даниленко, І. А. Карпюк, А. В. Даниленко. // тези доповідей 76 науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської академії будівництва та архітектури, 21-22 травня, 2020 р. – Одеса : ОДАБА, 2020. – С. 92.

(Внесок здобувача: представлення результатів експериментальних досліджень несучої здатності пошкоджених дослідних зразків-балок, підсилених металевими попередньо напруженими обоймами, за I групою граничних станів).

19. Деформативність пошкоджених залізобетонних балок, підсилених металевими обоймами / [Д. С. Даниленко, В. М. Карпюк, І. А. Карпюк та ін.]. // Актуальні проблеми інженерної механіки : тези доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції / під заг. ред. М. Г. Сур'янінова. – Одеса : ОДАБА, 2020. – С. 81-84.

(Внесок здобувача: обробка та аналіз результатів досліджень деформативності експериментальних зразків з урахуванням зміни дослідних факторів).

20. Тріщиностійкість залізобетонних балок, посилені металевими обоймами / [Д. С. Даниленко, В. М. Карпюк, І. А. Карпюк та ін.]. // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини : тези доповідей міжн. наук.-техн. конф. 11-12 червня 2020 р.. – Одеса : ОДАБА, 2020. – С. 19-21.

(Внесок здобувача: обробка та аналіз результатів досліджень тріщиностійкості експериментальних зразків з урахуванням зміни факторів).

АНОТАЦІЯ

Даниленко Д.С. Несуча здатність пошкоджених силовими тріщинами балок, підсилених металевими обоймами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вивченню несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості непошкоджених звичайних, пошкоджених наскрізними нормальними і перехресними похилими тріщинами звичайних та підсилених запатентованими (спосіб і пристрій) попередньо напруженими металевими обоймами залізобетонних балок за дії ступенево зростаючого статичного і малоциклового знакозмінного навантаження високих рівнів. Експериментально встановлена фізична картина їх роботи та руйнування, нелінійне СЕ моделювання НДС системи “пошкоджена наскрізними силовими тріщинами залізобетонна балка – попередньо напружена металева обойма підсилення” дозволили розробити адекватну розрахункову модель несучої здатності їх приопорних ділянок що забезпечує достатню для практичних цілей точність її прогнозу.

Ключові слова: малоциклове знакозмінне навантаження, несуча здатність, тріщиностійкість, деформативність, пошкоджена залізобетонна балка, металева обойма, нелінійне СЕ моделювання, розрахункова схема і модель.

АННОТАЦИЯ

Даниленко Д.С. Несущая способность поврежденных силовыми трещинами балок, усиленных металлическими обоймами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Одесса, 2020.

Диссертационная работа посвящена изучению несущей способности, деформативности и трещиностойкости неповрежденных обычных, поврежденных сквозными нормальными и перекрестными наклонными трещинами обычных и усиленных запатентованными (способ и устройство) предварительно напряженными металлическими обоймами железобетонных балок при действии ступенчато возрастающей статической и малоциклового знакопеременной нагрузки высоких уровней. Экспериментально установленная физическая картина их работы и разрушения, нелинейное КЭ моделирование НДС системы "повреждённая сквозными силовыми трещинами железобетонная балка - предварительно напряженная металлическая обойма усиления" позволили разработать адекватную расчетную модель несущей способности их приопорных участков обеспечивающую достаточную для практических целей точность её прогноза.

Ключевые слова: малоцикловое знакопеременное нагружение, несущая способность, трещиностойкость, деформативность, повреждённая железобетонная балка, металлическая обойма, нелинейное КЭ моделирование, расчетная схема и модель.

ANNOTATION

Danilenko D.S. Bearing capacity of beams damaged by force cracks, reinforced with metal jackets. – Manuscript.

The thesis for obtaining a scientific degree of PhD (doctor of philosophy) by specialty 05.23.01 «Building constructions, buildings and structures». – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, 2020.

The dissertation work is devoted to the study of the bearing capacity, deformability and crack resistance of ordinary and reinforced concrete beams damaged by through normal and cross inclined cracks and reinforced by patented (method and device) prestressed metal clips under the action of a stepwise increasing static and low-cycle alternating load of high levels.

Experimentally proved the possibility and feasibility of using in practice the developed method of restoration and reinforcement of damaged through cracks of reinforced concrete beam structures due to their three-sided compression and device for its implementation, enshrined in the patent, under the action of increasing static, low-cycle alternating, seismic and other dynamic loads, including during hostilities. The use of a metal prestressed holder to reinforce damaged beams increases their load-bearing capacity by 1.5 and deflections before failure by 1.8 times, and reduces the maximum width of the inclination of inclined cracks by 1.2 times. The performed experimental and theoretical studies have established the complex influence of design factors and external factors on the main parameters of the performance of these elements, disclosed the physical pictures of their work and destruction. Comparative analysis of research data with the results of calculations according to existing national design standards and author's methods, nonlinear finite element modeling of the stress-strain state of the system "damaged by force cracks reinforced concrete beam - prestressed metal reinforcement cage" made it possible to develop an adequate design model of the bearing capacity of its supporting sections design schemes: on the action of the bending moment to ensure the bearing capacity behind a dangerous inclined crack in the damaged reinforced concrete beams with medium and large ($a/h_0=1.75-3.25$) spans of the cut without taking into account the operation of damaged concrete; on the action of transverse force to ensure the bearing capacity of damaged by cracks compressed concrete inclined strip between the concentrated force and support in beams with small ($a/h_0=0.75-1.25$) spans of a cut taking into account decrease in durability of the concrete damaged by cracks by factor $K=0.8$. In beams with intermediate values of the relative span of the section ($a/h_0=1.25-1.75$) it is recommended to alternately consider both calculation schemes and for further calculation to take the average value of the bearing capacity of their supporting sections. The application of the adopted model allows to achieve a satisfactory (coefficient of variation $v=7\%$) convergence between the experimental and calculated values of the bearing capacity of the damaged beams, reinforced by the specified holder.

Keywords: low-cycle alternating and static stepwise increasing load, bearing capacity, crack resistance, deformability, stress-strain state, near-bearing zone, reinforced concrete beam damaged by force cracks, metal prestressed frame, transverse inclined force cracks, experimental statistical dependence, nonlinear CE modeling, calculation and modeling.