

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

БЛІХАРСЬКИЙ ЯРОСЛАВ ЗІНОВІЙОВИЧ



УДК 624.012.45

**ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З
ПОШКОДЖЕННЯМИ ТЕРМІЧНО-ЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Солодкий Сергій Йосифович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри автомобільних доріг та мостів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Савицький Микола Васильович,
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва
та архітектури», ректор;

доктор технічних наук, професор
Бамбура Андрій Миколайович,
ДП “Державний науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій” Мінрегіонбуду України,
завідувач відділом надійності будівельних
конструкцій;

доктор технічних наук, професор
Ватуля Гліб Леонідович,
Український державний університет залізничного
транспорту, проректор з наукової роботи.

Захист відбудеться «21» грудня 2021 р., о 10:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.085.01 в Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ауд. а.360.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

Автореферат розісланий: «19» листопада 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.085.01



С.О. Кровяков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Залізобетонні конструкції знайшли широке поширення в будівлях і спорудах як промислового, так і цивільного призначення. Залізобетон оптимально застосовується у складі будівельних конструкцій і ефективно виконує свої функції, сприймаючи різні види силових і несилових впливів, характер яких залежить від умов експлуатації в різних середовищах.

При цьому для залізобетонних конструкцій довговічність і залишкова несуча здатність часто залежить не лише від силових навантажень, а й від впливів навколишнього середовища. Одними із найбільш небезпечних впливів є корозійні процеси, що спричиняють появу дефектів різного ступеня і, відповідно, зниження несучої здатності конструктивних елементів. При цьому, інтенсивність деградації конструкцій в умовах впливів агресивного середовища залежить від умов експлуатації, хімічного складу і концентрації агресивного середовища.

Найбільш інтенсивним впливам корозії піддаються конструктивні елементи будівель і споруд промислового призначення, хімічних заводів, конструкції, що піддаються поперемінному зволоженню і висиханню, які безпосередньо контактують із агресивними сполуками.

Основними проявами корозійних пошкоджень є зменшення поперечного перерізу залізобетонних елементів, пошкодження робочого армування, зниження параметрів міцності та деформативності. Ці показники є факторами, які при їх комплексному прояві спричиняють зниження несучої здатності і є причиною небезпеки для споруди при її експлуатації. З огляду на це для конструкцій, що експлуатуються в умовах агресивного середовища, необхідним є постійний моніторинг їх фактичного стану з періодичним їх оглядом фахівцями. Для таких конструкцій дійсний залишковий ресурс повинен визначатись з урахуванням корозійних пошкоджень і дефектів.

Корозійні пошкодження є причиною значних матеріальних втрат, а також значного ризику при експлуатації існуючих будівель і споруд. Необхідно зазначити, що сучасні чинні нормативні документи і методики розрахунку не охоплюють достатньою мірою проблему розрахунку залізобетонних конструкцій, що піддаються впливам агресивного середовища. Відповідно, актуальними є більш докладні експериментальні і теоретичні дослідження в напрямку врахування корозійних пошкоджень для визначення їх дійсного залишкового ресурсу, що підтверджує актуальність даної проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи і отримані результати відповідають науковому напрямку кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Дисертацію виконано в межах держбюджетних науково-дослідних робіт «Розроблення методик визначення несучої здатності та деформативності залізобетонних конструкцій зміцнених новітніми матеріалами за дії навантаження» (номер державної реєстрації 0115U000436), «Розроблення способів підсилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами та методика розрахунку конструкцій в реальних умовах експлуатації» (номер

державної реєстрації 0117U004444) та «Розробка методики визначення фактичного ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженнями, що знижують несучу здатність та експлуатаційну придатність» (№ державної реєстрації 0121U109498).

Метою роботи є вирішення наукової проблеми визначення фізико-механічних характеристик термічно-зміцненої арматури з врахуванням її пошкодження, а також встановлення дійсного напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу залізобетонних згинаних конструкцій в залежності від ступеню пошкодження робочої арматури з використанням новітніх методів діагностики із застосуванням безконтактних суб-мікронних індикаторів та цифрової кореляції зображення.

Досягнення поставленої мети передбачає реалізацію таких **основних завдань дослідження**:

- на основі аналізу літературних джерел скласти комплексну програму експериментально-теоретичних досліджень напружено-деформованого стану залізобетонних згинаних конструкцій з різними ступенями пошкодження робочої термічно-зміцненої арматури;
- сформулювати інформаційно-технічне забезпечення для адаптації та реалізації методу цифрової кореляції зображення при дослідженні арматури, бетону та напружено-деформованого стану залізобетонних згинаних конструкцій;
- розробити методику з використанням методу цифрової кореляції зображення та експериментально дослідити фізико-механічні характеристики (мікротвердість, міцність на розтяг) та діаграми деформування σ_s - ε_s термічно-зміцненої арматури класу А500С діаметрами 12...32 мм з врахуванням різного ступеню її пошкодження;
- розробити методику з використанням методу цифрової кореляції зображення та виконати експериментальні дослідження бетонних зразків з метою побудови повної діаграми деформування бетону σ_c - ε_c з низхідною віткою та визначення коефіцієнта Пуассона;
- розробити методику з використанням методу цифрової кореляції зображення та виконати експериментальні дослідження впливу різного ступеню пошкоджень робочої арматури класу А500С на параметри напружено-деформованого стану залізобетонних балок;
- розробити пропозиції з визначення залишкової несучої здатності за діючими нормами проектування залізобетонних згинаних елементів, які б враховували зміну фізико-механічних характеристик робочої арматури класу А500С внаслідок її пошкодження;
- розробити та апробувати інженерний та ймовірнісний підходи до прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних згинаних конструкцій з робочою арматурою класу А500С в залежності від ступеня та характеру її пошкоджень.

Об'єкт дослідження – пошкодження термічно-зміцненої робочої арматури залізобетонних згинаних конструкції в умовах тривалої експлуатації.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан та залишковий ресурс залізобетонних згинаних конструкцій з пошкодженням термічно-зміцненої робочої арматури.

Методи дослідження: вивчення та аналіз експериментально-теоретичних досліджень, що приведені в літературних джерелах, експериментальні випробовування залізобетонних згинаних елементів зі застосуванням лабораторного обладнання та пристроїв для визначення деформацій за методом цифрової кореляції зображення. Для проведення теоретичних досліджень використано нелінійну деформаційну модель розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що **вперше:**

- отримано нові експериментальні дані мікротвердості перерізу арматури класу А500С та виявлено анізотропію її фізико-механічних характеристик, встановлено та визначено зовнішній термічно-зміцнений шар арматури із суттєво вищими фізико-механічними характеристиками в порівнянні із серцевиною;
- отримано з використанням методу цифрової кореляції зображення нові експериментальні діаграми деформування σ_s - ε_s термічно-зміцненої арматури класу А500С з різними ступенями пошкодження поперечного перерізу;
- отримано з використанням методу цифрової кореляції зображення повну діаграму деформування бетону σ_c - ε_c з низхідною віткою та встановлено характер зміни коефіцієнта Пуассона на всіх стадіях включно до руйнування бетону;
- отримано з використанням методу цифрової кореляції зображення нові експериментальні дані напружено-деформованого стану залізобетонних балок з різними ступенями пошкодження поперечного перерізу термічно-зміцненої робочої арматури класу А500С;
- встановлено, що із зменшенням поперечного перерізу робочої арматури класу А500С внаслідок пошкоджень несуча здатність залізобетонних балок зменшується не тільки за рахунок зменшення площі арматурних стержнів, а також за рахунок зменшення характеристик міцності пошкодженої арматури;

набули подальшого розвитку:

- метод цифрової кореляції зображення для експериментальних досліджень та діагностики залізобетонних згинаних конструкцій, який дає можливість фіксувати зміну деформацій бетону та арматури в безконтактному режимі на всіх етапах навантаження включно до руйнування;
- методика визначення залишкової несучої здатності за діючими нормами проектування залізобетонних згинаних елементів, яка враховує зміну фізико-механічних характеристик термічно-зміцненої робочої арматури класу А500С в залежності від ступеня та характеру її пошкодження;
- методика прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних згинаних конструкцій з термічно-зміцненою робочою арматурою класу А500С в

залежності від ступеня та характеру її пошкоджень з використанням інженерного та ймовірнісного підходів.

Достовірність отриманих наукових результатів забезпечується використанням стандартних методів досліджень залізобетонних конструкцій з використанням сучасного обладнання та комп'ютерного забезпечення, задовільною збіжністю теоретичних та експериментальних результатів, верифікацією методом цифрової кореляції зображень та суб-мікронними індикаторам, а також застосування методів математичної статистики.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання результатів роботи при обстеженні залізобетонних згинаних конструкцій з пошкодженнями термічно-зміцненої робочої арматури, оцінювати дійсний залишкових ресурс таких залізобетонних конструкцій з врахуванням пошкодження термічно-зміцненого шару та зменшення фізико-механічних характеристик арматури.

Результати виконаних експериментально-теоретичних досліджень за участю автора застосовані на будівлях та спорудах ТОВ „Карпатнафтохім” (м. Калуш), при виконанні робіт з встановлення дійсного технічного стану та залишкового ресурсу, оцінки необхідності їх відновлення та при розробленні конструктивних рішень підсилення залізобетонних конструкцій різних об'єктів. Окремі результати роботи отримані при виконанні даних досліджень, застосовані в ТОВ «Інститут проектування «Комфортбуд»», ТОВ «Компанія «Спецбудпроект» та проектно-інжиніринговій компанії ТОВ «Сіменерго» при розробці проектів реконструкції будівель громадського та виробничого призначення. Окремі матеріали даних досліджень є частиною держбюджетної теми, що виконується у 2021-2022 рр. та використовуються у навчальному процесі в Національному університеті «Львівська політехніка». Ефективність результатів досліджень підтверджена довідками і актами про їх впровадження.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової проблеми оцінювання дійсного напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури. Викладені у дисертаційній роботі наукові ідеї та основні положення отримані автором самостійно. В проведених наукових дослідженнях спільно з співавторами автором самостійно розроблено загальну програму і методологію досліджень, проаналізовані наукові роботи та нормативні документи, що входять в основну базу посилань та цитувань з теми роботи. Автор приймав безпосередню участь в експериментальних і теоретичних дослідженнях, аналізував та узагальнював результати досліджень. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий вклад здобувача полягає у формулюванні мети та задач наукових досліджень, в науковому аналізі, обґрунтуванні та розробці методів і способів їх розв'язання.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були представлені та обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: міжнародній науковій конференції „Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля” (Львів-Кошице-Жешув, 2019р., 2020р.), на міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності

інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2018р., 2019р., 2020 р.), 3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering (ECCE 2018) (Opole, Poland, April 23-25, 2018); International Conference Quality Production Improvement – QPI (Забож, Польща, 2018р., 2019р.); 8th International Conference System Safety: Human – Technical Facility – Environment” (Закопане, Польща, 2019 р.); VII Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 12–15 травня 2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 9-11 вересня 2021 р.) та на семінарах кафедри «Автомобільні дороги та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2019 – 2021 рр.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень опубліковані у 32 наукових працях, з них 9 статей у наукових фахових виданнях України, 18 статей у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз (з них 15 статей у НМБД SCOPUS), 5 публікацій апробаційного характеру.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел із 434 найменувань та 4 додатків. Робота викладена на 351 сторінках тексту, у тому числі містить 251 сторінки основного тексту, 46 сторінки списку використаних джерел, 49 таблиць, 177 рисунків та 18 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, показано її зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також наведено дані про їх впровадження та рівень апробації.

У **першому розділі** проведено аналіз літературних джерел з проблематики наукового дослідження, висвітлено основні напрацювання з таких питань: описано основні аспекти довговічності і надійності, проаналізовано основні причини виникнення пошкоджень в залізобетонних конструкціях, механізми їх поширення і вплив на напружено-деформований стан конструктивних елементів. Значну увагу при цьому приділено пошкодженням робочої арматури, а також енергетичному підходу при оцінці пошкоджень залізобетонних елементів. Крім того, в цьому розділі значну увагу приділено неруйнівним методам дослідження і діагностики напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, серед яких особливо виділено методи із застосуванням цифрової кореляції зображень. Також проведено огляд технічної літератури з питання застосування нелінійної діаграми деформування бетону для вивчення напружено-деформованого стану бетону, виконано аналіз підходів до оцінки надійності залізобетонних конструкцій на основі імовірнісного підходу.

Особливості напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, зокрема, при наявності в них пошкоджень, а також підходи до їх розрахунку і проектування з врахуванням фізико-механічних характеристик арматури, в тому

числі термічно-зміцненої, вивчала велика кількість дослідників, серед яких необхідно згадати Азізова Т.Н., Байкова В.Н., Бабича Є.М., Бамбуру А.Н., Барашикова А.Я., Барабаша М.С., Бачинського В.Я., Бондаренка С.В., Борисюка О.П., Боярчука Б.А., Ватулю Г.Л., Вахненко П.Ф., Воскобійника О.П., Гнідця Б.Г., Голишева А.Б., Демчину Б.Г., Дорофєєва В.С., Журавського О.Д., Квашу В.Г., Карпюка В.М., Клименка Є.В., Клімова Ю.А., Кривошеєва П.І., Лазовського Д.Н., Лапенка О.І., Мальганова А.І., Мельника І.В., Павлікова А.М., Пецольда Т.М., Савицького М.В., Стороженка Л.І., Семка О.В., Торяника В.В., Тура В.В., Фоміна С.Л., Хіло Е. Р., Шагіна А.Л., Шмуклера В.С., Яременка О.Ф., Чернявського В.Л., Yang, S.T., Zhang, L., Wang, C., Fursa T.V.

На основі проведеного аналізу наукових робіт можна відмітити, що проблемі вивчення напружено-деформованого стану залізобетонних згинаних елементів присвячено значну кількість експериментальних і теоретичних досліджень, проте питання залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженою термічно-зміцненою арматурою потребує більш детальних досліджень. При цьому важливо враховувати неоднорідні характеристики термічно-зміцненої арматури вздовж перерізу арматурного стержня.

Для раціонального використання будівельних конструкцій, що знаходяться в експлуатації, необхідна достовірна оцінка їх залишкового ресурсу і показників надійності, які враховують стохастичну природу навантажень і характеристик матеріалів. На основі проведеного огляду встановлено, що для оцінювання залишкового ресурсу і надійності залізобетонних конструкцій доцільно застосовувати ймовірнісні підходи до розрахунку. Загалом, вивченню можливих методів розрахунку надійності та залишкового ресурсу присвятили свої роботи Барашиков А.Я., Болотін В.В., Воскобійник О.П., Голоднов О.І., Карпюк В.М., Кінаш Р.І., Клименко Є.В., Кущенко В.М., Лантух-Лященко А.І., Пашинський В.А., Перельмутер А.В., Пічугін С.Ф., Райзера В.Д., Ржаніцин А.Р., Савицький М.В., Семко О.В., Усаковський С.Б., Хоціалов Н.Ф., Шимановський О.В., Шмуклер В.С., Шпете Г., Яцко Ф.П. та інші.

Необхідно зазначити, що, незважаючи на те, що в сучасних умовах питання оцінки надійності пошкоджених залізобетонних конструкцій набуло значної актуальності, в чинних нормах воно недостатньо детально висвітлено.

Крім цього необхідним є більш детальне дослідження параметрів напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з пошкодженнями робочої арматури на основі нелінійної діаграми деформування бетону.

На основі огляду літературних джерел було підтверджено актуальність вибраної теми, сформульовано мету дослідження, визначено основні завдання.

У **другому розділі** наведено методіку досліджень бетону та арматури, які використовувались у експериментальних дослідних залізобетонних балках.

У всіх дослідження використовували метод цифрової кореляції зображення. Метод цифрової кореляції зображень – це оптичний метод, в основі якого лежить математичний кореляційний аналіз цифрових зображень досліджуваного елементу в різних напружено-деформованих станах. Алгоритм методу включає безперервне захоплення зображень цифровою камерою під час процесу деформування конструкції під навантаженням, в результаті чого

отримується можливість оцінити зміни в поверхневих характеристиках матеріалу і зрозуміти поведінку конструктивного елементу. Для застосування методу на досліджувану поверхню зразка наносять спектр з точок певної густини (певний точковий візерунок). При аналізі першим розглядається зображення поверхні до прикладання навантаження (reference image), з яким порівнюються зображення, що відповідають різним етапам процесу деформації (deformed images). За допомогою спеціального програмного забезпечення виконується математичне співставлення зміщень в точкових візерунках і будується повна карта розподілу деформацій і зусиль (рис. 1).

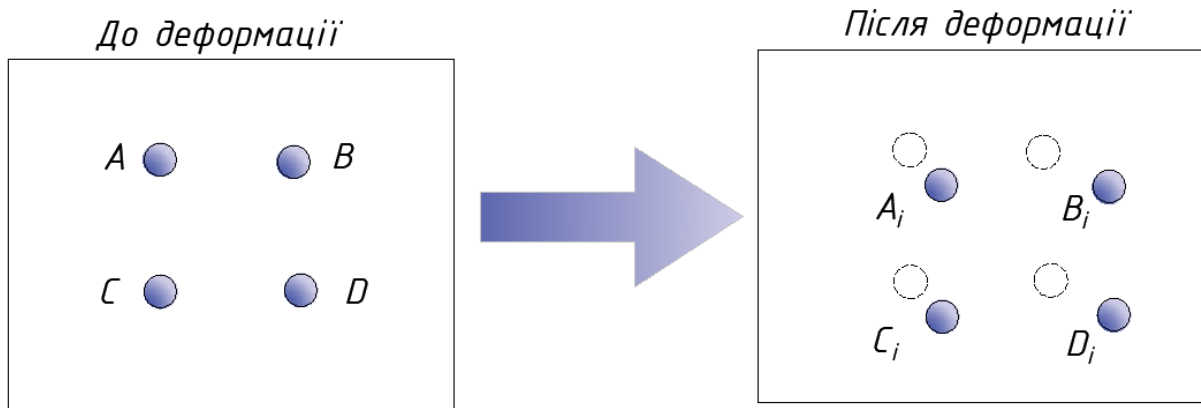


Рис. 1. Схема деформацій в методі цифрової кореляції зображень

Для дослідження бетону було сформовано 5 кубиків розмірами $100 \times 100 \times 100$ мм, 5 призм розмірами $100 \times 100 \times 400$ мм, 9 бетонних призм розмірами $600 \times 150 \times 150$ мм та 30 бетонних кубиків розмірами $150 \times 150 \times 150$ мм. Дослідження проводили експериментальним методом. Для визначення деформацій за методикою цифрової кореляції зображення використано 2 монохроматичні камери “Grasshopper 3” фірми Flir (Канада) з об’єктивом Computar F25/2.8 та з об’єктивом Canon EF 70-200MM F/2.8 L IS III USM (рис. 2).

Випробування бетонних призм $400 \times 100 \times 100$ мм виконували на гідравлічному пресі ПГ-250 з максимальним навантаженням 250 тс (рис. 2). Для перевірки методики цифрової кореляції зображення на бетонній призмі додатково встановлювали суб-мікронний індикатор з ціною поділки 0.001 мм. База вимірювань індикатора складала 200 мм. Оскільки прес не має можливості запису навантаження в часі, то для запису навантаження використовували додаткову третю камеру зі швидкості 50 кадрів/сек.



Рис. 2. Загальний вигляд дослідної установки випробування бетону: 1 – LED освітлення, 2 – камера з об'єктивом Computar F25/2.8, 3 – камера з об'єктивом Canon EF 70-200MM F/2.8 L IS III USM, 4 – камера для контролю навантаження, 5 – ноутбук для запису зображень, 6 – ноутбук для запису навантаження, 7 – дослідний зразок (вигляд з камери 2)

Деформації для кореляції зображень записували 2 камери зі швидкістю 250 мс (1/4 сек). Для освітлення використовували 2 LED лампи.

Для обробки цифрових зображень та отримання в результаті деформацій бетону використовували спеціалізоване програмне забезпечення. У програму закладений алгоритм аналізу спеклів, що дає можливість отримання відносних переміщень в будь-якій ділянці чи на будь-якій базі.

При випробуванні арматури попередньо визначали її мікротвердість. При проведенні випробувань на мікротвердість проводили підготовку поверхневого шару зразка. Для цього нарізали зразки із арматури класу А500С діаметрами 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28 та 32 мм висотою 20 мм (рис. 3). Після цього зразки шліфувались та полірувались на спеціальних установках. Випробування твердості за Вікерсом проводили на стаціонарному твердомірі типу ПМТ-3 (рис. 3). Для одержання достовірних середніх значень здійснюють 5-10 вимірів.

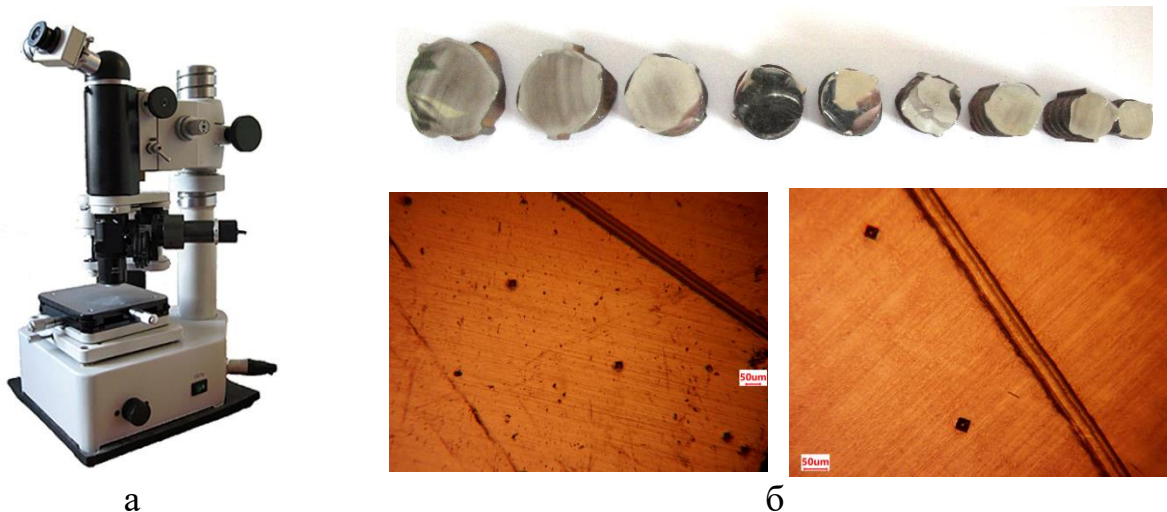


Рис. 3. Визначення мікротвердості арматури класу А500С:
а – мікротвердомір ПМТ-3, б – дослідні шліфи діаметром 12...32 мм

При виготовленні залізобетонних конструкцій можуть використовуватись зварні з'єднання, тобто до основної арматури приварюють додатково поперечну арматуру меншого діаметру. Для оцінки впливу від зварювання на арматуру класу А500С використано метод індентування, вимірювання мікротвердості та розподіл в межі зварного шва. Проведено дослідження на зразку арматури А500С діаметром 20 мм до якої в перпендикулярному напрямку приварено арматуру діаметром 10 мм (рис.4).

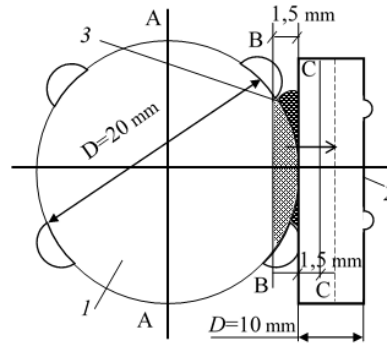


Рис.4. Схема вимірювання мікротвердості в арматурі класу А500С і зварному з'єднанні: 1 – основна, 2 – поперечна, 3 – зварний шов

Дослідження зміни мікротвердості в такому з'єднанні проводили після його шліфування та отримання площинності. Доведення поверхні двох арматур до чистоти 2.5 здійснювали на полірувальній машині. Вимірювання мікротвердості арматури А500С у поперечному перерізі проводили за схемою наведеною на рис. 4. По лінії А-А вимірювали розподіл мікротвердості арматури діаметром 20 мм, а також по лінії В-В, яка розміщена на зоні сплавлення з арматурою діаметром 10 мм.

Для випробування арматури класу А500С на розтяг було підготовлено 50 зразків арматури діаметром 20 мм та 42 зразки арматури діаметрами 12...32 мм довжинами 600 мм. За розробленою методикою випробовували партії циліндричних зразків, виготовлених із арматури класу А500С із зовнішнім діаметром 20 мм. Перша партія складала 5 зразків суцільної арматури. Наступні партії зразків виготовляли шляхом обточування зовнішнього шару арматури в середній частині довжиною 100 мм до діаметрів: 19; 18; 17; 16; 15; 14; 13; 12; 11; 10 мм. Зразки діаметром 12...32 мм випробовували по 3 зразки суцільної арматури та 3 зразки з аналогічним обточенням зовнішнього шару в межах 4...10 мм довжиною 100 мм. Особливістю проведення випробувань на розтяг є реєстрація зусилля навантаження у цифровому вигляді на комп'ютері, а також зображення проточеної ділянки поверхні зразка цифровою камерою. Інтервал часу між зображеннями був фіксований і становив 0.5 с. В процесі випробування паралельно визначали видовження зразка електронним суб-мікронним комп'ютиризованим індикатором. Реєстрацію зображень здійснювали з допомогою монохроматичної цифрової камери Grasshoppers 3 Flir з об'єктивом Computar F25/2.8. Камера разом із підсвіткою була встановлена на платформі, закріпленої до нижньої станини випробувальної установки EUS-20 (рис. 5). Відстань від об'єктива до зразка становила 300 мм, що дало можливість камерою реєструвати всю довжину проточеної ділянки. Реєстрацію навантаження в часі

на комп'ютері здійснювали від навантажувальної установки EUS-20 через аналого-цифровий перетворювач E14-440 з використанням програми забезпеченням Power Graph (рис. 5).

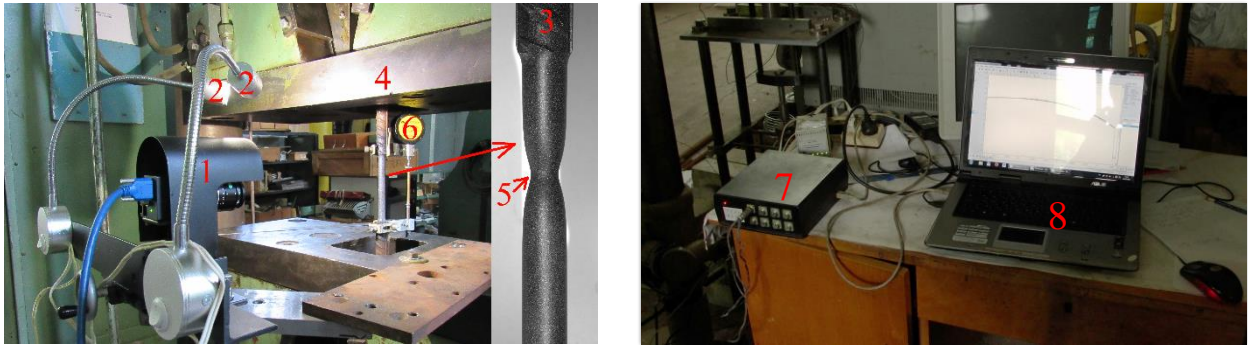


Рис. 5. Експериментальна установка: 1 – цифрова камера; 2 – лампи освітлення; 3 – зразок; 4 – захвати випробувальної машини; 5 – зона шийки; 6 – цифровий індикатор; 7 – перетворювач E14-440; 8 – реєстрація навантаження в часі на комп'ютері

З використанням методу ЦКЗ визначали як загальне видовження зразків в осьовому та поперечному напрямках проточеної ділянки так і переміщення в області шийки за допомогою віртуального екстензометра за різного ступеня деформування. Визначення переміщень в двох напрямках використовували для розрахунку локальних деформацій ϵ_x і ϵ_y на різних базах вимірювання. За таким підходом є можливість встановити величину деформацій, а відтак і напружень та їх співвідношення у локальному об'ємі у двох напрямках, а також вибрати оптимальний об'єм матеріалу, де напружено-деформований стан є однорідний і не залежить від величини бази вимірювання переміщень.

У **третьому розділі** наведено програму та методики проведення експериментальних досліджень згинаних залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури класу A500C. Для досягнення і виконання поставленої мети та задач досліджень було запроектовано та виготовлено 34 залізобетонні балки розмірами 2100×200×100 мм (рис. 6).



Рис. 6. Загальний вигляд дослідних зразків (залізобетонні балки)

Залізобетонні балки було поділено на 7 серій, кожна з серій відрізнялась діаметром робочої арматури. 1 серія – робоча арматура діаметром 20 мм, 2 серія – 12 мм, 3 серія – 14 мм, 4 серія – 16 мм, 5 серія – 18 мм, 6 серія – 22 мм, 7 серія

– 25 мм, 8 серія – 28 мм та 9 серія – 32 мм. У зразках 1 серії пошарово виконано обточення термічно-зміцненого шару робочої арматури з діаметра 20 мм до 12 мм з кроком 2 мм (рис. 7). У зразках 6 серії обточено зміцнений шар робочої арматури з діаметра 22 мм до діаметра 16 мм, а у зразках 7-9 серії обточено зміцнений шар робочої арматури з діаметра 25, 28 та 32 мм до діаметра 20 мм. Програма досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Програма досліджень експериментальних залізобетонних балок

№	Маркування	Діаметр армування, мм		Примітки
		Вихідний	Пошкоджений	
1	КБ-1.1	20	-	контрольні, непошкоджені
2	КБ-1.2		-	
3	БП-1.3		18	зточений зовнішній шар арматури
4	БП-1.4		18	
5	БП-1.5		16	зточений зовнішній шар арматури
6	БП-1.6		16	
7	БП-1.7		14	зточений зовнішній шар арматури
8	БП-1.8		14	
9	БП-1.9		12	зточений зовнішній шар арматури
10	БП-1.10		12	
11	Б-2.11	12	-	непошкоджені
12	Б-2.12		-	
13	Б-3.13	14	-	непошкоджені
14	Б-3.14		-	
15	Б-4.15	16	-	непошкоджені
16	Б-4.16		-	
17	Б-5.17	18	-	непошкоджені
18	Б-5.18		-	
19	Б-6.19	22	-	непошкоджені
20	Б-6.20		-	
21	БП-6.21		16	зточений зовнішній шар арматури
22	БП-6.22		16	
23	Б-7.23	25	-	непошкоджені
24	Б-7.24		-	
25	БП-7.25		20	зточений зовнішній шар арматури
26	БП-7.26		20	
27	Б-8.27	28	-	непошкоджені
28	Б-8.28		-	
29	БП-8.29		20	зточений зовнішній шар арматури
30	БП-8.30		20	
31	Б-9.31	32	-	непошкоджені
32	Б-9.32		-	
33	БП-9.33		20	зточений зовнішній шар арматури
34	БП-9.34		20	

Прийняті наступні умовні позначення: К – контрольні зразки; Б – непошкоджена балка; БП – пошкоджена балка (табл. 2.1). Перша цифра означає серію балок, Друга цифра – це порядковий номер зразків (1...34). У зразках 2-ї...5-ї серій робоча термічно-зміцнена арматура непошкоджена. Це виконано для того, щоб встановити чи існує ефект зменшення несучої здатності залізобетонних балок 1-ї серії (діаметром 20 мм) з пошкодженою термічно-зміцненою арматурою у порівнянні з еквівалентною площею поперечного перерізу термічно-зміцненої арматури непошкоджених зразків, для встановлення прогнозованої несучої здатності та залишкового ресурсу.

Аналогічно у зразках 6-9 серії робоча термічно-зміцнена арматура пошкоджена до відповідних діаметрів зразків 2-5 серії.



Рис. 7. Загальний вигляд робочої арматури класу А500С

Загальний вигляд армування дослідних зразків наведено на рис. 8.

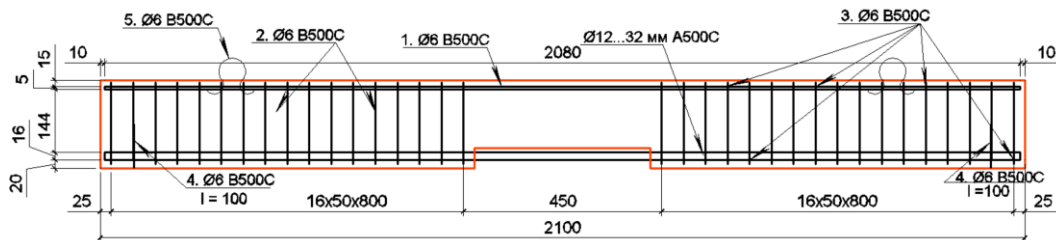


Рис. 8. Загальний вигляд армування дослідних зразків

Для визначення несучої здатності та деформативності залізобетонних балок було проведено їхнє випробування на згин короточасним навантаженням до руйнування. Випробування проводили на спеціальному стенді для випробування згинаних елементів (рис. 9). Навантаження прикладали у вигляді двох зосереджених сил в 1/3 прольоту балок. Проліт балок складав 1900 мм, відповідно відстань від опор до прикладання сил та між прикладеними силами складала 633 мм. Для контролю навантаження було використано кільцеві динамометри, на які були встановлені 2 суб-мікронні комп'ютерні індикатори з безпроводниковим передаванням даних. Для визначення деформацій стиснутого бетону верхньої грані балок використовували 2 суб-мікронних комп'ютерних індикатори (рис. 9 а, б). Для фіксування деформацій робочої розтягнутої термічно-зміцненої арматури було встановлено на розроблені тримачі

механічного типу суб-мікронний комп'ютеризований індикатор. По висоті перерізу було встановлено 5 суб-мікронних комп'ютеризованих індикаторів. Перший індикатор встановлено на відстані 20 мм від верхньої найбільш стиснутої грані бетону, а наступні з кроком 30 мм. Для визначення прогинів було застосовано 3 суб-мікронні індикатори в центральному перерізу та в місцях прикладання сили та 2 суб-мікронні індикатори, які були розміщені на опорах дослідного зразка. Перевагою суб-мікронних комп'ютеризованих індикаторів полягала в тому, що дані деформацій одночасно передавались на персональний комп'ютер (рис. 9 б, рис. 10) через Bluetooth протокол та дозволяли віддалено фіксувати зміну деформацій та навантажень дослідного зразка. Також дані переписувались на персональний комп'ютер автоматично з інтервалом кожні 30 секунд, а на окремих зразках з інтервалом 1 секунда.

Для застосування методики цифрової кореляції зображення з другої сторони балки була проведена спеціальна підготовка (нанесення спеклів на поверхню бетону та арматури) та були виставлені 2 камери "Grasshopper 3" фірми Flir (Канада) з об'єктивом Computar F25/2.8 для застосування методики цифрової кореляції зображення (рис. 9, в).

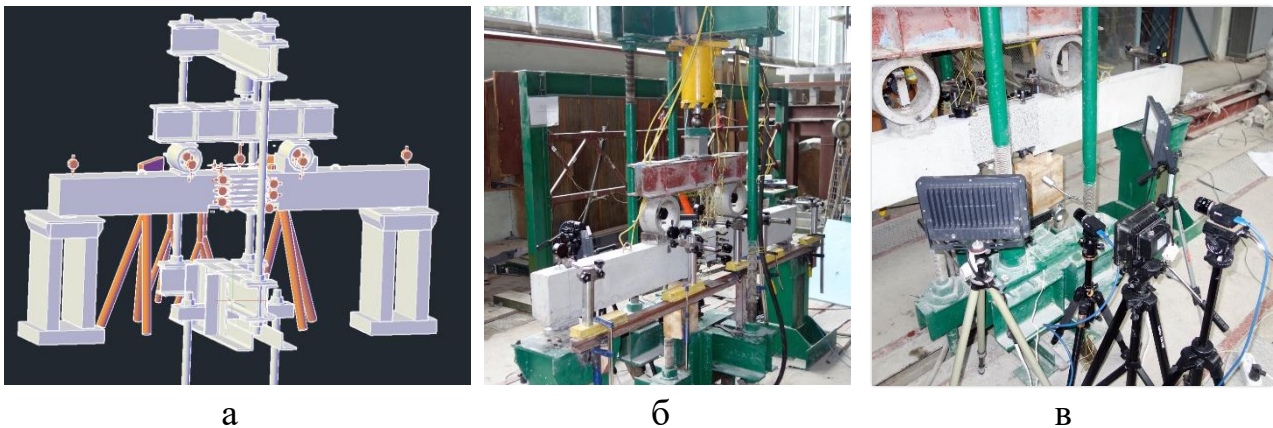


Рис. 9. Загальний вигляд дослідного стенду та розташування приладів на дослідній залізобетонній балці

Загальний вигляд реєстрації зображень та записування деформацій бетону, арматури на ПК за допомогою методики цифрової кореляції зображення та безконтактних суб-мікронних індикаторів наведено на рис. 10.

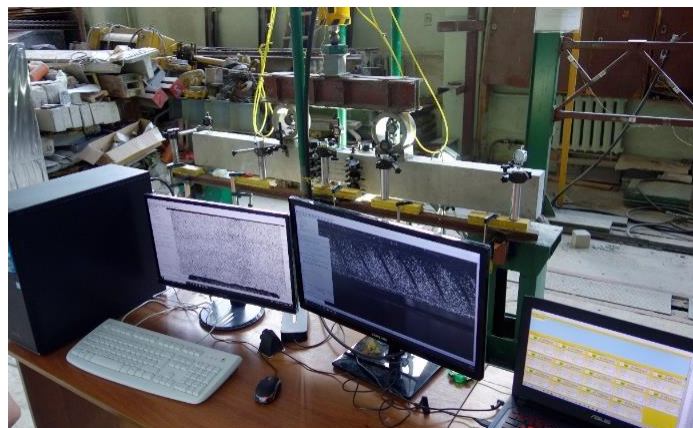


Рис. 10. Загальний вигляд розташування камер для реєстрації зображення

Необхідно зауважити, що всі значення деформацій бетону, арматури та прогинів з використанням суб-мікронних індикаторів так і за допомогою цифрової кореляції зображення записувались в автоматичному безконтактному віддаленому режимі на персональні комп'ютери.

У **четвертому розділі** подано результати експериментальних досліджень бетону та арматури дослідних залізобетонних балок. Згідно з прийнятою методикою, бетонні кубики та призми випробували на гідравлічному пресі ПГ-250. При випробуванні бетонних призм деформації бетону вимірювались за допомогою за методом цифрової кореляції зображень та паралельно суб-мікронним індикатором. За результатами випробувань кубикова міцність складала 48.2 МПа, а призмova міцність – 39.5 МПа.

Результати відносних деформацій при випробуванні бетонної призми на стиск на етапі навантаження 35.6 МПа та 38.7 МПа наведені на рис. 11.

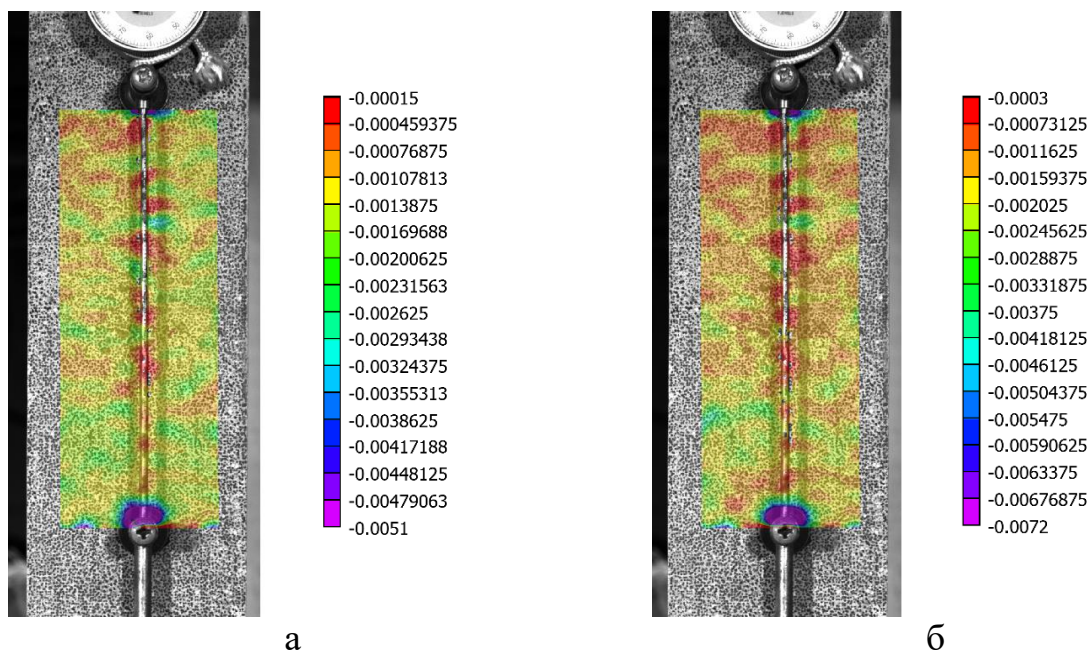


Рис. 11. Розподіл вертикальних напружень зразка. а – при напруженні 35.6 МПа, б – при напруженні 38.7 МПа

Метод цифрової кореляції дозволяє отримати відносні деформації всієї поверхні зразка на всіх етапах навантаження включно до руйнування.

При аналізі поперечних деформацій призми можливо виявити появу внутрішньої тріщини зразка до її виникнення назовні. Це дозволяє виявлення тріщин в момент, коли візуально тріщини ще не можливо зафіксувати (рис. 12).

Руйнування призм відбулось раптово з поширенням внутрішньої тріщини назовні зразка, що є характерним для таких класів бетону. Завдяки використанню високошвидкісної камери та фотофіксацією кожних 250 мс вдалось зафіксувати момент руйнування зразка (рис. 12, г).

Повна діаграма “напруження-деформації” зразка бетону з низхідною віткою наведений на рис. 13, а зміна коефіцієнта Пуассона бетону в залежності від навантаження на рис. 14.

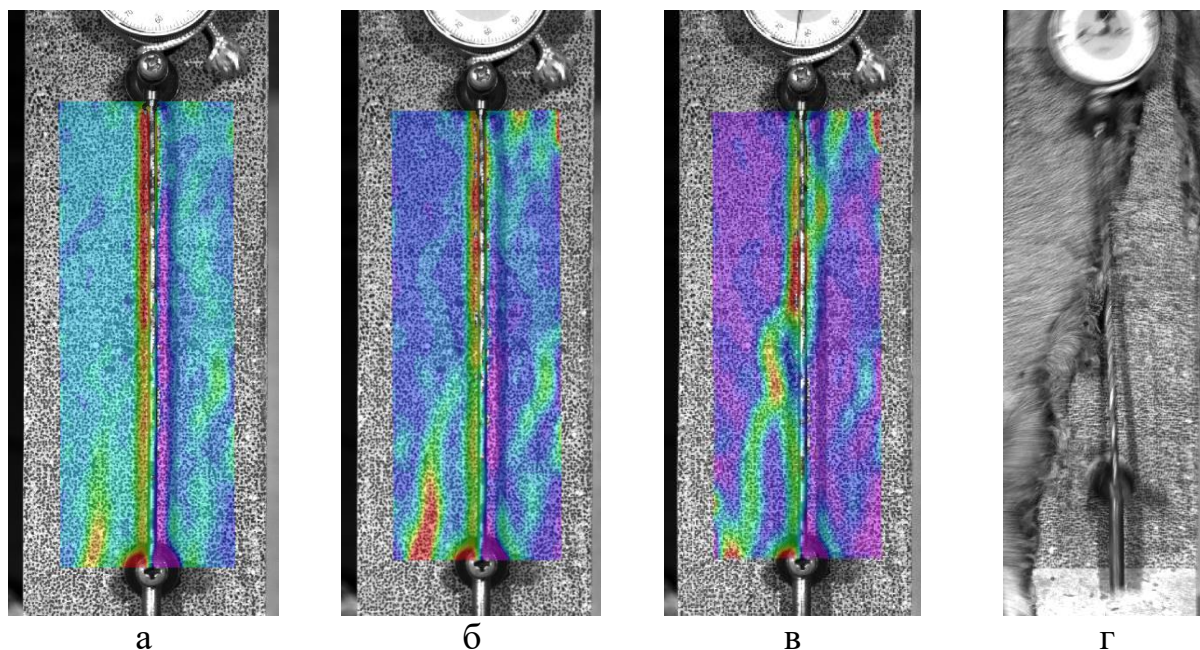


Рис. 12. Характер утворення тріщин, отриманих за методом кореляції цифрового зображення. а – при напруженні 36.5 МПа, б – при напруженні 37.0 МПа, в – при напруженні 38 МПа, г – в момент руйнування

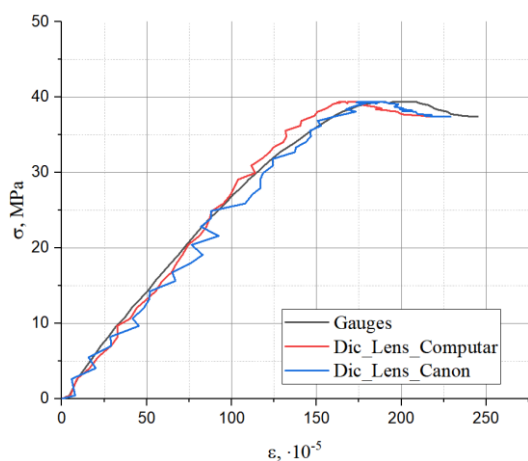


Рис. 13. Повна діаграма «напруження-деформація зразка бетону з низхідною віткоюю

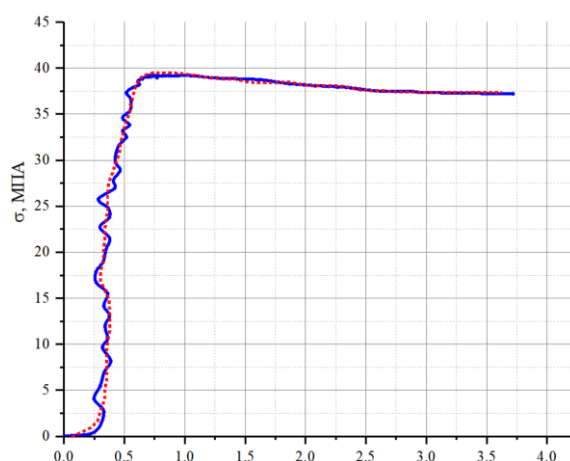


Рис. 14. Графік зміни коефіцієнта Пуассона в залежності від навантаження

Відхилення значень відносних деформацій отриманих за суб-мікронним індикатором та за методикою цифрової кореляції зображень до напруження 39.4 МПа складала в межах 10–11 %, а при максимальному напруженні 39.5 МПа до 15 %. В результаті за запропонованими методиками отримано повну діаграму руйнування бетону без використання спеціально пристосованих стендів. При тому, що значення за приладом (gauges, рис. 13) та значення отриманими при цифровій кореляції зображень (DIC_Lense_Canon та DIC_Lense_Computar, рис. 13) задовільно узгоджуються, а характер діаграми задовільно відповідає значенням в нормативних документах.

Результати випробувань мікротвердості арматури класом А500С діаметрами від 12 до 32 мм наведені на рис. 15.

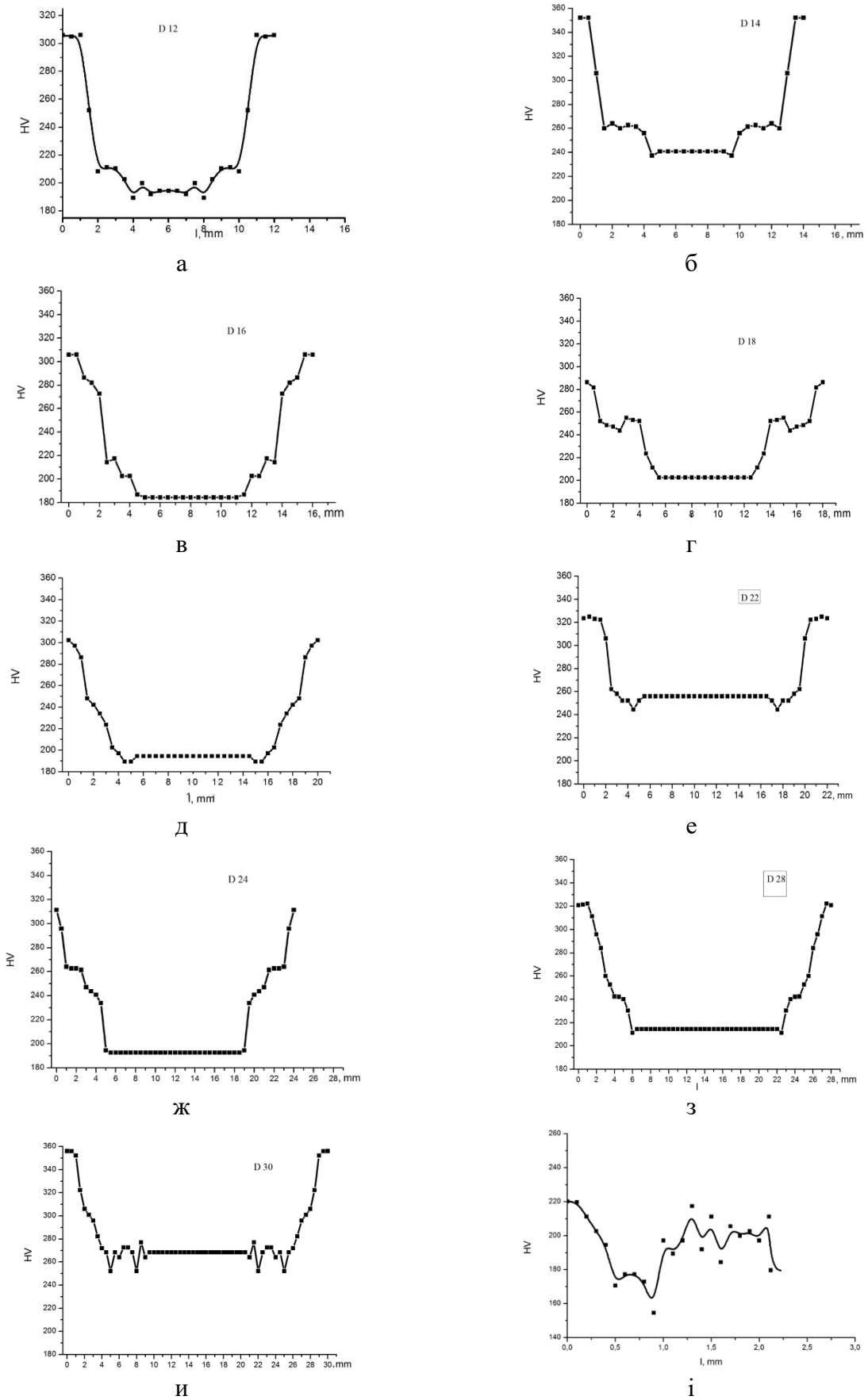


Рис. 15. Розподіл мікротвердості в термо-зміцненій арматурі класу А500С діаметрам 12 (а), 14 (б), 16 (в), 18 (г), 20 (д), 22 (е), 25 (ж), 28 (з) 32 (и) мм та в зоні зварювання у арматурі діаметром 20 мм (і)

Експериментальними випробуваннями мікротвердості встановлено, що для арматури класу А500С діаметрами від 12 до 16 мм термічно-зміцнений шар становить 2 мм, а мікротвердість падає від 310...350 НV до 180...200 НV. У арматур класу А500С діаметрами від 18 до 32 мм зміцнений шар складає 4 мм, а мікротвердість падає від 300...360 НV до 210...260 НV. Дослідження мікротвердості по лінії В-В (у місці зварювання, рис. 4) показують результати замірів мікротвердості у цій зоні вона є змінною від 220 НV до 160, що майже у два рази менша ніж у поверхневому шарі термо-зміцненої арматури. Тобто мікротвердість в зоні зварного з'єднання є аналогічною як в середній частині термо-зміцненої арматури, що відповідає структурі перліту. Можна однозначно заключити, що в процесі приварювання до термо-зміцненої арматури поперечних стрижнів в локальній зоні відбувається знеміцнення. Результати випробування арматурних стержнів діаметром 20 мм з обточуванням середньої зовнішньої частини арматури довжиною 100 мм до діаметрів: 19; 18; 17; 16; 15; 14; 13; 12; 11; 10 мм наведено в табл. 2. Величину істинних напружень S_i розраховали за формулою $S_i = P_i/F_i$, де F_i – істинна площа поперечного перерізу в місці визначення істинних деформацій e .

Таблиця 2

**Результати експериментальних випробувань зразків арматури
діаметром 20 мм класу А500С**

Ø _{ef} , мм	σ _{0,2i} , МПа, для зразка					σ _{u,i} , МПа, для зразка					S	e _y	k _μ
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
20	581.0	585.0	578.0	591.0	590.0	717.0	720.0	721.0	714.0	725.0	1370	0,89	0.30
19	549.0	552.0	547.0	558.0	556.0	660.0	664.0	667.0	663.0	670.0	1360	0,91	0.35
18	557.0	562.0	554.0	558.0	562.0	668.0	672.0	673.0	671.0	673.0	1328	0,93	0.37
17	554.0	557.0	548.0	552.0	561.0	662.0	663.0	670.0	665.0	667.0	1296	0.97	0.41
16	561.0	567.0	559.0	562.0	565.0	634.0	638.0	643.0	647.0	645.0	1285	1.08	0.42
15	490.0	491.0	485.0	490.0	497.0	619.0	620.0	624.0	626.0	623.0	1210	1.12	0.44
14	477.0	481.0	472.0	474.0	483.0	603.0	610.0	612.0	613.0	615.0	1180	1.18	0.47
13	466.0	469.0	461.0	471.0	472.0	592.0	598.0	601.0	602.0	602.0	1090	1.21	0.48
12	448.0	450.0	444.0	449.0	453.0	584.0	587.0	591.0	593.0	592.0	1022	1.34	0.48
11	442.0	448.0	442.0	450.0	450.0	571.0	574.0	577.0	578.0	576.0	981	1.37	0.48
10	439.0	440.0	439.0	437.0	443.0	560.0	561.0	564.0	565.0	567.0	975	1.41	0.48

За результатами, отриманими при випробуванні зразків встановлено, що найвищим опором до руйнування, тобто величина істинних напружень S_i , є найбільшою у непошкодженій термо-зміцненої сталі А500С. Разом з тим величина істинної деформації e для цієї сталі є найменшою. Найменші істинні напруження S спостерігаються для серцевини при найбільшій істинній деформації. За отриманими результатами можна простежити зміну та співвідношення між напруженнями і деформаціями за класичним і локальним підходами. Зокрема істинні напруження S_i і границя міцності σ_u для термо-

зміцненої арматури становить 1.95. Для серцевини арматури $\varnothing 10$ мм це співвідношення становить 1.5. Відношення істинної деформації за локальним та класичним підходами становить 2.88 для термо-зміцненої арматури і 2.5 для серцевини. Коефіцієнт Пуассона k_u тобто відношення поперечної істинної деформації ε_x до поздовжньої ε_y для термо-зміцненої арматури становить 0.3, а для серцевини це відношення рівне 0.48. Таким чином за результатами досліджень можна вважати, що характеристики, які визначені за локальним підходом дають більш точну оцінку при встановленні напружено-деформованого стану в елементах конструкцій при їх проектуванні, а також точніше можуть оцінити матеріал після тривалої експлуатації, оскільки вони є чутливі до виникнення пошкоджень.

Результати випробування робочої арматури діаметрам 12, 14, 16, 18, 22, 25 та 32 мм наведено в табл. 3. Обточування виконувалось відповідно до значень мікротвердості та програми дослідження залізобетонних балок.

Таблиця 3

Результати експериментальних випробувань зразків арматури діаметром 12, 14, 16, 18, 22, 25 та 32 мм класу А500С

Початковий діаметр, мм	Фактичний діаметр після обточування зовнішнього шару, \varnothing_{ef} , мм	Результати експериментальних випробувань							
		$\sigma_{0.2i}$, МПа, для зразка			$\bar{\sigma}_{0.2i}$, МПа для структурного шару	$\sigma_{u,i}$, МПа, для зразка			$\bar{\sigma}_{u,i}$, МПа для структурного шару
		1	2	3		1	2	3	
12	12	555.0	548.0	559.0	554.0	719.0	715.0	722.0	718.7
	8	440.0	445.0	442.0	442.3	559.0	561.0	557.0	559.0
14	14	570.0	575.0	571.0	572.0	721.0	718.0	720.0	719.7
	8	443.0	440.0	443.0	442.2	575.0	572.0	576.0	574.3
16	16	581.0	586.0	587.0	584.0	723.0	720.0	719.0	720.7
	8	449.0	443.0	451.0	447.7	578.0	573.0	570.0	570.0
18	18	567.0	565.0	560.0	564.0	720.0	718.0	721.0	719.7
	8	445.0	440.0	444.0	443.0	569.0	567.0	568.0	568.0
22	22	586.0	591.0	587.0	588.0	721.0	719.0	720.0	720.0
	12	446.0	448.0	450.0	448.0	567.0	561.0	559.0	562.3
25	25	595.0	590.0	591.0	592.0	720.0	717.0	719.0	718.7
	20	530.0	532.4	533.9	532.1	611.0	605.0	600.0	605.3
28	28	590.0	585.0	587.0	587.3	720.0	719.0	721.0	720.0
	20	511.0	512.0	507.0	510.0	627.0	625.0	625.0	625.7
32	32	600.0	598.4	596.0	598.0	723.0	721.0	724.0	722.7
	20	438.0	441.0	439.0	439.3	564.0	562.0	569.0	565.0

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних випробувань залізобетонних балок з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури.

Метод цифрової кореляції зображення дозволяє в реальному часі прослідкувати зміну відносних деформацій по висоті перерізу балки, зокрема в зоні чистого згину, та отримати діаграми в будь-якій момент випробування зразків (рис. 16). Також метод цифрової кореляції зображення дає змогу визначити деформації як на базі так і в будь-якій точці зразка. Оскільки метод цифрової кореляції зображення дозволяє отримати відносні деформації на всій площині зразка, це дає змогу визначати локальні максимальні деформації розтягу, що в свою чергу дозволяє вловити початок тріщиноутворення, коли візуально неможливо зафіксувати тріщини (рис. 16).

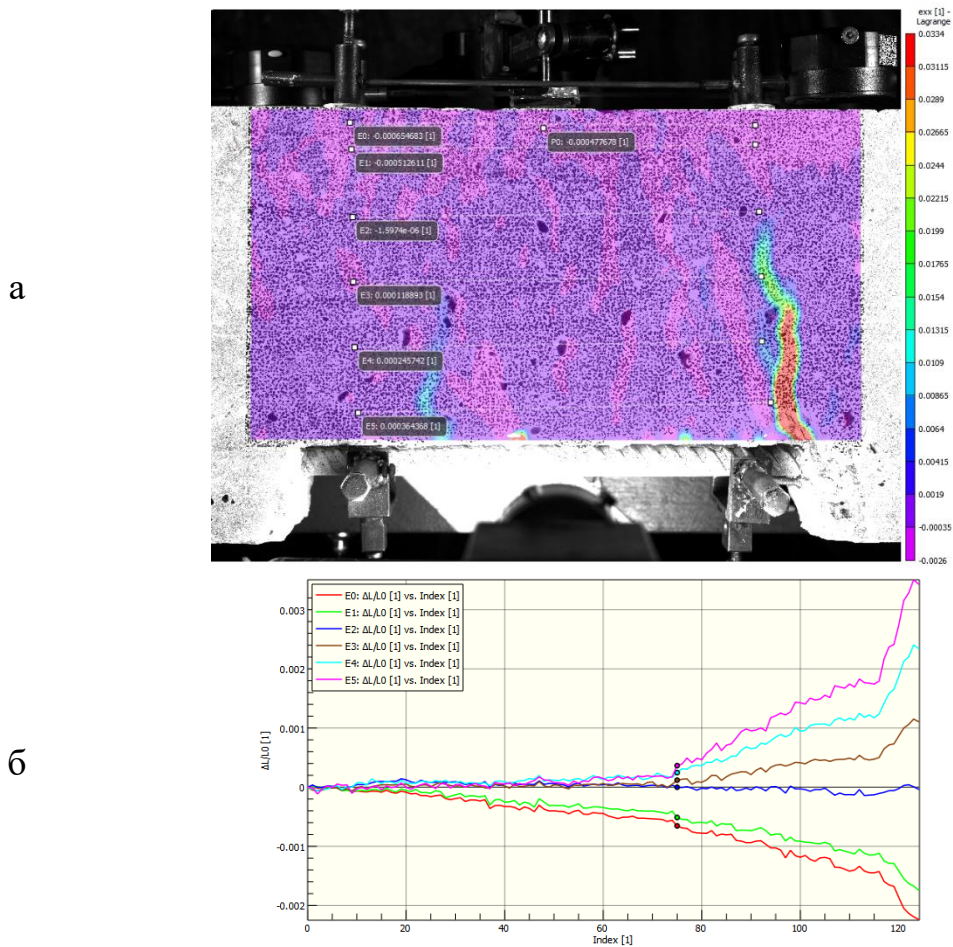


Рис. 16. Розподіл відносних деформацій на етапі навантаження 10.86 кНм (67.75% від руйнівного): а – на площині по висоті зразка; б – графік деформацій по висоті перерізу

На рис. 16 (а) видно зліва знизу початок розкриття тріщини та розподіл відносних деформацій по висоті перерізу балки (рис. 16 б).

У балці БП-1.5 робоча арматура була зовнішньо обточена від діаметра 20 до 16 мм. Для залізобетонних балок з пошкодженою робочою арматурою характерним було руйнуванням в центрі перерізу зразка. На рис. 17 (а) видно збільшення концентрацій напружень посередині зверху та руйнування відповідно в даній ділянці зразка рис. 17 (б).

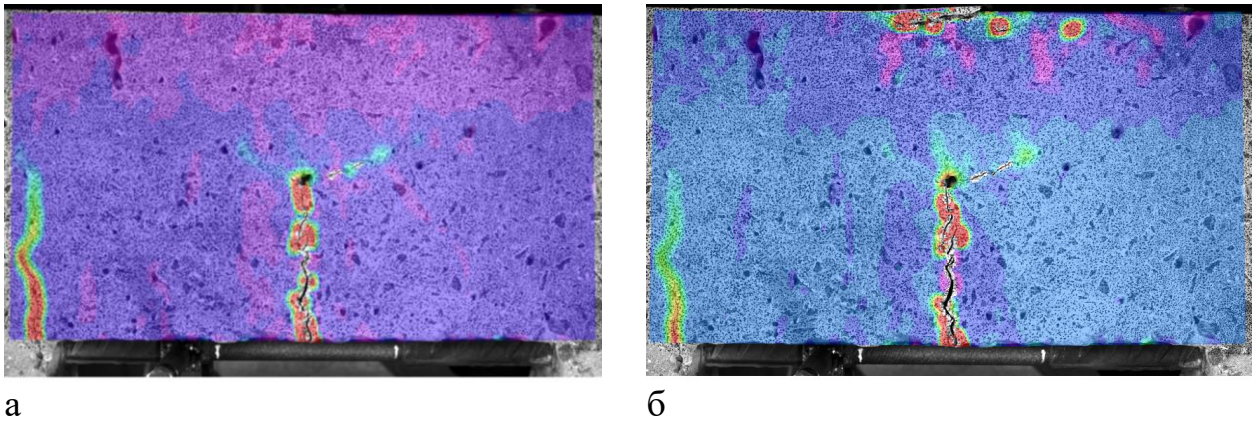


Рис. 17. Розподіл горизонтальних відносних деформацій на прикладі залізобетонною балки БП-1.5: а – при моменті 12.3 кНм (90% від руйнівного) б – в момент руйнування

Отже, метод цифрової кореляції дозволяє в безконтактному режимі визначити деформації на всій площині зразка, включно з тріщиноутворенням. Також метод цифрової кореляції дозволяє оцінити концентратори напружень в залізобетонних балках та місця руйнування зразків.

У всіх експериментальних залізобетонних балках вичерпання несучої здатності відбулось внаслідок досягненні бетону найбільш стиснутої фібри граничних значень $\epsilon_{cu1}=263 \cdot 10^{-5}$, як для бетону класу С40/50, згідно діючих нормативних документів. Граничних значень ϵ_{ud} та розриву робочої арматури не спостерігалось. У всіх зразках фіксувались деформації розтягнутої робочої арматури та бетону найбільш стиснутої фібри за методом цифрової кореляції зображення та з використанням безконтактних суб-мікронних індикаторів. За результатами досліджень були побудовані графіки «момент-деформації робочої арматури» (рис. 18), «момент деформації бетону найбільш стиснутої фібри» (рис. 19) та «момент-прогин» (рис. 20).

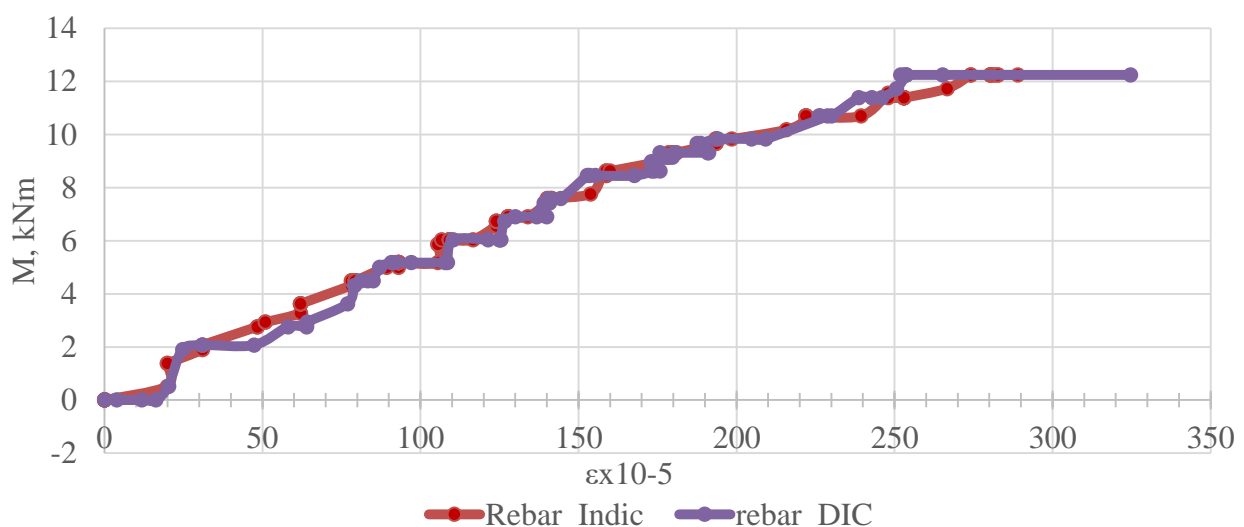


Рис. 18. Графік «момент-деформації робочої арматури»: Rebar_Indic – за суб-мікронними індикаторам, Rebar_DIC – за кореляцією цифрового зображення (на прикладі балки БП-1.5)

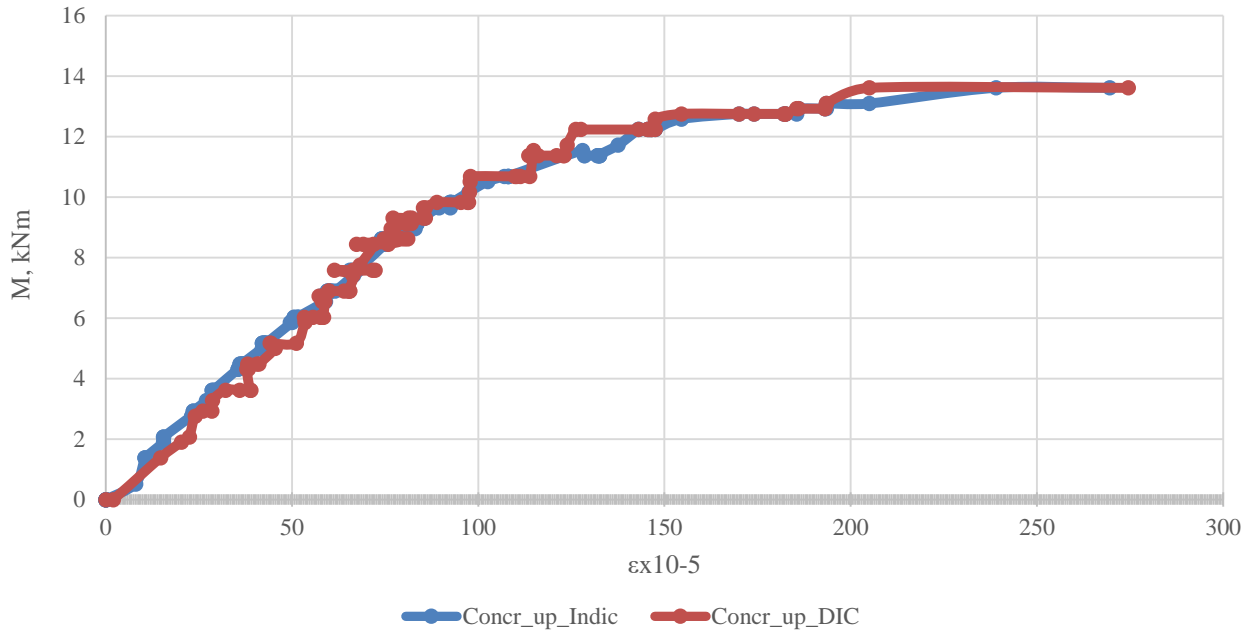


Рис. 19. Графік «момент-деформації найбільш стиснутої фібри бетону» для балок БП-1.5 та БП-1.6: Concr_Indic – за суб-мікронними індикаторам, Concr_DIC – за кореляцією цифрового зображення (на прикладі балки БП-1.5)

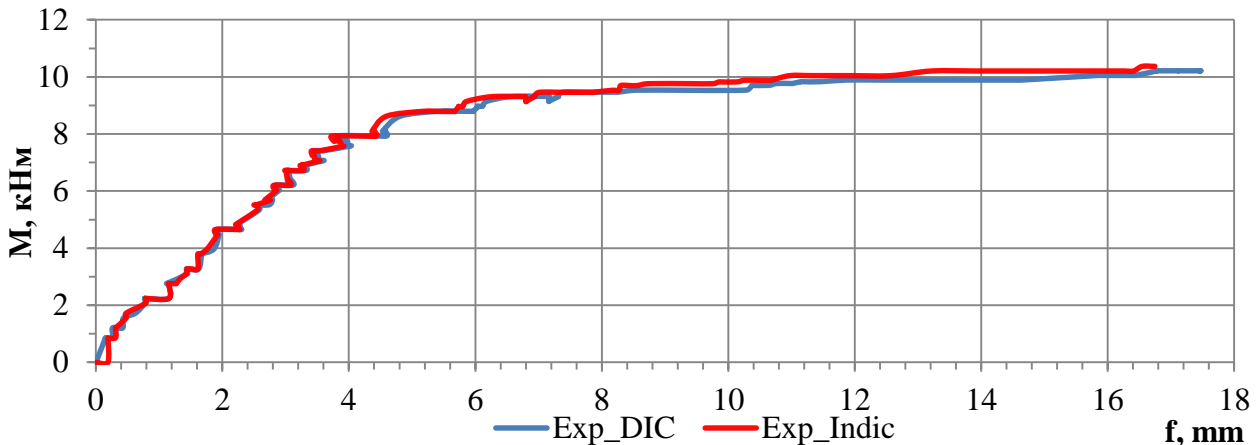


Рис. 20. Графік «момент-прогини» для балок БП-1.5 та БП-1.6: Exp_Indic – за суб-мікронними індикаторам, Exp_DIC – за кореляцією цифрового зображення (на прикладі балки БП-1.7)

Експериментальні результати випробувань залізобетонних балок наведено в табл. 4, 5, 6.. При обточуванні зовнішнього діаметра арматури від 20 до 18, 16, 14, 12 мм зменшується несуча здатність залізобетонних балок на 34%, 43%, 63%, 72%, а у зразках з непошкодженою арматурою 18, 16, 14, 12 мм – 16.5%, 33%, 39%, 57%. У залізобетонних зразках з зовнішньо обточеною робочою арматурою від діаметра 32, 28, 25 мм до діаметра 20 мм зменшується несуча здатність на 14...31%.

В результаті експериментальних випробувань встановлено, що зменшення несучої здатності зразків з пошкодженою термічно-зміцненою арматурою відбувається не тільки внаслідок зменшення геометричних розмірів, а й внаслідок зменшення міцнісних характеристик арматури.

Несуча здатність експериментальних зразків 1-ї серії

Маркування	Вихідний діаметр зразка, мм	Діаметр після пошкодження, мм	За значеннями суб-мікронних індикаторів безпровідникового типу		За методикою цифрової кореляції зображення		Усереднені значення		Відхилення моменту при досягненні текучості відносно зразків КБ-1.1 та КБ-1.2, %	Відхилення моменту при вичерпанні несучої здатності відносно зразків КБ-1.1 та КБ-1.2, %
			Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНМ	Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНМ	Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНМ		
КБ-1.1	20	-	21.42	22.90	21.18	21.36	21.30	22.13	-	-
КБ-1.2		-								
БП-1.3		18	14.73	18.11	13.96	18.27	14.35	18.19	34.09	14.47
БП-1.4		18								
БП-1.5		16	12.24	13.62	12.14	13.62	12.19	13.62	42.68	36.24
БП-1.6		16								
БП-1.7		14	7.56	10.86	7.92	10.34	7.74	10.60	62.61	51.59
БП-1.8		14								
БП-1.9		12	5.52	7.79	5.86	7.94	5.69	7.87	72.33	62.83
БП-1.10		12								

Примітка: Подано усереднені дані для 2-х зразків близнюків

Несуча здатність експериментальних зразків 2-ї, 3-ї, 4-ї та 5-ї серії

Маркування	Діаметр робочої арматури, мм	За значеннями суб- мікронних індикаторів безпровідникового типу		За методикою цифрової кореляції зображення		Усереднені значення		Відхилення моменту при досягненні текучості відносно зразків КБ-1.1 та КБ-1.2, %	Відхилення моменту при вичерпанні несучої здатності відносно зразків КБ-1.1 та КБ-1.2, %
		Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНМ	Момент при текучості робочої арматури, кНМ	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНМ	Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНМ		
КБ-1.1	20	21.42	22.90	21.18	21.36	21.30	22.13	-	-
КБ-1.2	20								
Б-5.17	18	16.20	18.88	17.69	18.69	16.95	18.79	16.48	12.50
Б-5.18	18								
Б-4.15	16	13.62	14.82	14.14	14.65	13.88	14.74	33.24	31.41
Б-4.16	16								
Б-3.13	14	12.44	13.84	12.93	13.84	12.69	13.84	38.95	35.21
Б-3.14	14								
Б-2.11	12	9.14	9.83	9.14	9.83	9.14	9.83	56.85	53.98
Б-2.12	12								

Примітка: Подано усереднені дані для 2-х зразків близнюків

Несуча здатність експериментальних зразків 6-ї, 7-ї, 8-ї та 9-ї серії

Маркування	Вихідний діаметр зразка, мм	Діаметр після пошкодження, мм	За значеннями субмікронних індикаторів безпровідникового типу		За методом цифрової кореляції зображення		Усереднені значення		Відхилення моменту при досягненні текучості відносно зразків КБ-1.1 та КБ-1.2, %	Відхилення моменту при вичерпанні несучої здатності відносно зразків КБ-1.1 та КБ-1.2, %
			Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНм	Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНм	Момент при текучості робочої арматури, кНм	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНм		
КБ-1.1	20	-	21.42	22.90	21.18	21.36	21.30	22.13	-	-
КБ-1.2										
Б-6.19	22	-	25.34	26.75	25.30	26.68	25.32	26.72	-19.45	-24.91
Б-6.20										
БП-6.21	22	16	13.62	14.66	13.76	14.66	13.69	14.66	35.03	31.37
БП-6.22										
Б-7.23	25	-	-	25.92	-	25.63	-	25.78	-	-19.99
Б-7.24										
БП-7.25	25	20	13.85	14.85	14.17	14.77	14.01	14.81	33.10	30.85
БП-7.26										
Б-8.27	28	-	-	26.38	-	26.29	-	26.34	-	-23.08
Б-8.28										
БП-8.29	28	20	13.97	16.43	15.24	16.60	14.61	16.52	28.05	22.28
БП-8.30										
Б-9.31	32	-	-	29.48	-	29.48	-	29.48	-	-38.01
Б-9.32										
БП-9.33	32	20	17.07	18.67	16.57	18.38	16.82	18.53	21.77	13.95
БП-9.34										

Примітка: Подано усереднені дані для 2-х зразків близнюків

У шостому розділі запропоновано методику розрахунку залізобетонних балок з пошкодженням робочої розтягнутої арматури на базі деформаційної моделі (діючих норм). Особливістю даної роботи є врахування міцнісних властивостей термічно-зміцненої арматури. Прийнято, що в результаті структурних перетворень в сталі протягом гартування в термічно-зміцненій арматурі характеристична міцність змінюється вздовж перерізу за нелінійним законом.

Неоднорідні характеристики термічно-зміцненої арматури спрощено змодельовано шляхом вирізнення 3-х зон арматурного стержня з різними характеристиками. Ці зони виділено на основі попередньо-проведених експериментальних випробувань термічно-зміцненої арматури $\varnothing 20$ мм А500С.

Визначено, що термічно-зміцнений шар складає 2.7 мм від поверхні стержня і межа текучості для нього складає 650 МПа. Для внутрішнього шару (так званої «серцевини»), в якій температурні модифікації є незначними, визначено $\varnothing=13$ мм і межу текучості на рівні 440 МПа.

При моделюванні розглянуто модель рівномірного поширення корозійних пошкоджень. При цьому, навантаження на арматурний стержень прикладається у формі певної зосередженої сили в центрі ваги перерізу. Фактична залишкова площа арматурного стержня на певному етапі корозії:

$$S_{fact}^i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = \pi \cdot r_i^2 = \pi(r_{init} - x_i)^2, \quad (1)$$

де $r_{init} = \frac{d_{init}}{2} = 10$ мм -вихідний радіус арматурного стержня до появи корозійних пошкоджень, r_i -фактичне його значення на певному етапі корозії, $d_i = 2r_i$ -фактичний залишковий діаметр арматурного стержня, який визначається через глибину поширення пошкоджень x_i .

Характеристична міцність арматурної сталі в цьому випадку може бути визначена таким чином:

$$f_{yk}(x) = \sigma_{0,2_aver}(x) = \frac{\sum \sigma_{0,2}^i \cdot S_{fact_i}(x)}{\sum S_{fact_i}(x)}, \quad (2)$$

де $\sigma_{0,2}^i$ -межа текучості для певного шару, $S_{fact_i}(x)$ -фактична площа поперечного перерізу певного шару, з урахуванням її зменшення при корозійних впливах, $\sigma_{0,2_aver}(x)$ - усереднене значення межі текучості.

Таким чином, характеристичну міцність арматури прийнято у вигляді функціональної залежності виду:

$$f(x) = a_1 \cdot x^6 + a_2 \cdot x^5 + a_3 \cdot x^4 + a_4 \cdot x^3 + a_5 \cdot x^2 + a_6 \cdot x^1 + a_7 \cdot x^0, \quad (3)$$

де $a_1 \dots a_7$ - це коефіцієнти поліному, визначені шляхом підбору.

За результатами експериментальних випробувань дослідних зразків було визначено, що частина поперечного перерізу досліджуваних балок є розтягнутою, тому теоретичні розрахунки в роботі проводились за алгоритмом для другої форми рівноваги згідно з ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Використано такі основні формули:

$$\frac{bf_{ck}\varepsilon_{c1}}{\chi^0} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^0}{\varepsilon_{c1}} \right)^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{bf_{ck}(\varepsilon_{c1})^2}{\chi^0{}^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^0}{\varepsilon_{c1}} \right)^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (X_1^0 - Z_{si}) = M_0 \quad (5)$$

де $\varepsilon_{c(1)}^0$ – деформації бетону стиснутої фібри основного перерізу при $M=M_0$;

f_{ck} – призмova міцність бетону на стиск;

χ^0 – кривизна вигнутої осі в основному перерізі при $M=M_0$;

X_1^0 – висота стиснутої зони основного перерізу при $M=M_0$;

M_0 – значення згинального моменту при підсиленні;

b – ширина поперечного перерізу розрахункового елемента;

χ – кривизна вигнутої осі в перерізі;

$\bar{\chi}$ – відносна кривизна; a_k – коефіцієнти полінома;

σ_{si} – напруження в i -тій арматурі;

A_{si} – площа поперечного перерізу i -тої арматури;

z_{si} – відстань i -го стержня арматури до найбільш стиснутої грані перерізу.

При цьому схема розподілу деформацій і напружень по висоті перерізу має вигляд, наведений на рис. 21.

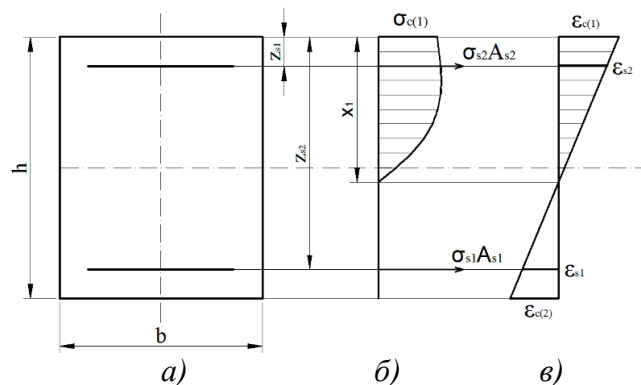


Рис. 21. Розрахунковий переріз згинального елемента прямокутного перерізу.

а) поперечний переріз елемента; б) епюра напружень; в) епюра деформацій

Параметри напружено-деформованого стану визначались методами поступових наближень. Принципова блок-схема, яка відображає алгоритм розрахунку нормального перерізу залізобетонного згинального елемента наведена на рис. 22. В результаті першого етапу розрахунку за деформаційною моделлю були отримані величини відносних деформацій бетону крайніх фібр (верхньої і нижньої), арматури, а також значення кривизни зігнутої осі залізобетонної балки в нормальному перерізі при заданій величині навантаження. На наступному етапі, шляхом порівняння фактичної кривизни із кривизною при рівні навантаження при якому відбувалось пошкодження визначали доцільний алгоритм розрахунку, - як для звичайного непошкодженого елемента, чи як для конструкції з параметрами пошкодження (зменшення проценту армування, зміна фізико-механічних характеристик). Основні залежності прийнято за ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Результати теоретичного розрахунку наведено в табл. 7.

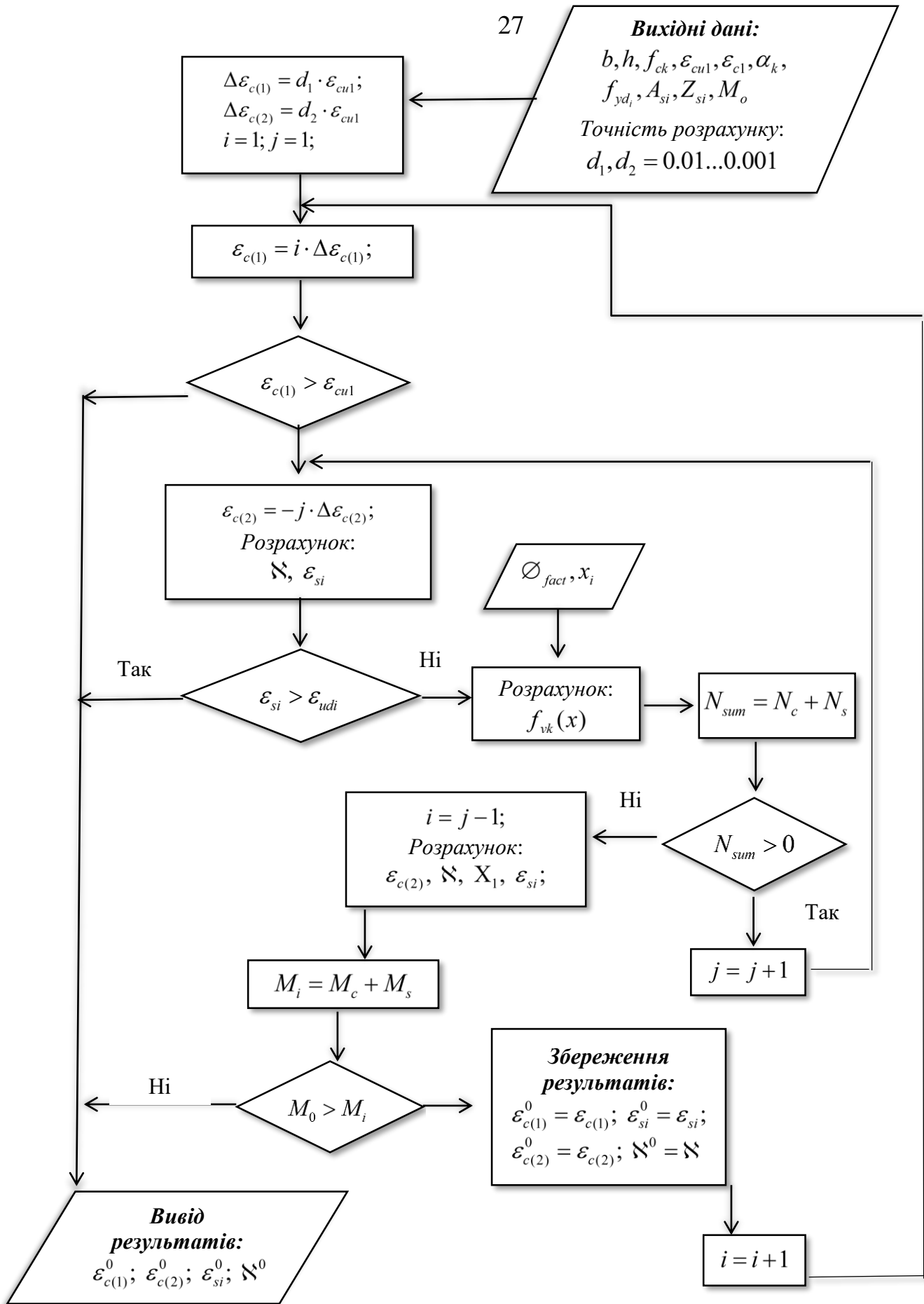


Рис. 22. Блок-схема визначення напружено-деформаційного стану нормального перерізу залізобетонного згинального елемента.

Результати теоретичного розрахунку залізобетонних балок з пошкодженою термічно-зміцненою арматурою

Маркування	Вихідний діаметр зразка, мм	Діаметр після пошкодження, мм	Експериментальний момент при початку текучості арматури, кНм	Теоретичний момент при початку текучості арматури, кНм	Відхилення теоретичного значення від експериментального, %	Експериментальний момент при вичерпанні несучої здатності, кНм	Теоретичний момент при вичерпанні несучої здатності, кНм	Відхилення теоретичного значення від експериментального, %
КБ-1.1; КБ-1.2	20	-	21.30	20.97	-1.55	22.13	20.97	-5.24
БП-1.3; БП-1.4		18	14.35	14.03	-2.23	18.19	14.41	-20.78
БП-1.5; БП-1.6		16	12.19	11.24	-7.79	13.62	11.76	-13.66
БП-1.7; БП-1.8		14	7.74	8.48	9.56	10.60	9.89	-6.70
БП-1.9; БП-1.10		12	5.69	5.02	-11.78	7.87	6.45	-18.04
Б-2.11; Б-2.12	12	-	9.14	8.75	-4.27	9.83	9.81	-0.20
Б-3.13; Б-3.14	14		12.69	11.53	-9.14	13.84	12.19	-11.92
Б-4.15; Б-4.16	16		13.88	12.56	-9.51	14.74	12.56	-14.79
Б-5.17; Б-5.18	18		16.95	15.25	-10.03	18.79	15.39	-18.09
Б-6.19; Б-6.20	22	-	25.32	21.92	-13.43	26.72	22.80	-14.67
БП-6.21; БП-6.22	22	16	13.69	12.44	-9.13	14.66	13.74	-6.28
Б-7.23; Б-7.24	25	-	-	-	-	25.78	21.65	-16.02
БП-7.25; БП-7.26	25	20	14.01	13.47	-3.85	14.81	14.24	-3.85
Б-8.27; Б-8.28	28	-	-	-	-	26.34	26.17	-0.65
БП-8.29; БП-8.30	28	20	14.61	13.24	-9.38	16.52	15.89	-3.81
Б-9.31; Б-9.32	32	-	-	-	-	29.48	29.28	-0.68
БП-9.33; БП-9.34	32	20	16.82	15.88	-5.59	18.53	17.30	-6.64

Примітка: Подано усереднені дані для 2-х зразків близнюків

Аналіз результатів виконаних розрахунків показав, що за запропонованою методика розрахунку відхилення теоретичних даних від експериментальних в межах 2...13% за моментом досягнення початку межі текучості робочої арматури та 1...18% за моментом вичерпання несучої здатності. При цьому теоретичні дані є нижчими від експериментальних, що дозволяє стверджувати про можливість використовувати дані пропозиції при розрахунку залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури.

У **сьомому розділі** результати розрахунку залишкового ресурсу і оцінки надійності для залізобетонних згинаних елементів із пошкодженнями робочої арматури. Розрахункова методика передбачала встановлення якісних показників надійності- індексів надійності (дальності відмови) β та кількісних показників- імовірності безвідмовної роботи $P(\beta)$.

Основні передумови прийняті при розрахунку параметрів надійності:

- приймаємо, що всі параметри несучої здатності і навантаження є стохастичними величинами і є взаємозалежними;
- вважаємо закон розподілу параметрів навантаження і несучої здатності близьким до нормального;
- в межах даної роботи значення навантаження вважаємо детермінованим і враховуємо лише випадкову природу міцнісних показників конструкції.

Згідно з вказівками нормативних документів (додаток Б ДБН В.1.2-14:2018), надійність конструкції можна оцінити, користуючись її кількісною мірою - ймовірністю її відмови:

$$P_f(T_{ef}) = \text{Prob} \{ g(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n) < 0 / T_{ef} \} \quad (6)$$

Вище наведена залежність описує ймовірність реалізації відмови заданого виду протягом визначеного періоду часу експлуатації конструкції T_{ef} .

При цьому, вираз $g(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n)$ визначає робочу здатність конструкції, яка залежить від ряду випадкових параметрів $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n$. Робоча здатність конструкції залежить від законів узагальненої несучої здатності \tilde{R} і зовнішніх впливів \tilde{Q} і може бут визначена за залежністю виду:

$$g(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n) = g(\tilde{Q}, \tilde{R}) = \tilde{R} - \tilde{Q} \quad (7)$$

В цій роботі також будемо оперувати індексом надійності β , який можна визначити за залежністю:

$$\beta = \Phi(z)^{-1} \cdot (1 - P_f) \quad (8)$$

де $\Phi(z)$, -функція нормованого розподілу ймовірності g .

Як зазначено вище, приймаємо для всіх складових несучої здатності нормальний закон розподілу, тому можна застосувати формулу інтеграла ймовірностей наступного вигляду:

$$\Phi(z) = 0,5\pi^{-1} \int_{-\infty}^z \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] \cdot du \quad (9)$$

Алгоритм розрахунку ймовірності безвідмовної роботи наступний.

Як характеристику безпеки розглядаємо індекс надійності, який в визначається за формулою:

$$\beta = \frac{\bar{M}_{ult} - M_{ult}}{\hat{M}_{ult}}, \quad (10)$$

де M_{ult} , –граничний згинальний момент для залізобетонної балки з пошкодженою арматурою за детермінованою моделлю, \bar{M}_{ult} - математичне сподівання граничного згинального моменті, \hat{M}_{ult} -стандарт несучої здатності.

Для визначення стандарту граничного згинального моменту представимо функцію \bar{M}_{ult} у вигляді:

$$\bar{M}_{ult} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11)$$

Тоді:

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{\sum (D_{xi} \hat{x}_i)^2}, \quad (12)$$

де \hat{x}_i -стандарты стохастичних параметрів, D_{xi} -коефіцієнти стандарту, які знаходимо у вигляді часткових похідних функції \bar{M}_{ult} :

$$D_{xi} = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial x_i}, \quad (13)$$

де \bar{x}_i -математичне сподівання стохастичного параметру.

Кількісно оцінка надійності визначається за імовірністю безвідмовної роботи:

$$P(\beta) = 0.5 + f(\beta), \quad (14)$$

де $f(\beta)$ - функція Лапласа вигляду:

$$f(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\beta^2}{2}}. \quad (15)$$

В загальному вигляді алгоритм розрахунку надійності наведений на блок схемі (див. рис. 23).

В цій роботі враховували стохастичну природу таких показників: робочої висоти і ширини балки \tilde{d} , \tilde{b} , міцності арматури розтягнутої і стиснутої зони $\tilde{\sigma}_s$, $\tilde{\sigma}_{sc}$, міцності бетону $\tilde{\sigma}_c$, модуля пружності для бетону \tilde{E}_{ck} , граничних деформацій арматури $\tilde{\varepsilon}_s$.

Випадкове значення несучої здатності визначатиметься за формулою:

$$\tilde{M}_{ult} = \tilde{\sigma}_s \cdot A_{s_fact} \cdot \tilde{d} \cdot (1 - 0.5 \cdot Y) + A_s \cdot \tilde{\sigma}_{sc} \cdot \tilde{d} \cdot (0.5 \cdot Y - a_s), \quad (16)$$

де:

$$Y = \frac{\tilde{x}_1}{\tilde{d}} = \frac{\left(\varepsilon_{cu} - 0.5 \cdot \frac{\tilde{\sigma}_c}{\tilde{E}_{ck}} \right)}{\varepsilon_{cu} + \tilde{\varepsilon}_s}, \quad (17)$$

де \tilde{x}_1 – випадкове значення середньої висоти стиснутої зони перерізу, $\tilde{\varepsilon}_s$ - випадкове значення деформації арматури розтягнутої зони.

Після ряду математичних перетворень отримано формулу для математичного сподівання граничного згинального моменту:

$$\bar{M}_{ult} = \bar{\sigma}_s \cdot A_{s_fact} \cdot \bar{d} \cdot (1 - 0.5 \cdot Y) + A'_s \cdot \bar{\sigma}_{sc} \cdot (0.5 \cdot Y \cdot \bar{d} - a_s'), \quad (18)$$

де \bar{d} - математичне сподівання робочої висоти балки, $\bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_{sc}$, -математичне сподівання міцності арматури розтягнутої і стиснутої зони.

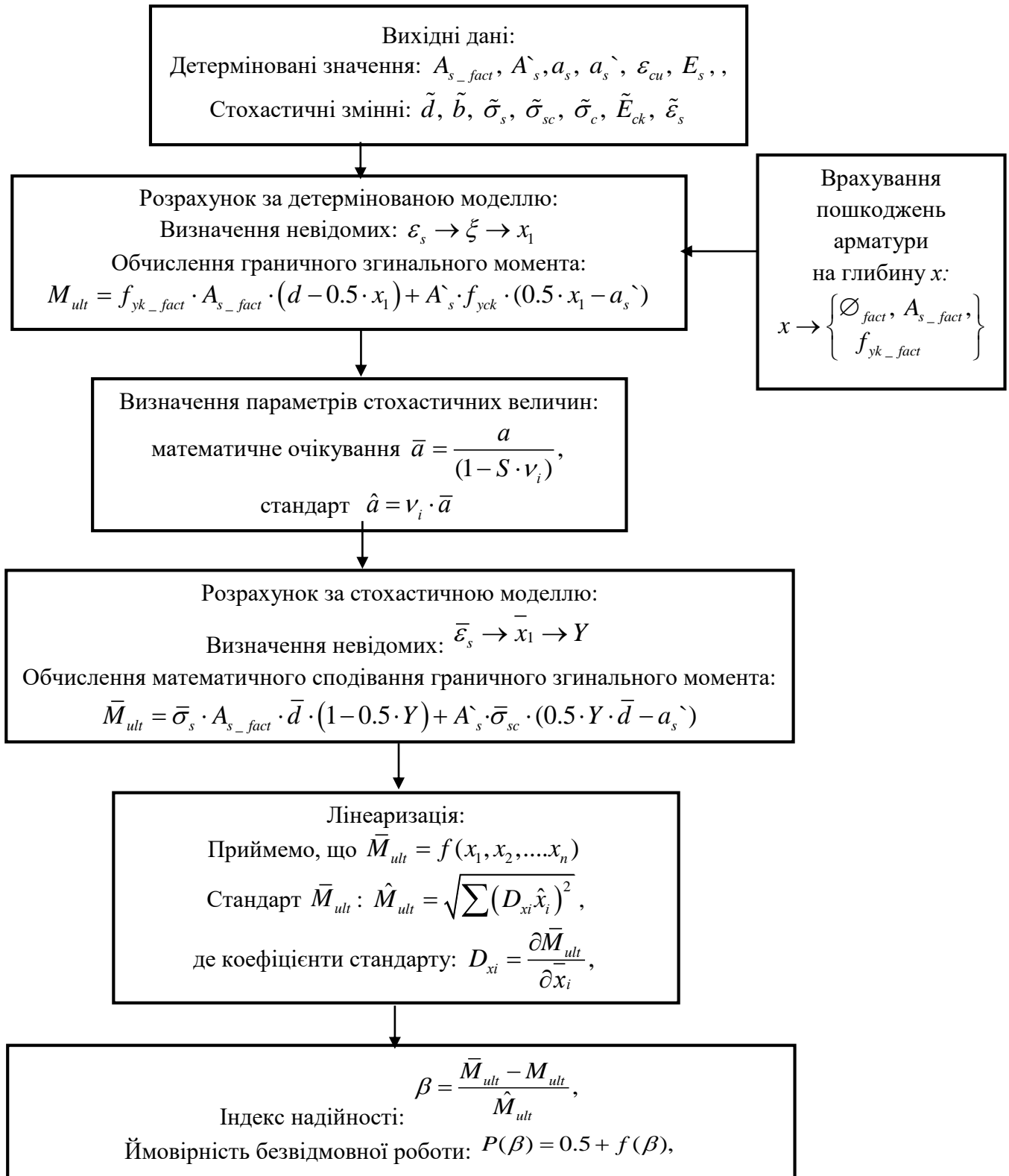


Рис. 23. Блок-схема для розрахунку показників надійності залізобетонних балок з пошкодженою арматурою

В розрахунковій моделі враховано неоднорідні міцнісні показники термічно-зміцненої арматури Ø20A500С, використовуючи залежність:

$$f_{yk}(x) = 0.0015 \cdot x^6 + 0.0067 \cdot x^5 - 0.7877 \cdot x^4 + 8.5647 \cdot x^3 + 183.73 \cdot x^2 - 29.701 \cdot x^1 + 1.2921, \quad (19)$$

де x , - глибина обточування арматури.

В результаті розрахунків було отримано показники надійності залізобетонних балок з пошкодженою термічно-зміцненою арматурою класу А500С з початковим Ø20 мм при сточуванні арматури до діаметрів Ø18, Ø16, Ø14, Ø12 мм. Графічно зміна ймовірності безвідмовної роботи, як кількісного показника надійності представлена на рис. 24 а. Якісну оцінку надійності залізобетонних балок можна здійснити за значеннями індексів надійності (див. рис. 24 б).

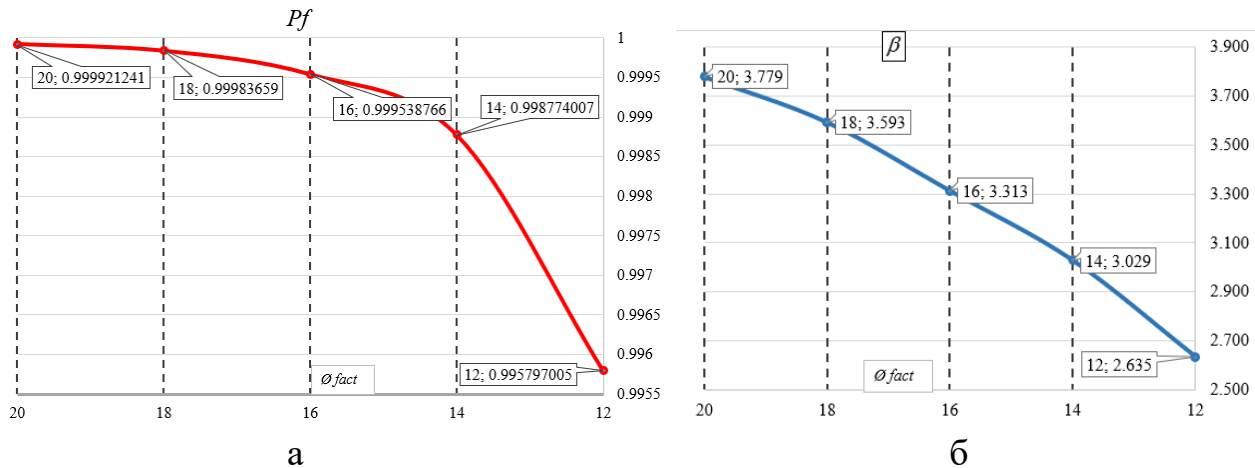


Рис. 24. Ймовірність безвідмовної роботи (а) і індекси надійності (б) для залізобетонних балок при пошкодженні термічно-зміцненої арматури Ø20A500С

Запропоновано методику оцінювання залишкового ресурсу T залізобетонної балки з пошкодженнями робочої арматури, використовуючи формулу:

$$T = \sqrt{\frac{(\beta_d - \beta_{lim})}{(\beta_c - \beta_{lim})}} \cdot T_d^2, \quad (20)$$

де T_d – нормативний термін служби, β_d - дійсний показник характеристики безпеки (індексу надійності), β_c - мінімальне його значення, згідно з нормативними документами, β_{lim} - граничне значення індексу надійності, для визначення якого будемо використовувати формулу:

$$\Phi'(\beta_{lim}) = [\Phi'(\beta_c)]^n, \quad (21)$$

де $n = T_d$ - проектний термін експлуатації, $\Phi'(\beta) = P(\beta)$ - функція Лапласа, яка описує стандартний нормальний розподіл.

Було визначено прогнозовані значення залишкового ресурсу залізобетонних балок з пошкодженою арматурою для різних класів наслідку споруд. Зміни

залишкового ресурсу для різних проектних параметрів конструкцій в залежності від різних показників відображено на рис. 25.

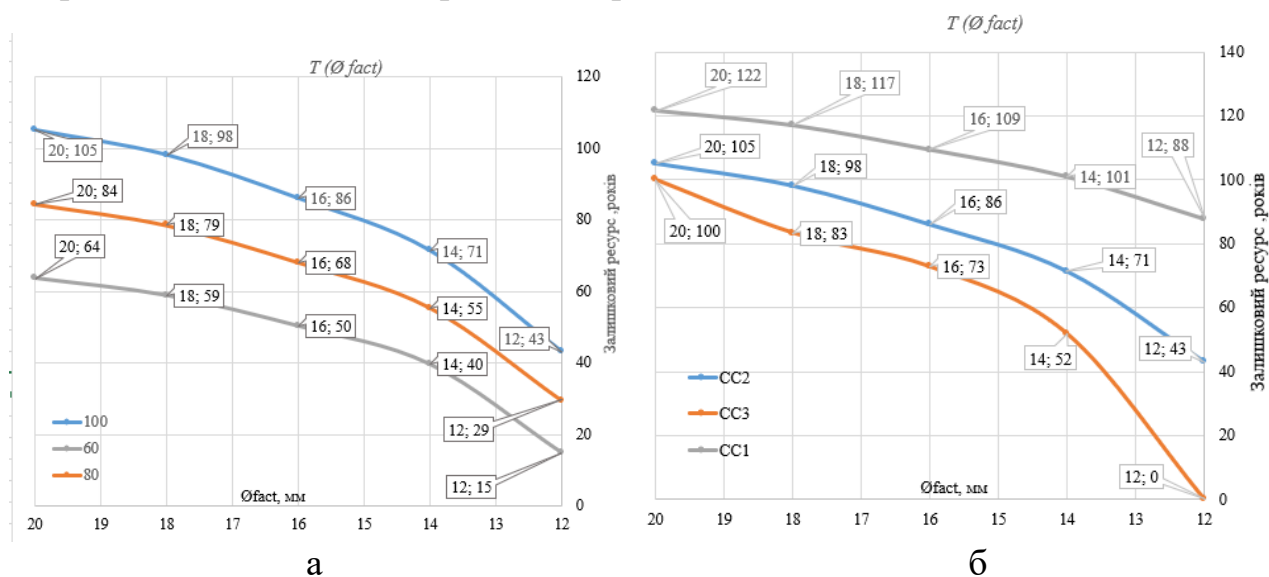


Рис. 25. Зміна залишкового ресурсу залежно від ступеня пошкодження арматури $T(\varnothing_{fact})$ для різних проектних термінів експлуатації (а) і для різних класів відповідальності будівлі (б)

Було встановлено, що пошкодження арматури спричиняє значне зниження залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій, яке коливається в широких межах, залежно від проектного терміну експлуатації і класу наслідків. При цьому зменшення розрахункової площі робочої арматури є найбільш небезпечним для споруд класу СС3. Також було складено рівняння для моделювання зміни значень характеристики безпеки в часі:

$$\beta(t) = \beta_d - \frac{(\beta_c - \beta_{lim}) \cdot t^2}{T_d^2}, \quad (22)$$

Графіки, які ілюструють зміну індексів надійності для залізобетонних балок з пошкодженою робочою арматурою наведено на рис. 26.

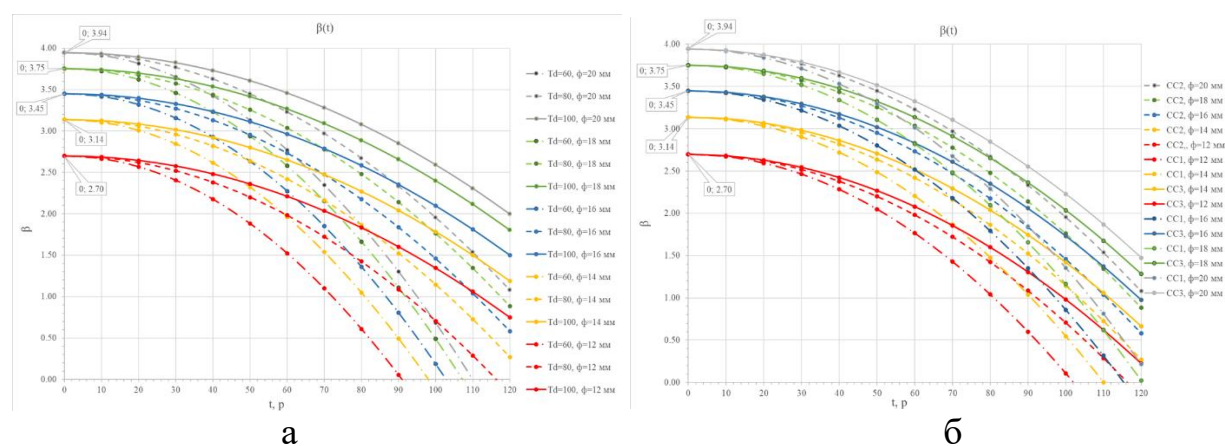


Рис. 26. Зміна індексу надійності $\beta(t)$ при різних ступенях пошкодження робочої арматури для різних проектних термінів експлуатації споруди (а) і для різних класів відповідальності будівлі (б)

Встановлено, що всі графіки для залежності $\beta(t)$ є різко спадними і вказують на вичерпання залишкового ресурсу для всіх балок із пошкодженою арматурою. Найбільш критична ця закономірність при наявності пошкоджень робочого армування на 3 мм і більше. В усіх випадках вищі характеристики безпеки матимуть залізобетонні балки з вищими значеннями проектних індексів надійності. Нижчі залишкові ресурси T отримуються для споруд категорії відповідальності ССЗ. Крім того, при застосуванні вищих проектних термінів експлуатації споруди показники дальності відмови є вищими, що свідчить про збільшення безпеки проекрованої конструкції.

Було виконано також розрахунок залишкового ресурсу залізобетонних згинаних елементів з використанням інженерної методики, наведеної в роботах Голоднова О.І.

Як критерій забезпечення несучої здатності було прийнято співставлення їх з фактичним діючим навантаженням:

$$M_{cr} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)] > M, \quad (23)$$

де M_{cr} – функція несучої здатності елемента, $x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)$ - параметри несучої здатності (розміри поперечного січення, характеристики матеріалів і т. ін.). Величину фактичного навантаження M визначають згідно з фактичними умовами експлуатації об'єкта. Величину навантаження було прийнято на рівні 10%, 30%, 50% і 70% від проектної несучої здатності.

Залишковий ресурс визначали за формулою:

$$t_R = \Delta t \frac{M_{cr} - M}{M_{proj} - M_{cr}}, \quad (24)$$

де M_{cr} – несуча здатність елемента, прийнята при певних показниках армування (при фактичній площі робочої арматури, залежно від ступеня пошкодження), M_{proj} - проектне значення несучої здатності залізобетонної балки з початковими параметрами армування (з непошкодженою арматурою), Δt - база визначення залишкової несучої здатності:

$$\Delta t_i = t_i - t_0, \quad (25)$$

де t_i – час, який відповідає певному рівню пошкоджень арматури, t_0 - час початку експлуатації. Для отримання значень базисних періодів використовували формулу:

$$\Delta t_i = \frac{\delta}{v_{кор}}, \quad (26)$$

де δ –глибина пошкодження арматури відносно початкового, проектного діаметра стержнів, $v_{кор}$ - швидкість корозії при певних умовах експлуатації конструкції.

Результати розрахунків залишкового ресурсу за вище наведеним інженерним алгоритмом представлено в графічному вигляді на рис. 27.

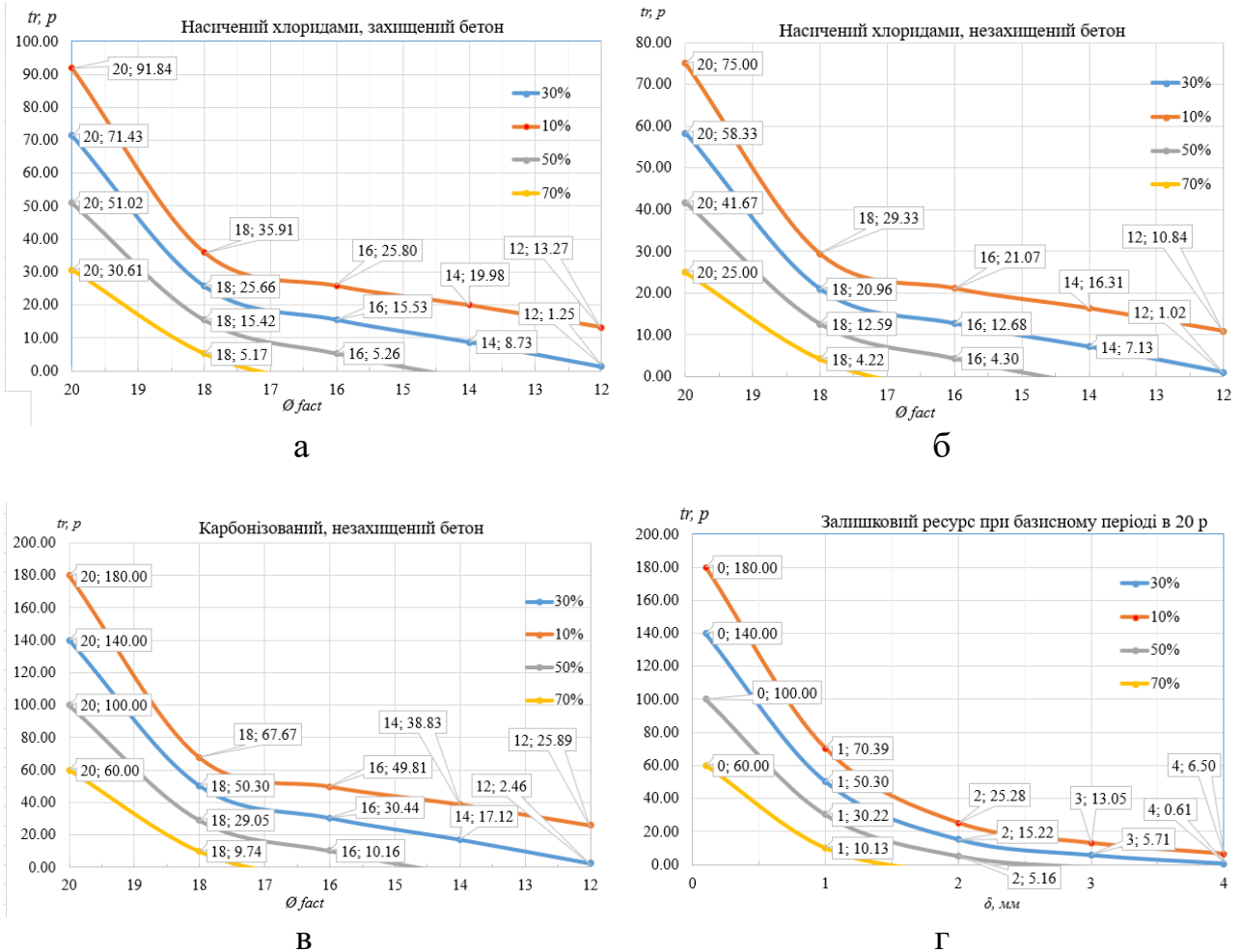


Рис. 27. Зміна залишкового ресурсу $t_R(\varnothing_{fact})$ при різних ступенях пошкодження робочої арматури для різних проектних термінів експлуатації споруди (а) і для різних класів відповідальності будівлі (б); зміна індексу надійності $\beta(t)$ для різного рівня навантаження на конструкцію у випадку захищеного (а) і незахищеного (б) бетону конструкції, що насичений хлоридами, незахищеного карбонізованого бетону конструкції (в); зміна залишкового ресурсу $t_R(\delta)$ для різного рівня навантаження на конструкцію при базисному періоді 20 р (г)

Як можна побачити, графіки $t_R(\delta)$, $t_R(\varnothing_{fact})$ для різних рівнів навантаження є близькими до паралельних. Крім того, найбільш різке зниження залишкового ресурсу можна відзначити для зразків пошкоджених на 1-2 мм, тобто на початкових етапах корозії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему встановлення дійсних фізико-механічних характеристик термічно-зміцненої арматури з врахуванням її механічних, корозійних пошкоджень, а також визначення дійсного напружено-деформованого стану згинальних залізобетонних елементів, які отримали пошкодження розтягнутої робочої

арматури, прогнозування їх залишкового ресурсу. Основні висновки, які відображають результати дисертаційної роботи:

1. Внаслідок довготривалої експлуатації та впливу навколишнього середовища залізобетонні конструкції зазнають пошкоджень. При огляді літературних джерел виявлено, що недостатньо вивчено питання зміни фізико-механічних характеристик найбільш поширеної у залізобетонних конструкціях термічно-зміцненої арматури класу А500С.

2. Розроблено методику та отримано результати експериментальних досліджень визначення мікротвердості арматурних стержнів класу А500С. Встановлено, що у арматури класу А500С спостерігається термічно-зміцнений шар та визначено пошарові анізотропні характеристики матеріалів.

3. Розроблено методику та отримано результати експериментальних досліджень арматури класу А500С діаметром 20 мм зі поступовим зменшенням діаметра з кроком 1 мм до 12 мм. Встановлено зменшення межі текучості в залежності від поступового зменшення площі поперечного перерізу, що підтверджує наявність зміцненого зовнішнього шару.

4. Розроблено та апробовану методику випробування бетонних зразків з використанням методу визначення деформацій за цифровою кореляцією зображення. Побудовану повну діаграму деформування бетону σ - ϵ за допомогою методу цифрової кореляції зображення та встановлено значення коефіцієнта Пуассона на всіх етапах, включно до руйнування зразків.

5. Розроблено програму та методику експериментальних досліджень залізобетонних балок з пошкодженнями термічно-зміцненої робочої арматури з використанням методу цифрової кореляції зображення та безпровідникових суб-мікронних комп'ютеризованих індикаторів, яка дозволяє аналізувати відносні деформації всієї досліджуваної площини залізобетонної балки, а також переміщення окремих точок або ділянок бетонної поверхні.

6. Виконано експериментальні дослідження та встановлено дійсний напружено-деформований стан залізобетонних згинаних елементів з різним відсотком пошкодження робочої термічно-зміцненої арматури класу А500С.

В результаті експериментальних випробувань залізобетонних балок встановлено, що із зменшенням площі робочої арматури діаметром 20 мм класу А500С непошкоджених зразків на 19%, 36%, 51%, 64% момент при досягненні текучості арматури зменшується на 16.5%, 33%, 39%, 57% та для пошкоджених зразків відповідно 34%, 43%, 63%, 72%, а момент вичерпання несучої здатності зменшується для непошкоджених на 12.5%, 31%, 35%, 54% та для пошкоджених на 14.5%, 36%, 52%, 63%.

7. Для зразків з робочою арматурою діаметрами 25, 28 та 32 мм з зовнішнім обточенням до діаметра 20 мм, відносно контрольних зразків з непошкодженою робочою арматурою діаметром 20 мм, момент при досягненні текучості арматури зменшується відповідно на 33%, 28% та 22%, а момент вичерпання несучої здатності зменшується на 31%, 22% та 14%.

8. В результаті випробувань залізобетонних балок з пошкодженням робочої арматури встановлено, що із зменшенням поперечного перерізу робочої арматури класу А500С внаслідок пошкоджень несуча здатність

залізобетонних балок зменшується не тільки за рахунок зменшення площі арматурних стержнів, а за рахунок зменшення характеристик міцності арматури, а спосіб вимірювання деформацій бетону та арматури за допомогою методу кореляції цифрових зображень дає можливість фіксувати зміну деформацій в безконтактному режимі на всіх етапах навантаження включно до руйнування.

9. Запропонована методика визначення залишкової несучої здатності за діючими нормами проєктування залізобетонних згинаних елементів з пошкодженою термічно-зміцненою арматурою, яка передбачає використанням змінної величини міцності арматури $f_{yk}(x)$ в залежності від ступеня та характеру пошкодження термічно-зміцненого зовнішнього шару арматури. Розрахунком встановлено, що, відхилення теоретичних величин від експериментальних за моментом вичерпання несучої здатності складає до 21% в сторону перевищення експериментальних величин.

10. Запропонована методика прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних згинаних конструкцій з робочою термічно-зміцненою арматурою класу А500С в залежності від ступеня та характеру її пошкоджень з використанням інженерного та ймовірнісного підходів. Встановлено, що пошкодження термічно зміцненого армування в залізобетонних балках має значний вплив на характеристики безпеки і викликає стрімкіше зниження залишкового ресурсу для залізобетонних конструкцій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. № 77. С. 29–37. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)
2. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць*. 2019. Вип. 37. С. 316–322. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)
3. Blikharskyu Y. Calculation of damage RC constructions according to deformation model. *Theory and Building Practice*. 2020. Vol. 2, № 2. P. 99–106.
4. Blikharskyu Y., Kopyika N. Influence of steel rebar uniform corrosion on reinforced concrete structures` strength. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. Вип. № 79. С. 34–42. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)
5. Blikharskyu Y., Kopyika N. Digital image correlation method for analysis of reinforced concrete structures. *Вісник Одеської державної академії будівництва*

та архітектури. 2020. Вип. № 78. С. 27–33. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

6. Blikharskyu Y. Experimental results of damaged RC beams. *Theory and Building Practice*. 2021. Vol. 3, № 1. P. 100–105.

7. Бліхарський Я. З. Визначення коефіцієнта Пуассона для бетону з використанням методики цифрової кореляції зображення. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 26–32.

8. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. Порівняльний аналіз підходів до оцінки надійності будівельних конструкцій. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 46–55. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

9. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С., Солодкий С. Й., Іваницька Л. М. Дослідження впливу корозії арматури на напружено-деформований стан залізобетонних елементів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць*. 2021. Вип. 39. С. 38–47. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

10. Zhang C., Molkov Y., Sobko Y., Blikhars'kyi Y., Khmil R. Determination of the mechanical characteristics and specific fracture energy of thermally hardened reinforcement. *Materials Science*. 2015. Vol. 50, iss. 6. P. 824–829. (SCOPUS Q3, Web of Science) (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

11. Khmil R. R. Tytarenko, Y. Blikharskyu, P. Vegera. Development of the procedure for the estimation of reliability of reinforced concrete beams, strengthened by building up the stretched reinforcing bars under load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, No. 7 (95). P. 32–42. (SCOPUS Q3) (сформовано аналіз літературних джерел, проаналізовано існуючі методи оцінки ймовірності безвідмовної роботи)

12. Bobalo T., Blikharskyu Y., Vashkevych R., Volynets M. Bearing capacity of RC beams reinforced with high strength rebars and steel plate. *Matec Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 02003. (SCOPUS) (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

13. Blikhars'kyi Y. Z. Anisotropy of the mechanical properties of thermally hardened A500s reinforcement. *Materials Science*. 2019. Vol. 55, iss. 2. P. 175–180. (SCOPUS Q3, Web of Science)

14. Blikharskyu Yaroslav, Kopiika Nadiia, Volynets Mykhailo, Bobalo Taras. Theoretical analysis of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708, iss. 1. (SCOPUS) (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

15. Bobalo Taras, Blikharskyu Yaroslav, Krainskyi Pavlo, Volynets Myhailo. Computer modelling of RC beams reinforced with high strength rebars and steel plate.

Quality Production Improvement. 2019. Vol.1, iss. 1. P. 304–310. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

16. Blikharskyu Y., Kopyika N., Selejdak J. Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements` reliability. *Production Engineering Archives*. 2020. Vol. 26, iss. 2. P. 67–72. (SCOPUS) (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

17. Bobalo Taras, Blikharskyu Yaroslav, Kopyika Nadiia, Volynets Mykhailo. Serviceability of RC beams reinforced with high strength rebar`s and steel plate. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. P. 25–33. (SCOPUS) (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

18. Selejdak J., Blikharskyu Y., Bobalo T., Kopyika N. Determination of the optimum percentage of high strength bars in RC beams with combined reinforcement using fem. *System Safety: Human - Technical Facility - Environment*. 2020. Vol. 2, iss. 1. P. 230–236. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

19. Blikharskyu Y., Selejdak J. Influence of the percentage of reinforcement damage on the bearing-capacity of RC beams. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2021. Vol. 10, № 1. P. 145–150. (сформульовано мету досліджень, проведено експериментальні дослідження, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

20. Blikharskyu Y., Kopyika N., Selejdak J. Specifics of corrosion processes in thermally strengthened rebar [Електронний ресурс]. *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 15. (SCOPUS Q1) (запропонована методика досліджень, виконано аналіз отриманих результатів, сформовано висновки)

21. Blikharskyu Y., Pavliv A. Formation of a complete stress-strain curve of concrete using digital image correlation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 3/7 (111). P. 37-44. (SCOPUS Q3) (сформульовано мету досліджень, проведено експериментальні дослідження, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

22. Blikharskyu Y., Selejdak J., Bobalo T., Khmil R., Volynets M. Influence of the percentage of reinforcement by unstressed rebar on the deformability of pre-stressed RC beams. *Production Engineering Archives*. 2021. Vol. 27, iss. 3. P. 212–216. (SCOPUS) (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

23. Blikharskyu Y., Selejdak J., Kopyika N. Corrosion fatigue damages of rebars under loading in time. *Materials*. 2021. Vol. 14, iss. 12. (SCOPUS Q2, Web of Science Q2) (запропонована методика досліджень, виконано аналіз отриманих результатів, сформовано висновки)

24. Khmil R., Tytarenko R., Blikharskyu Y., Vegera P. Improvement of the method of probability evaluation of the failure-free operation of reinforced concrete beams strengthened under load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. (SCOPUS) (сформовано аналіз літературних джерел, проаналізовано існуючі методи оцінки ймовірності безвідмовної роботи)

25. Bobalo T., Blikharsky Y., Kopyika N., Volynets M. Influence of the percentage of reinforcement on the compressive forces loss in pre-stressed RC beams strengthened with a package of steel bars. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 100. P. 53-62. (SCOPUS Q4) (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

26. Khmil R.Ye., Tytarenko R.Yu., Blikharsky Ya.Z., Vegera P.I. Improvement of the method of probability evaluation of the failure-free operation of reinforced concrete beams strengthened under load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. 012014 (SCOPUS) (сформовано аналіз літературних джерел, проаналізовано існуючі методи оцінки ймовірності безвідмовної роботи)

27. Vegera P., Vashkevych R., Blikharsky Y., Khmil R. Development methodology of determinating residual carrying capacity of reinforced concrete beams with damages tensile reinforcement which occurred during loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, No. 7(112). P. 6–17. (SCOPUS Q3) (проведено аналіз теоретичного розрахунку досліджень)

Наукові статті, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

28. Бліхарський Я. З., Вашкевич Р. В., Волинець М. Е., Бобало Т. В. Несуча здатність сталобетонних балок армованих високоміцною стержневою арматурою в поєднанні з стрічковою. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*: тези доповідей 7-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 14-16 листопада 2018 р., Харків, Україна. 2018. С. 83–85. (поставлені задачі досліджень, проведено аналіз впливу рівня навантаження, сформульовані висновки)

29. Бобало Т. В., Бліхарський Я. З., Копійка Н. С., Волинець М. Е. Деформативність залізобетонних балок армованих високоміцною арматурою та сталевим зовнішнім листом. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 20-22 листопада 2019 р., Харків, Україна. 2019. С. 31–32. (сформовано мету досліджень, проведено аналіз та виведені висновки)

30. Хміль Р.Є., Титаренко Р.Ю., Бліхарський Я.З., Вегера П.І. Вдосконалення методики оцінки ймовірності безвідмовної роботи залізобетонних балок, підсиленних при дії навантаження. *Енергоефективність на транспорті*: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції, 18-20 листопада 2020 р., Харків, Україна. – 2020. – С. 112–113. (поставлені мета і задачі досліджень, запропоновані підходи для вдосконалення методики оцінки ймовірності безвідмовної роботи)

31. Хміль Р. Є., Титаренко Р. Ю., Бліхарський Я. З., Вегера П. І. Вплив рівня навантаження під час підсилення залізобетонних балок на ймовірність їх безвідмовної роботи. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : тези доповідей VII Міжнародної конференції, Одеса, 12–15 травня 2020 р. 2020. С. 356–358. (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

32. Бобало Т. В., Бліхарський Я. З., Вашкевич Р. В., Волинець М. Е. Вплив відсотку армування ненапруженими стержнями на деформативність попередньо напружених сталобетонних балок армованих пакетом арматур. *Інноваційні технології в архітектурі і дизайні: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 20-21 травня 2021 р., Харків. 2021. С. 260–263.* (сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки)

АНОТАЦІЯ

Бліхарський Я. З. Залишковий ресурс залізобетонних конструкцій з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової проблеми встановлення дійсного напружено-деформованого стану залізобетонних згинаних конструкцій з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури, розробленню нових методик дослідження з використанням цифрової кореляції зображення і суб-мікронних безпровідникових індикаторів, розробленню пропозицій до розрахунку при відновленні, оцінюванню надійності та залишкового ресурсу таких конструкцій.

Проведено експериментальні дослідження по визначенню мікротвердості та залишкової міцності арматури класу А500С діаметрам від 12 до 32 мм з використанням методики цифрової кореляції зображень. Розроблено методику з використанням цифрової кореляції зображення по визначенню деформацій бетону та побудовану повну діаграму «напруження-деформації» бетону з низхідною віткою та визначено значення коефіцієнта Пуасона до повного руйнування зразків.

Виконано експериментальні дослідження залізобетонних згинаних елементів з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури з використанням новітнього методу цифрової кореляції зображення та суб-мікронних безпровідникових індикаторів, які дозволили виконувати випробування у безконтактному режимі. На основі деформаційної моделі, згідно чинних норм проектування, розроблено пропозиції щодо розрахунку таких конструкцій.

Ключові слова: залізобетонна балка, термічно-зміцнена арматура, пошкодження, методика розрахунку, оцінка надійності, ймовірність безвідмовної роботи, залишковий ресурс.

АННОТАЦИЯ

Блихарский Я. З. Остаточный ресурс железобетонных конструкций с повреждениями термически упрочненной арматуры.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» - Львов: Национальный университет «Львовская политехника», 2021.

Диссертационная работа посвящена решению научной проблемы установления действительного напряженно-деформированного состояния железобетонных сгибаемых конструкций с повреждениями термически упрочненной арматуры, разработке новых методик исследования с использованием цифровой корреляции изображения и суб-микронных беспроводниковых индикаторов, разработке предложений к расчету при восстановлении, оценке надежности. таких конструкций.

Проведены экспериментальные исследования по определению микротвердости и остаточной прочности арматуры класса А500С диаметрам от 12 до 32 мм с использованием методики цифровой корреляции изображений. Разработана методика с использованием цифровой корреляции изображения по определению деформаций бетона и построена полная диаграмма «напряжение-деформации» бетона с нисходящей веткой и определено значение коэффициента Пуассона к полному разрушению образцов.

Выполнены экспериментальные исследования железобетонных изгибаемых элементов с повреждениями термически упрочненной арматуры с использованием нового метода цифровой корреляции изображения и субмикронных беспроводниковых индикаторов, которые позволили выполнять испытания в бесконтактном режиме. На основе деформационной модели, согласно действующим нормам проектирования, разработаны предложения по расчету таких конструкций.

Ключевые слова: железобетонная балка, термически укрепленная арматура, повреждение, методика расчета, оценка надежности, вероятность безотказной работы, остаточный ресурс.

ABSTRACT

Blikharsky Ya. Z. Residual resource of reinforced concrete structures with damages of thermally strengthened reinforcement – On the manuscript's rights.

The thesis for earning the scientific Doctor's degree in Technical Sciences in specialty 05.23.01 «Building Constructions, Buildings and Structures» – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2021.

The dissertation is devoted to research of reinforced concrete bended elements in which the external thermally strengthened layer of working A500S reinforcement is damaged.

In the introduction the relevance, purpose and objectives of research, general characteristics, scientific novelty and practical value of the work are substantiated..

In the first section is presented the review of the technical literature on the state of research of reinforced concrete structures and their damages during operation. Also, in the section existing studies of damages and defects, studies of durability and reliability of reinforced concrete structures and diagnostic methods for damaged RC structures are analyzed.

The second section is devoted to the method of testing the materials of experimental reinforced concrete beams, namely the testing of concrete and thermally strengthened reinforcement. An improved method for testing concrete, based on existing standards is proposed; for determination of deformations the digital image

correlation is used. Also, the method for determination of the cross section micro-hardness of A500S steel bars is proposed, which enabled to indicate the thermally strengthened layer and its distribution along the cross section of the rebar. Using the digital image correlation, method of determining the physical and mechanical characteristics of the rebar, taking into account its inhomogeneous properties in the cross section is proposed

In the third section the program and test methods for experimental beams are presented. In order to determine the load-bearing capacity and deformability of beams, they were tested for bending under the short-term load up to failure. The tests were performed on a special stand for testing of bended elements. Sub-micron computerized computer indicators were used for determination of the deflections and deformations of the concrete and reinforcement. In order to determine the deformations of working reinforcement by digital image correlation were used two monochrome cameras. Images were recorded and processed with the use of special software and the corresponding deformations were obtained.

In the fourth section are presented results of testing the materials of experimental beams, namely the experimental results of concrete and reinforcement. Deformations of concrete samples were determined by digital image correlation; the control of deformations was performed using sub-micron indicators. Complete diagram of concrete failure was constructed and the Poisson's ratio was determined. Experimental tests of A500S reinforcement samples showed that the thermally hardened layer has higher physical and mechanical properties in comparison with core. According to the experimental tests of the micro-hardness of the welding zones it was also established, that in these zones the strength the thermally-hardened outer layer is reduced.

In the fifth section are presented the experimental results of testing of reinforced concrete beams with thermally strengthened reinforcement. In all experimental reinforced concrete beams the exhaustion of bearing capacity occurred due to the achievement by the most compressed fiber limit values. Limit values ε_{ud} for rebar were not achieved and rupture of the reinforcement was not observed. For reinforced concrete beams of each series, ε_{yk} was determined for each diameter of the working reinforcement, both undamaged and damaged. In all beams, excluding the samples of 7-th...9-th series, the working reinforcement first reaches the yield point, after that the deformations of the most compressed fiber of concrete reach limit values, which corresponds to exhaustion of load bearing capacity of experimental samples. In undamaged samples of 7-th...9-th series, the reinforcement did not reach the deformations ε_{yk} . According to experimental research, it was found that the load-bearing capacity is decreased due to reduction of the cross-sectional area and physical and mechanical characteristics of reinforcement due to drilling of the hardened layer.

In the sixth section method for determination of the bearing capacity of reinforced concrete bended elements with damages of thermally strengthened working rebar is presented. The specific feature of calculation algorithm, proposed in the work is that it takes into account the specifics of the strength properties of thermally strengthened reinforcement. It is proposed to model the inhomogeneous characteristics of thermally strengthened rebar by calculating the actual f_{yk} , depending on the

percentage of damages in the outer layer of reinforcement. The theoretical results of calculation are lower than the experimental.

In the seventh section the method of calculating the residual resource and assessment the reliability of reinforced concrete bended elements with damages of the working thermally strengthened rebar is described. The calculation method included the assessment of qualitative indicators of safety indices β and quantitative indicators of the probability of failure-free operation $P(\beta)$. Specific feature of the proposed calculation model is that it takes into account the inhomogeneous characteristics of the thermally strengthened rebar along its cross section in the form of a polynomial function. The reliability indicators were obtained for beams with undamaged $\text{Ø}20$ mm thermally strengthened rebar and for samples with damaged reinforcement. Reliability of RC structures significantly decreases if damages in rebar are increased. Algorithm for calculating the residual resource was proposed and their results were compared with the normative values.

Keywords: reinforced concrete beam, thermally strengthened reinforcement, damages, calculation method, reliability assessment, probability of failure-free operation, residual resource.