

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

МАЛЬОВАНА ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 624.012.4:539.415

**МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ
ПРИ ЗРІЗІ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Полтава – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Довженко Оксана Олександрівна,
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бабич Євген Михайлович,
Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне) Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд;

кандидат технічних наук, доцент
Спіранде Каріна Віталіївна,
Харківський національний університет будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій.

Захист відбудеться «15» вересня 2020 р., о 11:30, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 44.052.02 при Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» за адресою: 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, ауд. 218.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» за адресою: 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24.

Автореферат розіслано «___» серпня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Т.А. Галінська

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для створення сучасних ефективних будівельних конструкцій та забезпечення надійної експлуатації існуючих будівель і споруд актуальним є застосування для їх виготовлення нових матеріалів та розроблення достатньо загальних теоретично обґрунтованих методів розрахунків.

Відбувається заміщення традиційних важких бетонів багатокомпонентними модифікованими, котрі характеризуються високою міцністю та корозійною стійкістю, водонепроникністю та морозостійкістю. Однак їх гомогенна структура обумовлює специфіку поведінки під навантаженням.

Експериментальні дослідження високоміцних бетонів в Україні довгий час не виходили за межі розгляду невеликих моделей. Для використання отриманих результатів при розрахунках реальних конструкцій та вузлів з'єднань необхідно провести поглиблене вивчення їх роботи за різних схем прикладання навантаження та геометрії елементів.

Дія ДБН В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» розповсюджується на традиційні бетони і тільки в його розвиток передбачається розроблення нормативного документу «Бетонні та залізобетонні конструкції із високоміцного бетону (клас бетону на стиск вище С 50/60)».

Бетонні та залізобетонні конструкції, що перебувають під дією зрізувальних сил, потребують особливої уваги, так як суттєво вирізняються конструктивним вирішенням та характером напружено-деформованого стану у площині зрізу.

Теорія розрахунку міцності за похилими перерізами згинальних елементів зазнала декілька загальновідомих етапів розвитку: «класична» теорія використовувала основи опору матеріалів і розглядала другу стадію напружено-деформованого стану, згідно котрої розрахунок проводився за головними напруженнями розтягу; фермова аналогія та дискова модель базувалися на стадії руйнування; період поглиблення уявлень про напружено-деформований стан елементів в області розташування похилих тріщин сприяв вдосконаленню розрахункових моделей. Чинна нормативна методика на основі фермової аналогії не може вважатися досконалою та потребує корегування.

В Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» для оцінювання бетонних і залізобетонних елементів при зминанні, зрізі та продавлюванні розроблено варіаційний метод у теорії пластичності бетону, котрий широко апробований при розрахунках міцності залізобетонних конструкцій із використанням важких і легких бетонів. Розповсюдження його на високоміцні бетони потребує додаткових досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами. Дисертація виконана в рамках науково-дослідницьких програм Національного університету імені Юрія Кондратюка «Розробка інженерних методів розрахунку міцності бетонних і залізобетонних елементів при складних і неоднорідних напружено-деформованих станах на основі непружних

дилатаційних моделей деформування бетону» (номер державної реєстрації 0193U009184) та «Дослідження і розроблення інженерних методів розрахунку опору руйнуванню й деформуванню бетонних і залізобетонних, кам'яних та армокам'яних елементів, що зазнають неоднорідний напружено-деформований стан при різному характері впливів і середовища» (номер державної реєстрації 0117U003248).

Мета та задачі досліджень. Метою дослідження є врахування специфіки роботи та вдосконалення розрахунку міцності бетонних і залізобетонних елементів із високоміцного бетону, котрі руйнуються шляхом зрізу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

- експериментально дослідити деформований стан бетону й арматури поблизу площини зрізу окремих елементів із високоміцного бетону: зразків Гвоздева як найбільш відомих із запропонованих для визначення опору бетону «чистому» зрізу; прямокутних залізобетонних шпонок; зрізаних бетонних клинів, які моделюють стиснуту зону бетону над небезпечною похилою тріщиною, а також залізобетонних балок на дію поперечних сил;

- встановити характер руйнування та вивчити рівень граничного навантаження дослідних зразків;

- перевірити можливість застосування варіаційного методу в теорії пластичності бетону для розрахунку міцності бетонних і залізобетонних елементів із високоміцного бетону при зрізі;

- визначити області реалізації випадків руйнування залізобетонних балок за похилою стиснутою смугою та небезпечною похилою тріщиною;

- надати пропозиції щодо вдосконалення методики розрахунку згинальних елементів на дію поперечної сили.

Об'єкт дослідження – зріз бетонних і залізобетонних елементів із високоміцного бетону.

Предмет дослідження – міцність зразків Гвоздева, прямокутних залізобетонних шпонок, зрізаних бетонних клинів та залізобетонних балок за похилим перерізом.

Методи дослідження: аналітичний огляд літератури, варіаційний метод у теорії пластичності бетону з використанням принципу віртуальних швидкостей, експериментальні дослідження, порівняльний аналіз отриманих теоретичних і експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- отримані нові експериментальні дані про деформований стан, характер руйнування та граничне навантаження елементів із високоміцного бетону, які руйнуються шляхом зрізу: зразків Гвоздева, прямокутних залізобетонних шпонок та зрізаних бетонних клинів;

- отримані нові експериментальні дані про деформований стан, характер руйнування за похилим перерізом та граничне навантаження балок із високоміцного бетону;

- знайшла подальший розвиток методика розрахунку елементів при зрізі варіаційним методом у напрямку розширення області її застосування для розрахунків елементів із високоміцного бетону;

- встановлена межа реалізації методів розрахунку міцності за фермовою аналогією та дисковою моделлю;

- вдосконалено нормативний метод розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів за похилими перерізами на дію поперечних сил.

Практичне значення одержаних результатів:

- отримані результати створюють можливість ефективного використання високоміцних бетонів при проектуванні залізобетонних елементів і вузлів їх з'єднання, що працюють на сприйняття зрізувальних сил;

- запропоновано конструктивне рішення шпонкового з'єднання підвищеної міцності та пластичності;

- надані практичні рекомендації із розмежування методів розрахунку згинальних елементів у похилих перерізах, що дозволяє обґрунтовано оцінити їх міцність.

Результати дослідження впроваджені: при оцінюванні міцності згинальних залізобетонних елементів за похилими перерізами й уточненні категорії технічного стану конструкцій:

- при капітальному ремонті приміщень приймально-діагностичного та рентгено-логічного відділень 1-го поверху хірургічного корпусу КП «ПОКЛ ім. В.М. Скліфосовського Полтавської обласної ради», м. Полтава;

- реконструкції сільського будинку культури у с. Гоголево, Шишацького району, Полтавської області під Гоголівський культурний центр;

- будівництві цеху з виробництва комбікормів та преміксів на території діючого підприємства ТОВ «ДЕЛЬТА», с. Селещина, Машівського району, Полтавської області,

а також при оцінюванні міцності й уточненні категорії технічного стану опорних вузлів тришарнірних залізобетонних рам на виробничій базі ТОВ Лінден М.В., м. Мала Виска, Маловисківський район, Кіровоградська область.

Особистий внесок здобувача. Представлені в дисертаційній роботі результати досліджень отримані автором самостійно. Особистий внесок полягає у:

- аналітичному огляді літератури за темою дисертації [1 – 10, 15];

- плануванні та проведенні експериментальних досліджень міцності при зрізі зразків Гвоздєва, прямокутних шпонок, зрізаних бетонних клинів та балок із високоміцного бетону [1 – 4, 7, 15];

- отриманні експериментальних даних щодо впливу підвищення міцності бетону на деформації бетону, характер руйнування та величину граничного навантаження зазначених елементів та балок [2 – 4, 6, 7, 9, 15];

- розрахунку міцності зазначених елементів і розв'язанні задачі міцності похилої стиснутої пластини, завантаженої на торцях нормальною і дотичною складовими поперечної сили із високоміцного бетону варіаційним методом у теорії пластичності бетону [2 – 4, 6, 7, 9, 10];

- аналізі збіжності теоретичної міцності з дослідною [2 – 4, 6, 7, 9, 10];

- розширенні на високоміцні бетони області застосування варіаційного методу у теорії пластичності бетону для розрахунків міцності при зрізі [2, 3, 6, 7, 9];

– наданні пропозицій щодо вдосконалення розрахунку міцності згинальних елементів за похилими перерізами [8, 10].

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на XII Міжнародній науково-практичній конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи», (Полтава, 2019), 8-мій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2019), III Міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (Одеса, 2019), I Міжнародній азербайджансько-українській конференції «Building innovations – 2018» (Баку, 2018), International Scientific Practical Conference (Scranton, USA, 2016), VIII Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції (Полтава, 2010), 61-й – 64-й, 67, 71-й наукових конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (Полтава, 2009 – 2012 рр., 2015 р., 2019 р).

Достовірність результатів дослідження підтверджується результатами порівняння теоретичних значень міцності на зріз з експериментальними даними.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 16-ти наукових працях, серед них: 8 публікацій у наукових фахових виданнях України (3 із них у виданнях, які індексуються в наукометричній базі Scopus), 3 – у наукових періодичних виданнях іноземних держав (2 з них у виданнях, які індексуються в наукометричній базі Scopus, 1 – у наукометричній базі Copernicus).

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Її зміст викладено на 160 сторінках, з яких 111 сторінок основного тексту, 16 сторінок списку використаних літературних джерел із 158 найменувань. Основна частина дисертації містить 82 рисунки, 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета та задачі досліджень, висвітлені наукова новизна одержаних результатів, їх практична цінність і рівень апробації.

У **першому розділі** дисертації представлений детальний огляд та аналіз існуючих досліджень щодо характеристик, переваг та недоліків високоміцного бетону в сучасному будівництві.

Дані про основні характеристики високоміцних бетонів, виготовлених за традиційною технологією з використанням високомарочних цементів і ретельним підбором складових, подані у роботах Берга О.Я., Дворкіна Л.Й., Десова О.Є., Ситника В.І. та ін., на основі модифікаторів розглянуті Бабичем Є.М., Батраковим В.Г., Капрієловим С.С., Корсуном А.В. та ін.

В Україні дослідженням конструкцій із високоміцного бетону займалися Ахмеднабієв Р.М., Бабич Є.М., Бамбура А.М., Батраков В.Г., Демченко О.В.,

Єрмоленко Д.А., Капрієлов С.С., Лазарева О.М., Митрофанов П.Б., Шкурूपій О.А. та ін. Розгляд несучої здатності балок із такого бетону у похилому перерізі здебільшого здійснювався за кордоном, зокрема Mphonde A.G., Johnson M.K., Ramirez M.P., Elzanaty A.H. та ін.

Проаналізовані запропоновані залежності для визначення несучої здатності балок у похилому перерізі.

Для розрахунку міцності елементів при зрізі у Національному університеті імені Юрія Кондратюка розроблений варіаційний метод у теорії пластичності бетону.

При цьому умова міцності Баландіна – Генієва, котра розглядається як пластичний потенціал записується у вигляді:

$$F(\sigma_{ij}) = T^2 + m\sigma - T_{sh}^2 = 0, \quad (1)$$

де $m = f_{c,prizm} - f_{ct}$, $T_{sh}^2 = \frac{f_c f_{ct}}{3}$; T – інтенсивність дотичних напружень:

$$T^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1); \sigma - \text{середнє напруження: } \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

Використовується асоційований закон текучості, котрий зв'язує швидкості незворотних деформацій ε_{ij} з напруженнями σ_{ij} :

$$\xi_{ij} = \lambda \partial F / \partial \sigma_{ij}, \quad (2)$$

де $\lambda = \xi / m$.

Швидкість об'ємної деформації ξ не дорівнює нулю внаслідок дилатації бетону, що враховується моделлю.

Використана концепція жорстко-пластичного тіла.

Методика передбачає розв'язання задач у розривних функціях швидкостей. Бетон у граничному стані розглядається як ідеально пластичний матеріал.

Функціонал методу в розривних функціях швидкостей для плоских напружених станів має вигляд:

$$I_l = \int_{S_l} m \left[2B \left(1 + 0,25 \left(\frac{\Delta V_t}{\Delta V_n} \right)^2 \right)^{0,5} - 1 \right] \Delta V_n dS, \quad (3)$$

де $B^2 = (1 + \chi / (1 - \chi)^2) / 3$, $\chi = f_{c,prizm} / f_{ct}$, S_l – поверхня руйнування, ΔV_t , ΔV_n – розриви дотичної та нормальної до S_l складових швидкості.

Запропонований варіаційний метод розв'язання задач за допомогою розривних функцій являє собою розвиток кінематичного методу теорії граничної рівноваги для масивних бетонних конструкцій.

У **другому розділі** роботи представлено план експериментальних досліджень, детальний опис методики проведення випробувань.

Для експериментального вивчення високоміцного бетону при зрізі за різних схем прикладання навантаження та форми елементів використані зразки

Гвоздева як найбільш відомі для визначення опору бетону «чистому зрізу», залізобетонні прямокутні шпонки, зрізані бетонні клини, котрі моделюють стиснуту зону бетону над небезпечною похилою тріщиною, та балки – загальною кількістю 28 штук. Усі вони суттєво відрізнялися конструктивним рішенням, способом передачі навантаження, напружено-деформованим станом у площині зрізу. Проведені експерименти є частиною комплексних досліджень опору бетону й залізобетону зрізу, котрі проводяться на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій та опору матеріалів Національного університету імені Юрія Кондратюка.

Форма та розміри зразків Гвоздева наведені на рис. 1, а. Навантаження на них прикладалося безпосередньо у площині зрізу (рис. 1, б).

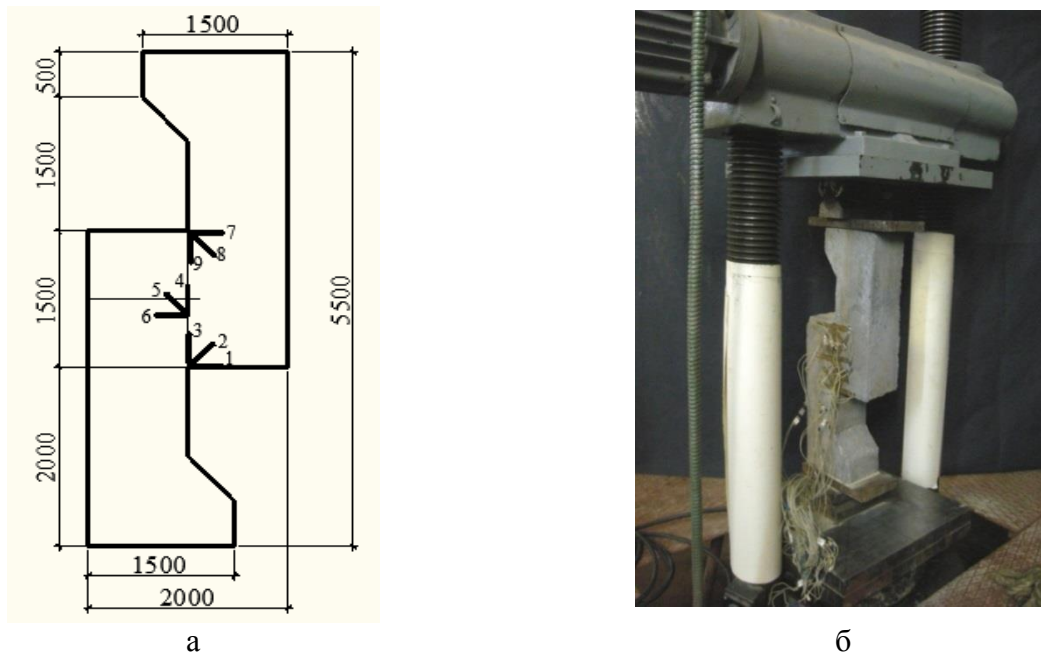


Рисунок 1 – Геометричні розміри та схеми розташування тензорезисторів для зразків Гвоздева (а); зразок у пресі ПГ-125 під час випробування (б)

Залізобетонні шпонки виготовлялися із бетону з застосуванням цементу марки 700. Співвідношення ширини площадки навантаження до висоти шпонки становило $l_k/h_k = 0,25$, що забезпечувало їх максимальну міцність (рис. 2).

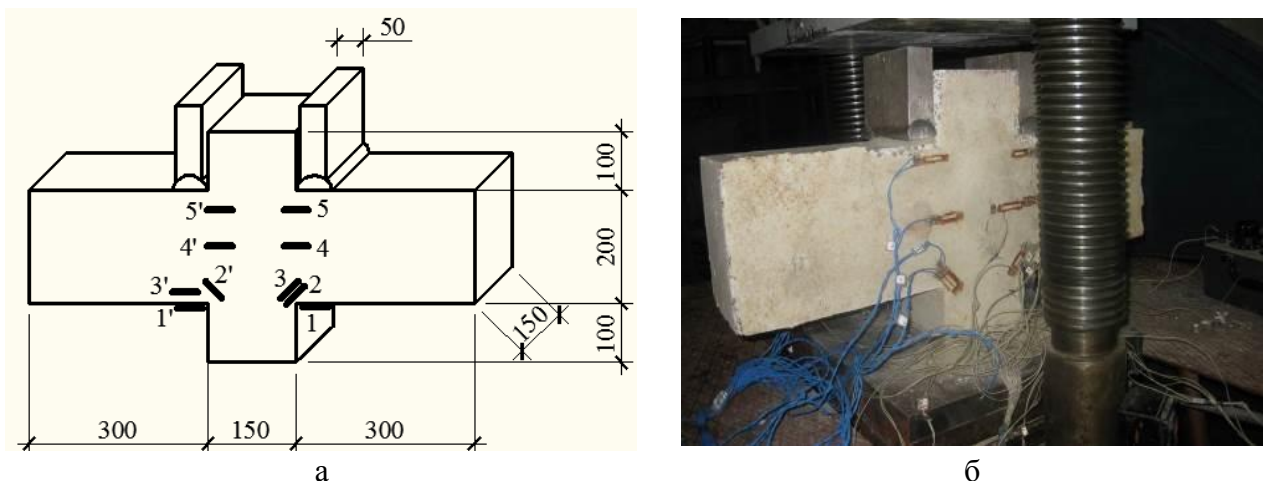
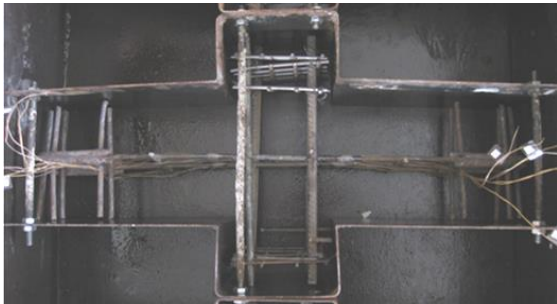


Рисунок 2 – Геометричні розміри зразків-шпонок та схема розташування

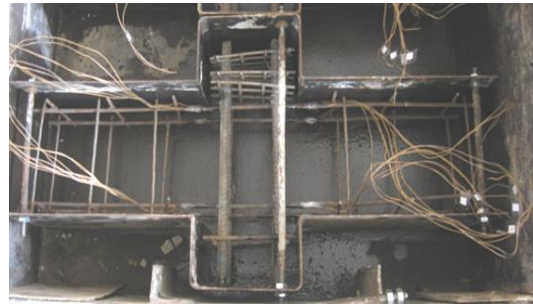
тензорезисторів на бетоні (а); зразок у пресі ПГ-125 під час випробування (б)

Деформації бетону шпонок, як і зразків Гвоздева, вимірювалися за допомогою тензорезисторів, котрі установлені в зоні зрізу (рис. 1 і 2).

Для оцінювання впливу розташування арматури за висотою шпонки використовувалися два варіанти арматурних каркасів: з розміщенням 2-ох стержнів по середині та 4-ох стержнів, рознесених по 2 у верхню та нижню частину (по два зразка-близнюка) (рис. 3). При цьому відсоток армування практично не змінювався. Для забезпечення анкерування арматури крайні (консольні) частини зразків були розвинуті.



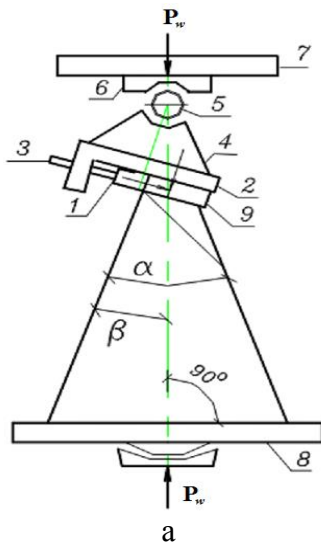
а



б

Рисунок 3 – Арматурні каркаси зразків-шпонок: а – із розташуванням арматури по середині площини зрізу; б – із рознесенням арматури у два рівня

Із одного замісу із зразками Гвоздева виготовлено і випробувано (рис. 4) дві серії зрізаних бетонних клинів. Для них кут клину становив $\alpha = 15, 30, 45^\circ$, а кут прикладання навантаження β варіювався від 0° до 20° (при цьому V_w була направлена як до прямого кута клину, так і від нього). Для запобігання руйнуванню нижньої частини зразків вона армувалася.



а



б

Рисунок 4 – Випробування зрізаних бетонних клинів: а – схема випробування; б – зразок КЛ-ПМ-30-5 у пресі ПГ-125; 1, 2 – вантажні пластини; 3 – гвинти; 4 – корпус випробувального пристрою; 5 – шарнір; 6 – опорна пластина; 7, 8 – плити пресу; 9 – пластина

Всі описані зразки випробовувалися на гідравлічному пресі ПГ-125 лабораторії кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору

матеріалів. Для вимірювання деформацій бетону й арматури використовувалися тензорезистори типу ПКБ відповідно базою 20 – 50 мм і 5 мм.

Крім зазначених вище елементів, проводилися дослідження балок на дію поперечної сили у похилому перерізі. Перша серія складалася з 2-ох зразків, для яких використовувався бетон двох видів (з додаванням поліпропіленової фібри та без її додавання), який виготовлявся в лабораторних умовах. Друга серія складалася з 9-ти зразків. Виготовлення балок здійснювалося на заводі «Полтавтрансбуд» з використанням бетонозмішувача примусової дії та віброплощадки.

Балки довжиною 1500 мм мали прямокутний поперечний переріз з розмірами $b \times h = 120 \times 180$ мм. Перша серія армувалася просторовими каркасами з поздовжньою арматурою 4Ø16 A400С, поперечною арматурою 2Ø6 B500 з кроком 200 мм; у балках другої серії в якості поздовжньої арматури використовувалися стержні 2Ø20 A400С (рис. 5).

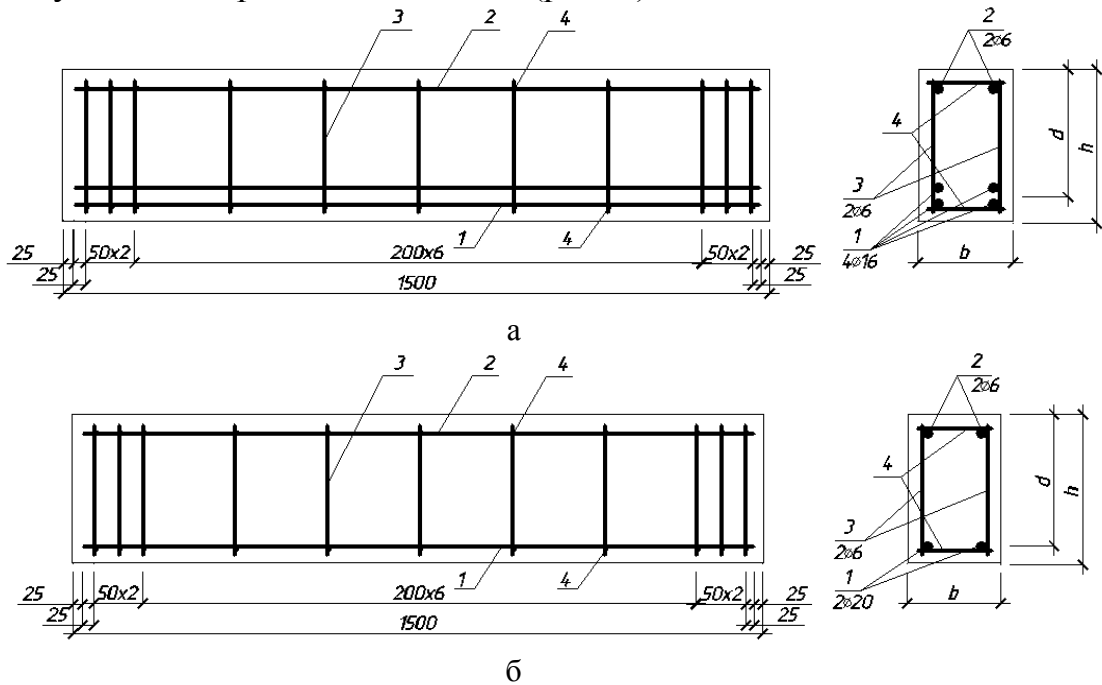


Рисунок 5 – Геометричні розміри й армування дослідних балок:
 а – першої серії; б – другої серії; 1 – поздовжня робоча арматура;
 2 – конструктивна арматура; 3 – поперечна арматура; 4 – з'єднувальні
 стержні

Випробування дослідних зразків відбувалося за схемою «чистого згину» при відносному прольоті зрізу $a/d = 2,3$ (рис. 6).

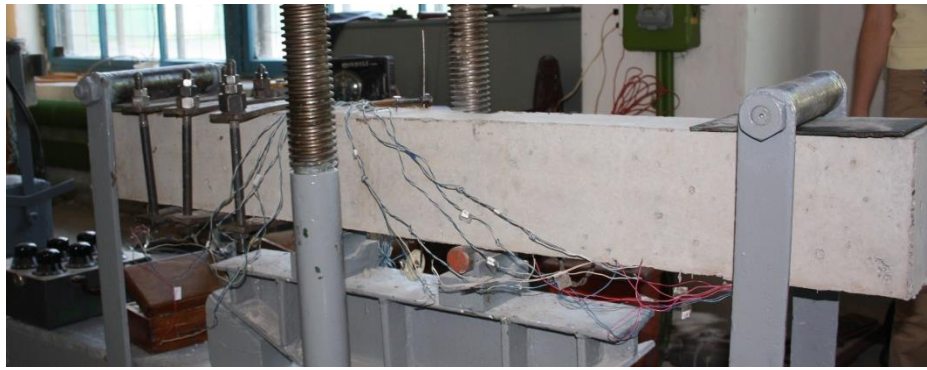


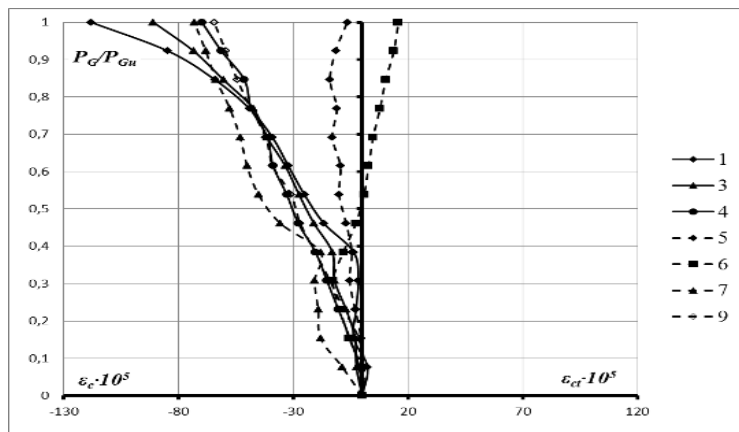
Рисунок 6 – Балка 1Б – ПМ – 1 у випробувальній установці

Третій розділ дисертації присвячений аналізу отриманих експериментальних даних.

Дослідні зразки Гвоздева руйнувалися зовні крихко за поверхнею, котра майже співпадала з площиною зрізу (рис. 7, а). Утворення тріщин на всіх етапах навантаження не спостерігалось. Біля вхідних кутів наявні зони двохвісного стиснення з максимальними значеннями відносних деформацій $\approx 140 \cdot 10^5$. В центральній за висотою частині зразка наявний напружений стан «розтяг-стиск» (рис. 7, б).



а



б

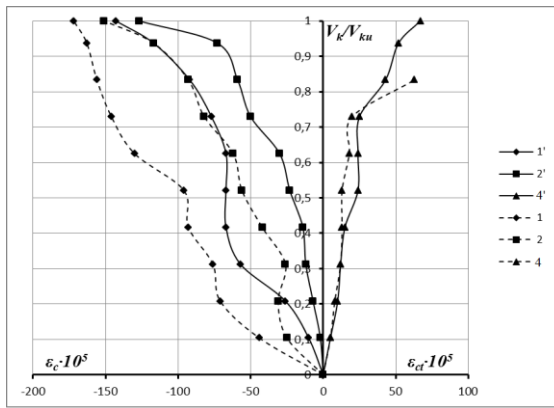
Рисунок 7 – Результати експериментальних досліджень зразків Гвоздева:
а – характер руйнування; б – графік залежності « $P_G/P_{Gu} - \varepsilon_c (\varepsilon_{ct})$ »

Дослідні зразки-шпонки зруйнувалися за перерізом, розташованим поблизу площини зрізу (рис. 8, а, 9, а). Руйнування супроводжувалося зміщенням їх бокових частин відносно центральної.

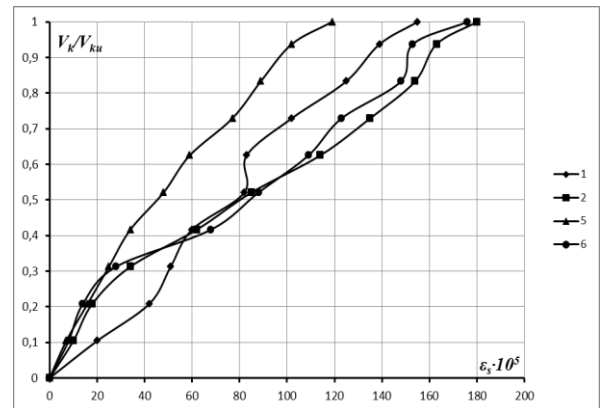


а





б

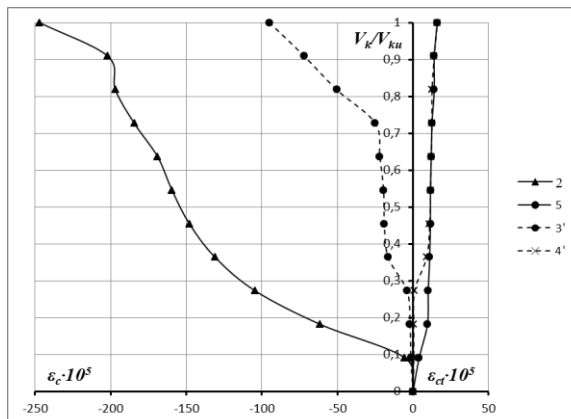


в

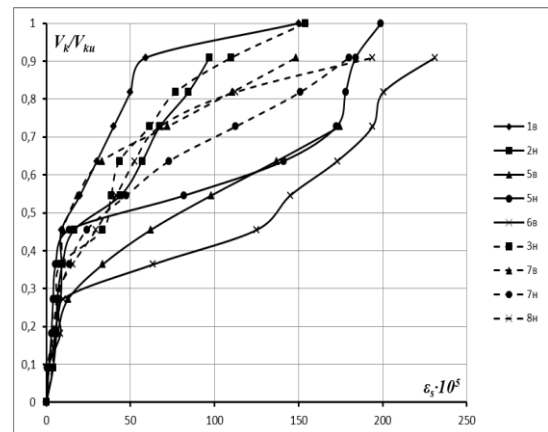
Рисунок 8 – Результати експериментальних досліджень шпонок із одноярусним розташуванням арматури: характер руйнування зразка ША-0,25-П-ПМ-0,357-1а (а); графіки залежностей « $V_k/V_{ku} - \varepsilon_c (\varepsilon_{ct})$ » (б) і « $V_k/V_{ku} - \varepsilon_s$ » (в)



а



б



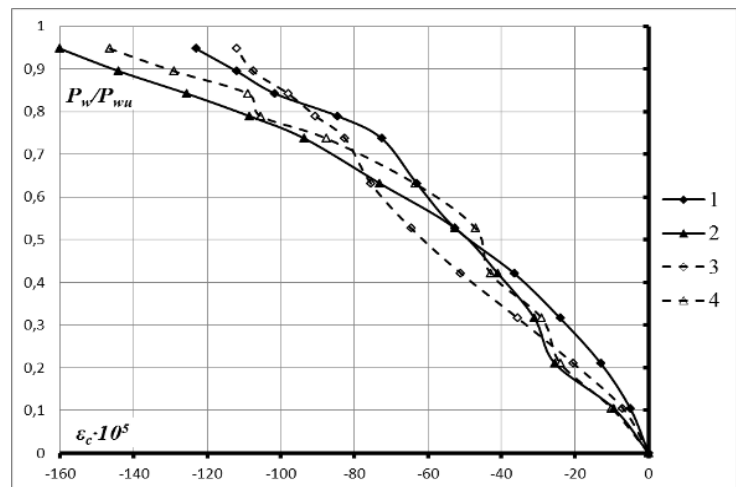
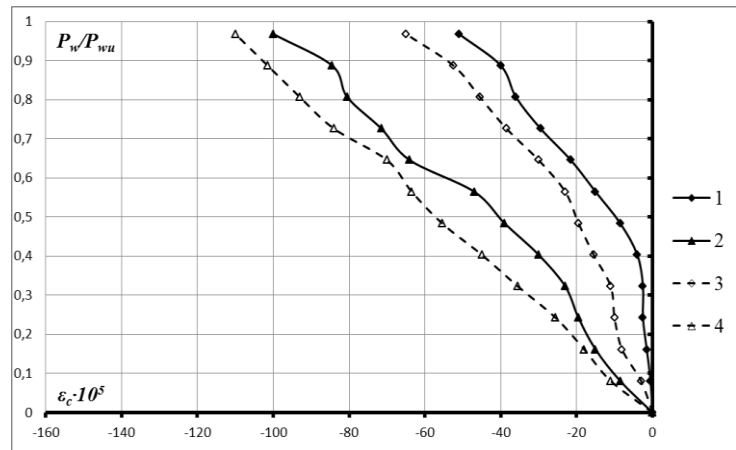
в

Рисунок 9 – Результати експериментальних досліджень шпонок з двоярусним розташуванням арматури: характер руйнування зразка ША-0,25-П-ПМ-0,386-2а (а); графіки залежностей « $V_k/V_{ku} - \varepsilon_c (\varepsilon_{ct})$ » (б) і « $V_k/V_{ku} - \varepsilon_s$ » (в)

Значення деформації арматури в момент руйнування у місці перетину площини зрізу відповідали рівню деформації на ділянці текучості. У зразках з чотирма арматурними стержнями, в стержнях, розміщених у верхній частині каркасу, спостерігаються деформації більші, ніж у стержнях, які розміщені в нижній частині каркасу. У зразках, які армовані двома стержнями поперечної арматури, деформації при руйнуванні були на 20 – 40% меншими, ніж у аналогічних зразках, які армовані чотирма стержнями. Дворівневе розташування арматури за висотою елементів сприяло підвищенню пластичних властивостей бетону в середньому на 30% (рис. 8, б і рис. 9, б).

Під час проведення експерименту спостерігалось два випадки руйнування зрізаних бетонних клинів, котре мало зовні крихкий характер без попереднього тріщиноутворення. У першому випадку руйнування (рис. 9) шар локалізації пластичних деформацій розповсюджувався майже в одній площині, що перетинала вершину тупого кута і виходила на бічну грань зразка, яка утворює з вантажною поверхнею кут 90° . У другому випадку (рис. 10) площина руйнування проходила через вершину прямого кута і розсікала протилежну грань зразка на певній відстані від вершини.

Аналіз розподілу деформацій бетону поблизу вершини клинів вказує на те, що зі зміною напрямку поперечної сили V_c , значень кутів клину α і навантаження $\beta = V_c/N_c$ (N_c – поздовжня сила) характер деформування і міцність зразків суттєво змінюється. Так, коли навантаження прикладається під від'ємним кутом β (V_c направлена до прямого кута), міцність зразка при зростанні кута β зменшується. Це підтверджується зниженням руйнівного навантаження клинів від 380 кН (клин КЛ1-ПМ-30-0) до 248 кН (клин КЛ1-ПМ-30-20*). Для від'ємних та малих додатних значень β міцність клинів не залежить від кута α . Така закономірність відповідає першому випадку руйнування (клини КЛ1-ПМ-30-10* і КЛ1-ПМ-15-10*, табл. 2).



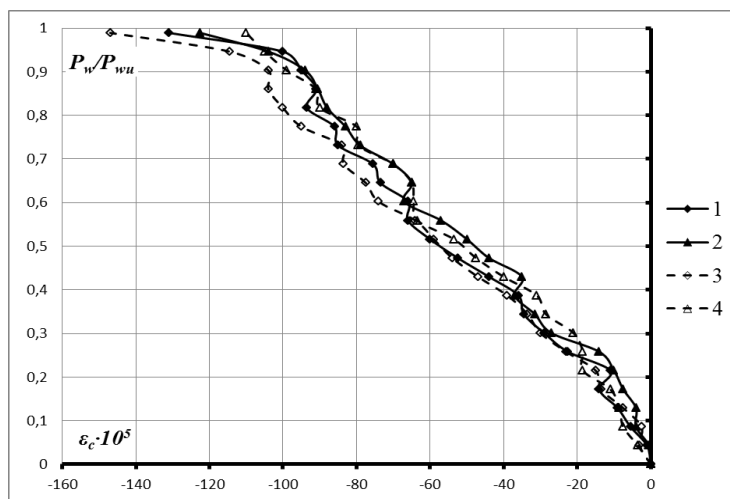
а

б

Рисунок 9 – Характер руйнування (І випадок) зрізаних бетонних клинів КЛ1-30-20* та КЛ1-ПМ-30-0 (а) і графіки залежності « $P_w/P_{wu} - \varepsilon_c (\varepsilon_{ct})$ » (б)



а



б

Рисунок 10 – Характер руйнування (II випадок) зрізаного бетонного клину КЛ1-ПМ-30-20 (а) і графік залежності « $P_w/P_{wu} - \varepsilon_c (\varepsilon_{ct})$ » (б)

В межах проведених дослідів для бетонних клинів із кутом $\alpha = 15^\circ$ другий випадок руйнування реалізується при $\beta > 7^\circ$, а для зразків з $\alpha = 30$ та 45° – при $\beta > 12^\circ$ і $\beta > 16^\circ$ відповідно. При одному й тому ж α і зростанні β міцність моделей зменшується.

У табл. 1 і 2 наведені результати експериментальних досліджень зразків.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень елементів зразків Гвоздєва та шпонок

№	Шифр	$f_{cm,prizm}$, МПа	f_{ctm} , МПа	$P_{G(k)}^{test}$, кН	ρ_w , %	f_{ym} , МПа	A_{sh} , мм ²	$P_{G(k)}^{calc} / P_{G(k)}^{test}$
Зразки Гвоздева								
1	Г-ПМ-1	52,9	3,2	136,9	-	-	15750	0,933
2	Г-ПМ-2			132,6	-	-	15300	0,933
3	Г-ПМ-3			147,4	-	-	15750	0,864
4	Г-ПМ-4			136,9	-	-	15450	0,916
Залізобетонні шпонки								
5	ША-0,25-П-ПМ-0,357-1-а	56,9	2,65	480	0,357	260	2×28275	0,872
6	ША-0,25-П-ПМ-0,337-1-б			600	0,337		2×30000	0,910
7	ША-0,25-П-ПМ-0,386-2-а			550	0,386	280	2×29250	0,970
8	ША-0,25-П-ПМ-0,377-2-б			590	0,377		2×30000	0,926
9	ШБ-0,25-П-ПМ			250	-	-	2×32000	0,976

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень клинів

№	Шифр	$f_{cm,prizm}$, МПа	f_{ctm} , МПа	P_w^{test} , кН	N_w^{test} , кН	V_w^{test} , кН	A_c^{**} , мм ²	P_w^{calc} / P_w^{test}
10	КЛ1-ПМ-30-20*	52,9	3,2	248	233,04	84,82	7350	1,044
11	КЛ1-ПМ-30-10*			310	305,29	53,83	7475	1,023
12	КЛ1-ПМ-30-0			380	380	0	7474,5	1,045
13	КЛ1-ПМ-30-5			500	498,1	43,58	7599	0,895
14	КЛ1-ПМ-30-20			465	436,96	159,04	7525	0,946
15	КЛ2-ПМ-15-10*	48,2	4,2	320	315,14	55,57	7425	0,906
16	КЛ2-ПМ-45-20			650	459,62	459,62	7550	0,754
17	КЛ2-ПМ-45-30			524	370,52	370,52	7525	0,708

* для даного зразка при випробуванні дотична сила V_w направлена до прямого кута;

** A_c – площа зрізаної грані клину, через яку передається навантаження

Порівняно із елементами низької та середньої міцності бетону розміри стиснутих зон зразків зменшувалися, а розтягнутих збільшувалися. При цьому для зразків Гвоздева та шпонок поверхня руйнування наближалася до площини зрізу, а для бетонних клинів до напрямку дії стискувальної сили.

Результати проведених експериментів підтверджують існування у зразках, які вивчалися, локалізованих областей пластичності, в яких було зафіксовано розвиток значних пластичних деформацій (до $2,4 \cdot 10^{-3}$) не зважаючи на зовні крихкий характер руйнування.

Експериментально була підтверджена залежність міцності елементів від обох характеристик бетону f_c і f_{ct} .

Характер руйнування досліджуваних балок принципово не відрізнявся від руйнування згинальних елементів за похилим перерізом із бетонів середньої міцності. Руйнування відбувалося над небезпечною похилою тріщиною шляхом зрізу стиснутої зони (рис. 11), яку моделювали бетонні клини (рис. 10), при цьому мало місце переміщення окремих блоків уздовж поверхні руйнування, котре реалізується лише за наявності на ній непружних деформацій. Граничні прогини балок у середньому склали 10 – 13 мм.

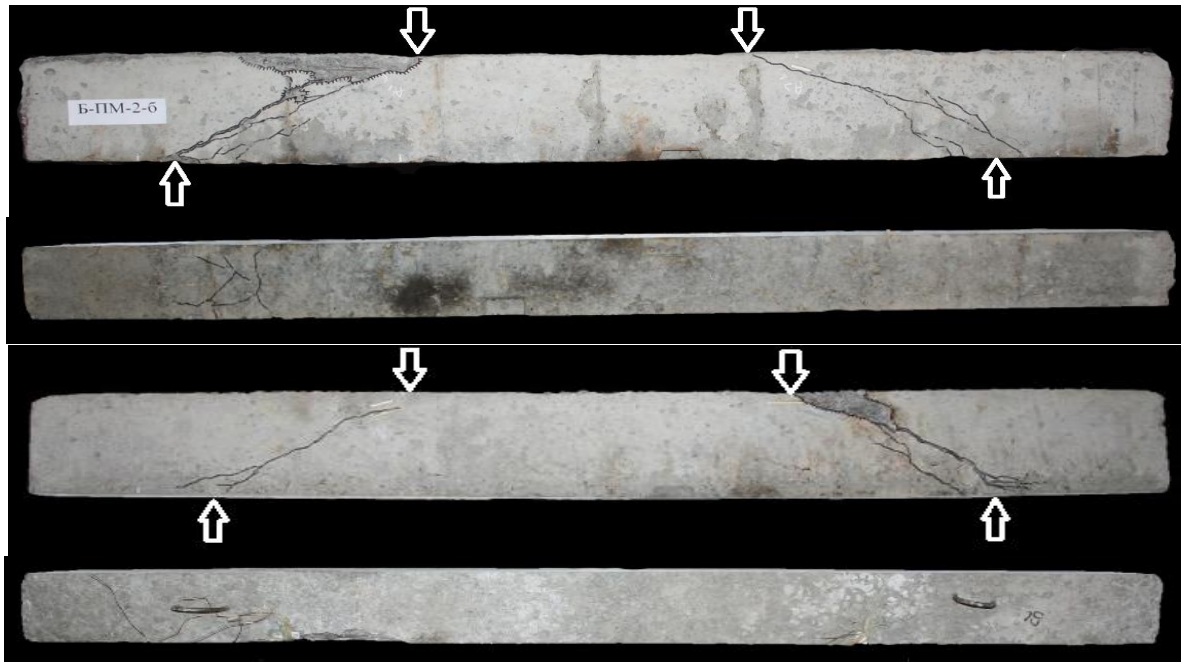


Рисунок 11 – Характер руйнування балки Б-ПМ-2-б

В **четвертому розділі** дисертаційної роботи розширена область застосування варіаційного методу у теорії пластичності бетону на високоміцні бетони, зокрема використані розв'язки задач міцності елементів, які руйнуються шляхом зрізу: зразків Гвоздева, залізобетонних прямокутних шпонок, зрізаних бетонних клинів.

При розв'язку задач міцності, кінематично можливі схеми відображають специфіку руйнування елементів. Поверхня руйнування складається з різної кількості ділянок. Наприклад, зрізані бетонні клини, що моделюють стиснуту зону бетону над небезпечною похилою тріщиною, і похила стиснута смуга, руйнуються по одній площині, шпонки – по двом, а зразки Гвоздева – по трьом.

Порівняння результатів розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону, отриманих на основі варіаційного методу в теорії пластичності, та експериментальних даних вказує на їх задовільну збіжність: середнє арифметичне відношення теоретичної міцності до дослідної $\bar{X} = 0,927$ та коефіцієнт варіації $\nu = 9,5\%$.

За чинними нормами в основу розрахунку згинальних елементів на дію поперечної сили покладена фермова аналогія. Між тим, у численних експериментальних дослідженнях спостерігається як руйнування стиснутої похилої смуги – елемента фермової аналогії, так і зріз бетону стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною. Для реалізації того чи іншого випадку руйнування вирішальне значення має інтенсивність поперечного армування.

Отримано рішення задачі міцності похилої стиснутої пластини, завантаженої на торцях нормальною і дотичною складовими поперечної сили.

На міцність стиснутої похилої смуги, як умовного елемента фермової аналогії, впливає вертикальна або відігнута арматура, котра її перетинає та підвищує міцність тим більше, чим більше довжина проекції смуги на поздовжню вісь елемента та менше кут нахилу до горизонталі θ . Бетонна смуга

руйнується від зрізу за поверхнею локалізації пластичної деформації під кутом γ до бокових граней. Вплив армування враховується шляхом прикладання зусиль q_w в арматурі на одиниці довжини її бокових граней (рис. 12).

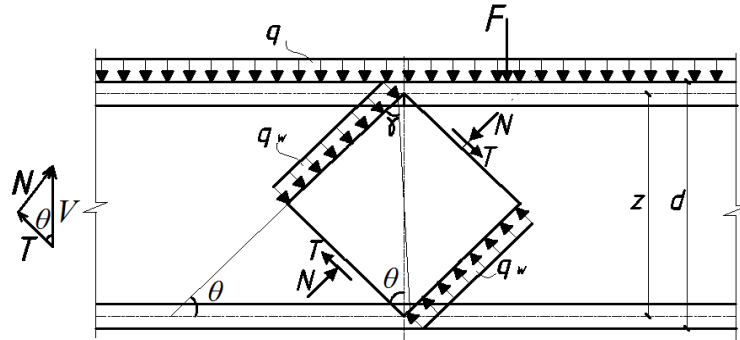


Рисунок 12 – Розрахункова схема похилої смуги

Розв'язується задача міцності обтиснутої з боків бетонної пластинки (рис. 13) одиничної товщини, на торцях якої діють нормальна стискувальна σ_i та дотична τ складові навантаження. При цьому обтиснення σ_j моделює вплив поперечного армування і дорівнює q_w . За допомогою варіаційного рівняння $\delta J = 0$ функціонал J досліджується на фактичний стан.

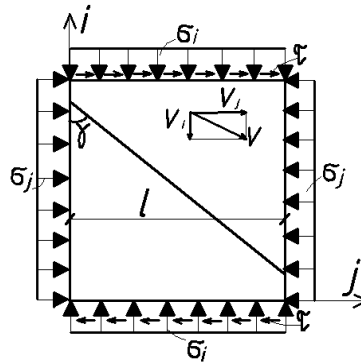


Рисунок 13 – Кінематично можлива схема руйнування пластинки

Для даної задачі, виражаючи параметри m і B через $f_{c,prizm}$ та f_{ct} і стрибки швидкостей ΔV_t і ΔV_n через параметри k та $tg\gamma$, при заданому τ/σ_i залежність для визначення значень граничних напружень стиску σ_i в пластинці записується так

$$\sigma_i = \frac{t\sqrt{4(k - tg\gamma)^2 + (1 + ktg\gamma)^2} - (1 - \chi)(k - tg\gamma) + k\sigma_j}{tg\gamma(1 + k\tau/\sigma_i)}, \quad (4)$$

де $t = \sqrt{(f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2)/3}$; $k = V_i/V_j$ – відношення швидкостей вздовж осей i та j ; γ – кут нахилу поверхні руйнування до осі i .

Напруження стиску σ_i встановлюється за умови мінімуму потужності пластичної деформації, варіюючи напрямок руху k одного жорсткого диска відносно іншого та кут нахилу γ поверхні руйнування, що розділяє диски.

При переході до розрахункової схеми на рис. 12 стискувальна сила дорівнює $N = \sigma_i b l$ (b – ширина поперечного перерізу, l – довжина стиснутої похилої смуги). Геометричні характеристики похилої стиснутої смуги θ і l

приймаються так: $1 \leq \operatorname{ctg} \theta = T / N \leq 2,5$; $l = z \cos \theta$, тут T – дотична складова сили V , $z = 0,9d$, d – робоча висота перерізу.

Враховуючи те, що $V = N / \sin \theta$, маємо

$$V = \sigma_i \operatorname{ctg} \theta b z. \quad (5)$$

Міцність бетонної пластинки знижується із зменшенням кута нахилу θ , що є наслідком дії дотичної складової T поперечної сили. Це зниження компенсується впливом поперечного армування. Для визначення поперечного зусилля, котре сприймається умовним стиснутим похилим елементом на усьому інтервалі кутів нахилу θ пропонується формула

$$V_{Rd, \max} = 0,3 f_{cd} b_w z. \quad (6)$$

Результати порівняння теоретичної міцності балок за похилим перерізом, підрахованої за чинними нормами (V_1^{calc}) та дисковою моделлю (V_2^{calc}), з експериментальною представлені на рис. 14.

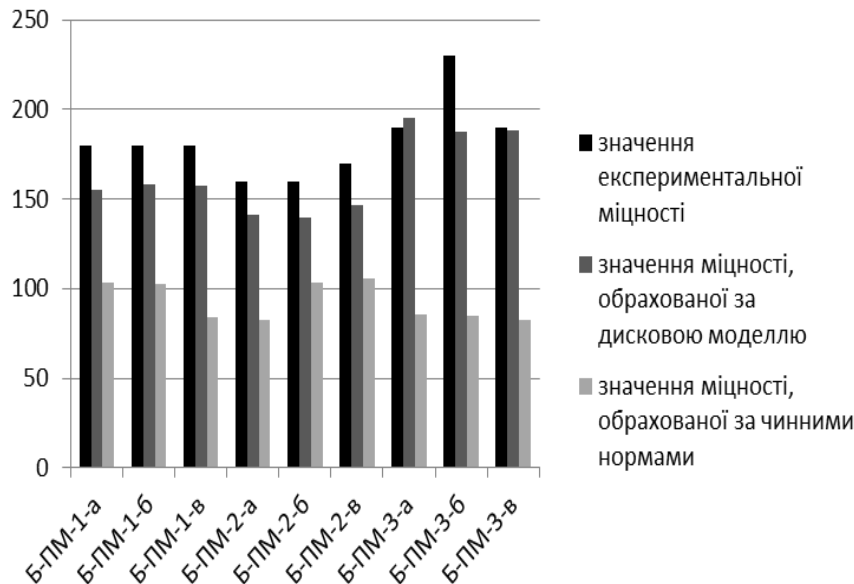


Рисунок 14 – Порівняння теоретичної міцності балок з дослідною

Згідно з ДБН В.2.6-98-2009 величина зусилля $V_{Rd,1}$ у похилому перерізі елемента приймається меншою із значень зусиль, котрі сприймаються бетоном умовного стиснутого похилого елемента $V_{Rd, \max}$ та поперечною арматурою $V_{Rd,s}$. Для порівняльного аналізу залежності дискової моделі використовується рівняння, котре має такий вигляд

$$V_{Rd,2} = V_c + V_{sw}, \quad (7)$$

тут $V_{Rd,2}$, V_c , V_{sw} – відповідно поперечне зусилля, котре сприймається елементом у похилому перерізі, окремо бетоном та поперечною арматурою.

Коефіцієнт поперечного армування, котрий відповідає межі застосування методів розрахунку за фермовою аналогією та дисковою моделлю ρ_w визначається із рівняння

$$V_{Rd,1} = V_{Rd,2}. \quad (9)$$

Величина граничного навантаження при зрізі стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною суттєво залежить від інтенсивності

поперечного армування та відносного прольоту зрізу.

Встановлені значення граничного коефіцієнта ρ_w на межі випадків руйнування за похилою тріщиною (дискова модель) і похилою стиснутою смугою (елемента фермової аналогії) залежно від класу бетону та кута нахилу умовного стиснутого елемента θ .

Для вибору методу розрахунку залізобетонного елемента за похилими перерізами на дію поперечної сили при розв'язанні задачі з перевірки міцності (при заданих класах бетону й арматури, розмірах поперечного перерізу, проценті армування, ρ_w і куті нахилу θ) встановлюється граничне значення коефіцієнта поперечного армування

$$\rho_{wR} = \frac{(1 - 2,5\chi)}{75\chi} \frac{f_{cd}}{f_{ywd}} \cot^{\alpha} \theta, \quad (10)$$

де $\alpha = \chi(1 + 75\chi)$.

За умови $\rho_w < \rho_{wR}$ зусилля V_{Rd} дорівнює сумі зусиль у бетоні стиснутої зони V_c та в поперечній арматурі V_{sw} , котрі підраховуються за формулами дискової моделі та визначають міцність елемента за похилою тріщиною на дію поперечної сили V_{Ed} .

При $\rho_w \geq \rho_{wR}$ – зусилля V_{Rd} дорівнює $V_{Rd,max}$, котре підраховується за формулою фермової аналогії і визначає міцність похилого елемента (за умови $V_{Ed} > V_{Rd,max}$ руйнування елемента відбувається від зрізу в межах похилої смуги).

Встановлені значення граничного коефіцієнта поперечного армування ρ_w на межі випадків руйнування за похилою тріщиною (дискова модель) і похилою стиснутою смугою (елемента фермової аналогії) залежно від класу бетону та кута нахилу умовного стиснутого елемента θ . Так для бетону класу міцності C50/60 при $\cot \theta = 1$ величина $\rho_w = 1,88 \cdot 10^{-2}$, а при $\cot \theta = 2,5$ – $\rho_w = 2,44 \cdot 10^{-2}$ (рис. 15).

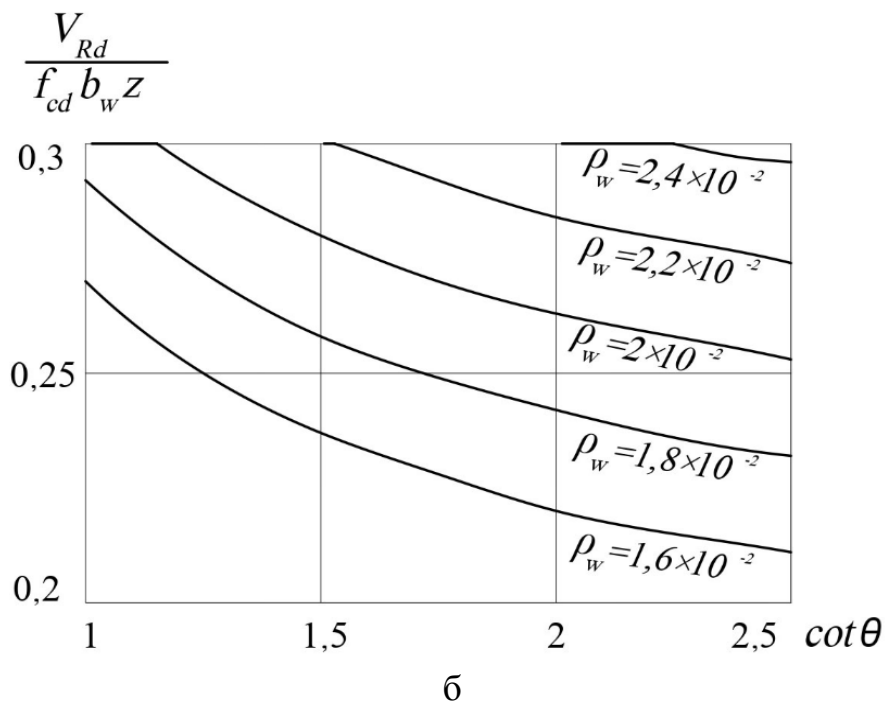
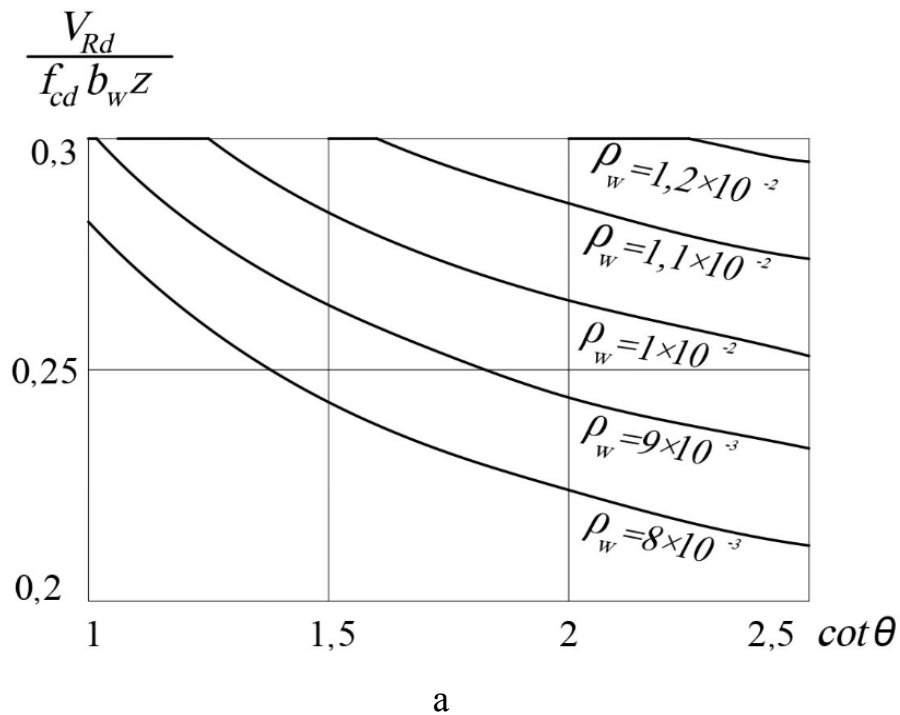


Рисунок 15 – Залежність відносного поперечного зусилля $V_{Rd} / (f_{cd} b_w z)$ від $\cot \theta$ при класі бетону C25/30 (а), C50/60 (б)

Викладені пропозиції щодо вдосконалення нормативного методу розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів у похилих перерізах на основі застосування варіаційного методу в теорії пластичності бетону сприяють підвищенню його точності.

Результати, отримані в даній науково-дослідній роботі, впроваджені при оцінюванні міцності згинальних залізобетонних елементів за похилими перерізами й уточненні категорії технічного стану конструкцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сучасна будівельна індустрія все більше використовує модифіковані високоміцні бетони високої якості. В Україні вони застосовуються порівняно рідко, що пов'язано з відсутністю нормативної бази та недостатнім обсягом системних досліджень особливостей їх поведінки під навантаженням.

2. Для експериментального вивчення міцності високоміцного бетону при зрізі за різних схем прикладання навантаження та форми елементів використані зразки Гвоздєва як найбільш відомі для визначення опору бетону «чистому зрізу», залізобетонні шпонки, зрізані бетонні клини, котрі моделюють стиснуту зону бетону над небезпечною похилою тріщиною, та балки.

3. Руйнування дослідних зразків відбувалося раптово лавиноподібно. Порівняно із елементами низької та середньої міцності бетону розміри стиснутих зон зменшувалися, а розтягнутих збільшувалися. При цьому для зразків Гвоздєва та шпонок поверхня руйнування наближалася до площини зрізу, а для бетонних клинів до напрямку дії стискувальної сили.

4. Експериментально підтверджена залежність міцності елементів від обох характеристик бетону f_c і f_{ct} .

5. Значення деформації арматури у місці перетину площини зрізу відповідають рівню деформації на ділянці текучості. Дворівневе розташування арматури за висотою елементів у площини зрізу сприяє підвищенню пластичних властивостей бетону в середньому на 30%.

6. Незважаючи на зовні крихкий характер руйнування, зафіксовано досить великі деформації бетону стиску (до $2,4 \cdot 10^{-3}$), котрі локалізовані у місцях проходження поверхні руйнування.

7. Наявність направленої зосередженої пластичної деформації бетону обумовлює можливість розширення області застосування варіаційного методу в теорії пластичності на високоміцні бетони при зрізі.

8. Порівняння результатів розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону, отриманих на основі варіаційного методу в теорії пластичності, та експериментальних даних вказує на їх задовільну збіжність (середнє арифметичне відношення теоретичної міцності до дослідною $\bar{X} = 0,927$, середньо квадратичне $\sigma_{n-1} = 0,088$, коефіцієнт варіації $v = 9,5\%$).

9. Встановлені значення граничного коефіцієнта поперечного армування ρ_w на межі випадків руйнування за похилою тріщиною (дискова модель) і похилою стиснутою смугою (елемента фермової аналогії) залежно від класу бетону та кута нахилу умовного стиснутого елемента θ . Так для бетону класу міцності C50/60 при $\cot \theta = 1$ $\rho_w = 1,88 \cdot 10^{-2}$, а при $\cot \theta = 2,5$ $\rho_w = 2,44 \cdot 10^{-2}$.

10. Надані пропозиції щодо вдосконалення нормативного методу розрахунку міцності згинальних елементів у похилих перерізах. Якщо фактичне значення коефіцієнта поперечного армування менше ніж граничне реалізується дискова модель і відбувається зріз стиснутої зони бетону над небезпечною похилою тріщиною, в іншому випадку відбувається зріз бетону в межах умовного стиснутого похилого елемента фермової аналогії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях України

1. Експериментальні дослідження роботи бетону стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Т.Ю. Качан, О.О. Куриленко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне, 2009. – Вип. 18. – С. 186-193. (*Особистий внесок: участь у проведенні експерименту, аналіз отриманих результатів*).

2. Довженко О.О. Міцність зрізаних бетонних клинів із високоміцного бетону / О.О. Довженко, О.О. Куриленко, І.В. Акіменко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне: УДУВГП, 2011. – Вип.21. – С. 193-198. (*Особистий внесок: виконання експерименту, обробка результатів та підрахування теоретичної міцності зрізаних бетонних клинів варіаційним методом у теорії пластичності бетону*).

3. Довженко О.О. Про можливість застосування теорії пластичності до розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Куриленко // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. – К.: Техніка, 2012. – Вип. 105. – С. 74-82. (*Особистий внесок: порівняння результатів експериментальних досліджень з кінематичними схемами руйнування зразків при розв'язанні задач міцності варіаційним методом*).

4. Куриленко О.О. Методика експериментальних досліджень балок прямокутного профілю із високоміцного бетону в похилих перерізах / О.О. Куриленко, І.В. Шостак // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: УДУВГП, 2012. – Вип.23. – С. 293-298. (*Особистий внесок: розробка програми експериментальних досліджень*).

5. Результати експериментальних досліджень міцності балок із бетону підвищеної міцності за похилими перерізами / О.О. Довженко, Т.Ю. Качан, О.О. Мальована, В.Ю. Борбич // Будівельні конструкції. Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: міжвід. наук.-техн. зб. наук. пр. (будівництво) / ДНДІБК. – К.: НДІБК, 2013. – Вип. 78: В 2 кн. Кн. 1 – С. 565-571. (*Особистий внесок: проведення експерименту та обробка результатів випробування з побудовою графіків*).

6. Довженко О.О. Оцінювання міцності при зрізі бетонних елементів на основі теорії пластичності бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Мальована // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту – Харків: УДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 204-214. **Indexed in Copernicus.** (*Особистий внесок: застосування варіаційного методу в теорії пластичності бетону при розрахунках міцності елементів із високоміцного бетону при зрізі*).

7. Maliovana O. Strength of higher strength concrete elements under shear action / O.Maliovana // Academic Journal (Industrial Machine Building, Civil Engineering). – Poltava: PoltNTU, 2018. – Issue 1 (50). – P. 131-140. **Indexed in Copernicus.**

8. Удосконалена методика розрахунку міцності залізобетонних елементів за похилими перерізами / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Л.В. Карабаш, О.О. Мальована // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2019. – Вип. 1 (52). – С. 75-81. **Indexed in Copernicus.** *(Особистий внесок: визначення граничного коефіцієнта поперечного армування на межі випадків руйнування за похилою тріщиною (дискова модель) і похилою стиснутою смугою (елемента фермової аналогії) залежно від класу бетону).*

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

9. Concrete elements strength under the shear action according to the variation method in the theory of plasticity and tests / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, I. Usenko, O. Maliovana, M. Akopyn // International Scientific Journal Theoretical & Applied. – 2016. – Vol. 44, Iss. 12. – P. 12-18. **Indexed in Copernicus.** *(Особистий внесок: виконання аналізу збіжності теоретичної міцності, підрахованої варіаційним методом, з дослідною).*

10. Pohribnyi V. The Ideal Plasticity Theory Usage Peculiarities to Concrete and Reinforced Concrete / V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, O. Maliovana // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, iss. 3.2. – p. 19-26. www.sciencepubco.com/index.php/IJET. **Indexed in Scopus** *(Особистий внесок: розв'язання задачі міцності пластинки, завантаженої на гранях нормальними та дотичними силами).*

11. Strength calculation of risers near the supports of reinforced concrete three-hinged frames based on the concrete plasticity theory / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, Ye. Klymenko, M. Oreškovič, O. Maliovana // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708. – 012046 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012046> **Indexed in Scopus** *(Особистий внесок: оцінена несуча здатність пошкоджених при експлуатації тришарнірних залізобетонних рам).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію дисертації

12. Погрібний В.В. Міцність елементів із високоміцного бетону при зрізі / В.В. Погрібний, О.О. Довженко, О.О. Мальована // Зб. наук. пр. XII Міжнар. Наук.-практ. конф. «Академічна й університетська наука: результати та перспективи». – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2019. – с. 295-298. *(Особистий внесок: отримання експериментальних даних про деформований стан, характер руйнування та граничне навантаження елементів при зрізі).*

13. Розрахунок міцності стояків залізобетонних тришарнірних рам біля опор при зрізі на основі теорії пластичності / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Л.В. Карабаш, О.О. Мальована // 8-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 20-22 листопада 2019 р.: Тези доповідей. Ч.2. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – С. 60-61. *(Особистий внесок: оцінена несуча здатність пошкоджених при експлуатації тришарнірних залізобетонних рам).*

14. Мальована О.О. Міцність бетонних і залізобетонних елементів із високоміцного бетону при зрізі / О.О. Мальована // Експлуатація та реконструкція будівель і споруд: тези доп. III міжнар. конф. – Одеса: ОДАБА, 2019. – С. 97.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

15. Застосування високоміцних бетонів у стикових з'єднаннях / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Л.В. Карабаш, О.О. Куриленко // Бетон и железобетон в Украине, 2011. – № 1. – С. 2-4. (*Особистий внесок: участь в експериментальних дослідженнях, аналіз характеру руйнування, деформацій бетону й арматури дослідних зразків*).

16. Довженко О.О. Програма експериментальних досліджень міцності балок із високоміцного бетону в похилих перерізах / О.О. Довженко, О.О. Мальована // Бетон и железобетон в Украине. – 2014. – № 2 (78). – С. 5-6. (*Особистий внесок: аналіз досліджень і публікацій, розроблення методики проведення експериментальних досліджень балок*).

АНОТАЦІЯ

Мальована О.О. Міцність елементів із високоміцного бетону при зрізі. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2020.

У дисертації викладено експериментальні дослідження міцності елементів із високоміцного бетону, які працюють на сприйняття зрізувальних сил: зразків Гвоздева, залізобетонних шпонок, зрізаних бетонних клинів і балок. Підтверджена залежність міцності елементів від обох характеристик бетону f_c і f_{ct} , форми зразків, специфіки напружено-деформованого стану.

Розширена область застосування варіаційного методу в теорії пластичності на високоміцні бетони при зрізі.

Проведено порівняльний аналіз результатів теоретичних розрахунків із експериментальними даними, котрий свідчить про достатню точність запропонованої розрахункової методики.

Надані пропозиції щодо вдосконалення нормативного методу розрахунку міцності згинальних елементів у похилих перерізах. Якщо фактичне значення коефіцієнта поперечного армування менше ніж граничне реалізується дискова модель і відбувається зріз стиснутої зони бетону над небезпечною похилою тріщиною, в іншому випадку відбувається зріз бетону в межах умовного стиснутого похилого елемента фермової аналогії.

Ключові слова: високоміцний бетон, зріз, варіаційний метод, зразок Гвоздева, шпонка, зрізаний бетонний клин, балка в зоні дії поперечних сил, пластична деформація.

ANNOTATION

Maliovana O. Strength of high-strength concrete elements under the shear action.

The thesis for the PhD scientific degree in specialty 05.23.01 “Building constructions, buildings and structures” – National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava, 2020.

The dissertation research is devoted to the study of the work specifics and improvement of the strength calculation of concrete and reinforced concrete elements from high-strength concrete under the shear.

In the **introduction** of the work the justification of the topic choice is given, the purpose and objectives of the research, scientific novelty and practical significance of the work are formulated; its general characteristics and connection with scientific programs are presented.

The scientific novelty of the obtained results lies in the fact that in the course of the study new experimental data were obtained about the deformed state, the failure character and the ultimate load of high-strength concrete elements, which are destroyed from the shear: Gvozdev specimens, rectangular keys, truncated concrete wedges; new experimental data were obtained about the deformed state, the failure character along inclined sections and the ultimate load of high-strength concrete beams; the method of calculating elements under the shear by a variational method has found a further development in the direction of expanding its scope for calculating high-strength concrete elements; the realization boundary of strength calculation methods by a truss analogy and a disk model has been established; the method of strength calculation of flexural reinforced concrete members along inclined sections for the effect of shear forces has been improved.

The **first chapter** of thesis presents a detailed review and analysis of existing research on the properties, advantages and disadvantages of high-strength concrete in modern construction.

Data about the main characteristics of high-strength concrete, made by traditional technology using high-quality cements and careful selection of components, are presented in the works of Berg O.Ya., Dvorkin L.Y., Desov O.Ye., Sytnyk V.I. and others, based on modifiers are considered by Babych Ye.M., Batrakov V.G., Kapriylov S.S., Korsun A.V. and others.

In Ukraine, research was carried out on high-strength concrete structures by Ahmednadiyev R.M., Babych A.M., Bambura A.M., Batrakov V.G., Demchenko O.V., Yermolenko D.A., Kapriylov S.S., Lazaryeva O.M., Mytrofanov P.B., Shkurupiy O.A. and others. Consideration of the bearing capacity of the beams in the inclined section was mainly carried out abroad in particular Mphonde A.G., Johnson M.K., Ramirez M.P., Elzanaty A.H. etc. The proposed dependencies for determining the bearing capacity of beams in an inclined section are analyzed.

The basic provisions of the variational method in the theory of plasticity of concrete, developed at the Yuriy Kondratyuk National University for strength calculating concrete and reinforced concrete elements under the shear, are presented. The method is widely tested within the strength calculations of reinforced concrete structures using heavy and lightweight concrete.

The **second chapter** of the paper presents a plan of experimental studies and a detailed description of the test procedure.

For the experimental study of high-strength concrete under the shear action with different load schemes and element shapes, Gvozdev samples as the best known for determining the concrete resistance of a “pure shear”, reinforced concrete keys, truncated concrete wedges that simulate a compressed zone of concrete over a dangerous inclined crack were used. Total number is 28 pieces. All of them were significantly different in design, method of load transfer, stress-strain state in the shear plane. The experiments carried out are part of a comprehensive study of the resistance of concrete and reinforced concrete to the shear. These experiments are conducted at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures and Materials Resistance at Yuri Kondratyuk National University.

Gvozdev samples were made together with wedges from one batch using modifiers.

Reinforced keys were made using 700 grade cement. The ratio of the width of the loading platform to the key height was $l_k/h_k = 0,25$, which provided their maximum strength. Two variants of reinforcement cages were used to evaluate the effect of reinforcement placement along the key height: with the placement of 2 bars in the middle and 4 bars spaced 2 in the upper and lower parts (two twin specimens). In this case, the percentage of reinforcement remained almost unchanged.

Two series of truncated concrete wedges were tested. For them, the wedge angle was $\alpha = 15, 30, 45^\circ$, and the loading angle β varied from 0° to 20° (V_w was directed to and from the right angle of the wedge). To prevent failure of the lower part of the samples, it was reinforced.

All samples were tested in the hydraulic press PG – 125 of the department laboratory. Tensoresistors with a base of 5 – 50 mm were used to measure strains of concrete and reinforcement.

In addition to the above mentioned elements, studies of beams on the effect of the shear force in an inclined section were carried out. The pilot series consisted of 2 specimens for which concrete of two types (with and without polypropylene fiber) was manufactured in the laboratory. The second series consisted of 9 samples. Manufacture of beams was carried out at the plant “Poltavtransbud”, with the use of a concrete mixer of compulsory action and a vibrating platform for concrete mix compacting. Beams 1500 mm long had a rectangular cross section with dimensions $b \times h = 120 \times 180$ mm. The pilot series was reinforced with 3-dimensional cages with longitudinal reinforcement 4Ø16 A400C, shear reinforcement was 2Ø6 B500 with step of 200 mm; in the beams of the second series bars 2Ø20 A400C were used as longitudinal reinforcement.

The specimens were tested in the device of the department’s laboratory according to the scheme of “pure bending” with relative shear span $a/d = 2,3$.

The **third chapter** of the dissertation is devoted to the analysis of experimental data obtained.

The samples failure occurred like an avalanche. Compared to the elements of low and medium strength concrete, the sizes of the compressed zones decreased and the tensile ones increased. In this case, for the Gvozdev samples and keys, the failure

surface approached the shear plane and for the concrete wedges to the compressive force direction.

The dependence of the elements strength on both characteristics of the concrete f_c and f_{ct} was experimentally confirmed.

The values of the reinforcement strain at the intersection of the shear plane correspond to the level of strain in the yield point area. The two-level arrangement of reinforcement by the height of the elements contributes to the increase of plastic properties of concrete by an average of 30%. Despite the brittle failure character, sufficiently large strains of the compression concrete (up to $2,4 \cdot 10^{-3}$) were recorded, which are localized at the places where the failure surface passes.

The failure character of the studied beams was not fundamentally different from the failure of the flexural members on an inclined section of medium strength concrete. The failure occurred by shearing the compressed zone over a dangerous inclined crack, with the movement of individual blocks along the failure surface, which is realized only in the presence of inelastic strains on it. The ultimate deflections of the beams averaged 10 – 13 mm.

In the **fourth chapter** of the dissertation to solve the strength problems of the high-strength concrete elements, which are destroyed by shearing: Gvozdev samples, reinforced concrete rectangular keys, truncated concrete wedges, inclined compressed plate, loaded at the ends of the normal and tangent components of the shear force, variational method in plasticity theory of concrete is used. The presence of directional concentrated plastic strain of concrete causes the possibility of extending the scope of the variation method to high-strength concrete under the shear action. Formulas for determining the ultimate load of these elements are given.

Results comparison of the strength calculation of the high-strength concrete elements, obtained on the basis of the variational method in the theory of plasticity, and the experimental data indicates their satisfactory convergence: arithmetical average ratio of theoretical strength to experimental is $\bar{X} = 0,927$ and variation coefficient is $\nu = 9,5\%$. The values of the ultimate coefficient of shear reinforcement ρ_w are established at the boundary of failure cases by inclined crack (disc model) and inclined compressed strip (truss analogy element) depending on the concrete class and the slope angle of the conditional compressed element θ . So for concrete of class C50/60 at $\cot \theta = 1$ $\rho_w = 1,88 \cdot 10^{-2}$, and at $\cot \theta = 2,5$ – $\rho_w = 2,44 \cdot 10^{-2}$.

Suggestions are given to improve the normative method of calculating the strength of flexural members in inclined sections. If the actual value of the coefficient of shear reinforcement is less than the ultimate one, a disk model is implemented and shear of the compressed zone of concrete over a dangerous inclined crack is observed, otherwise shear of concrete within the conditionally compressed inclined element of the truss analogy occurs.

The results obtained in this research work are implemented in the evaluation of the strength of flexural reinforced concrete members by inclined sections and in the clarification of the category of their technical condition.

Keywords: high-strength concrete, shear, variational method, Gvozdev specimen, key, truncated concrete wedge, beam in the action of the shear force, plastic strain.

Підписано до друку 11.08.2020 р.
Формат 60х84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк різнографічний. Умовн. друк. арк. 1,4.
Наклад 100 шт. Замовлення 2020-19.

Друк ПП «Астроя»
36014, м. Полтава, вул. Швендська, 20, кв. 4
Тел.: +38 (0532) 509-167, 611-694
Дата державної реєстрації та номер запису в ЄДР
14.12.1999 р. № 1 588 120 0000 010089
