

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ



РОМАШКО-МАЙСТРУК ОЛЕНА ВАСИЛІВНА

УДК 624.012.45:620.17

**ОПР ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ БАГАТОРІВНЕВОМУ
УТВОРЕННЮ НОРМАЛЬНИХ ТРІЩИН**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Рівне – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Журавський Олександр Дмитрович,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
завідувач кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Демчина Богдан Григорович,
Національний університет «Львівська політехніка», професор
кафедри будівельних конструкцій та мостів;

кандидат технічних наук, доцент
Андрійчук Олександр Валентинович,
Луцький національний технічний університет,
професор кафедри будівництва та цивільної інженерії.

Захист відбудеться «25» лютого 2021 р., об 11:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 47.104.06 в Національному університеті водного господарства та природокористування за адресою: 33028, Рівне, вул. Чорновола, 49, ауд. 673.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33028, Рівне, вул. О.Новака, 75 та на сайті університету www.nuwm.edu.ua.

Автореферат розісланий «18» січня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К.47.104.06
к.т.н., доцент



О.М. Бордюженко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Не дивлячись на те, що світова історія досліджень тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій є доволі тривалою, сьогодні все ж таки необхідно визнати: достатньо аргументованих та переконливих методів розрахунку, що узгоджувалися б з більшістю накопичених результатів експериментальних досліджень та не вступали б у взаємне протиріччя між собою, досі так і не запропоновано. Найсуттєвіші розбіжності між існуючими методиками пов'язані, перш за все, з урахуванням загальних характеристик опору бетону зсуву арматури. За результатами експериментальних досліджень вітчизняних та зарубіжних авторів максимальні значення цих характеристик не просто відмінні між собою, а різняться в рази.

Якщо залізобетон моделювати у вигляді складної функціональної системи, що складається з крупного заповнювача, арматури і зв'язучої цементно-піщаної матриці, то утворення тріщин слід розглядати з позицій порушення зв'язку між елементами такої системи. Рішення такої задачі в рамках механіки руйнування залишаються доволі складними, оскільки потребують розгляду системи інтегрально-диференціальних рівнянь, які часто не мають точного аналітичного розв'язку.

Тому розробка інженерних методів розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів, що базуватимуться на загальних закономірностях зміни відстаней між нормальними тріщинами та деформацій арматури з обов'язковим врахуванням опору бетону її зсуву на ділянках між тріщинами, залишатимуться актуальними й надалі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає концепції реалізації державної політики з нормативного забезпечення будівництва в Україні та стратегії її сталого розвитку "Україна – 2020", схваленої указом президента України від 12.01.2015 року (№ 5/2015).

Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідних робіт тематики кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій КНУБА на 2016-2020 рр. «Дослідження залізобетонних конструкцій при складних впливах», розділ III «Експериментально-теоретичні дослідження залізобетонних конструкцій» (номер державної реєстрації 01971U005390). Дисертаційні дослідження також пов'язані з держбюджетною тематикою кафедри основ архітектурного проектування, конструювання та графіки НУВГП за темою «Геометричне та фізичне моделювання в архітектурі та будівництві» (номер державної реєстрації 0117U003523).

Мета роботи – розробка узагальненої моделі та інженерних методів розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах на основі узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном в рамках подальшого розвитку загальної деформаційно-силової моделі опору бетону та залізобетону силовим впливам.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні **задачі досліджень**:

1. Розробка узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном, яка дозволяла б достовірно оцінювати їх спільну взаємодію на будь-якій стадії деформування залізобетонних елементів і конструкцій.
2. Отримання загальної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном,

яка дозволяла б у найпростіший спосіб визначати величину зусилля їхньої взаємодії на всьому діапазоні деформування залізобетонних елементів.

3. Побудова моделі багаторівневого утворення нормальних тріщин, яка була б узгоджена з узагальненою моделлю зчеплення арматури з бетоном та дозволяла б застосовувати гіпотезу Томаса у спрощеній формі.
4. Розробка загального та спрощеного методів розрахунку основних параметрів багаторівневого утворення нормальних тріщин (відстаней між тріщинами та ширини їх розкриття), що сприяло б подальшому розвитку загальної теорії деформування залізобетону.
5. Проведення експериментальних досліджень центрально розтягнутих та згинальних залізобетонних елементів в з метою перевірки запропонованої моделі та розроблених методів розрахунку основних параметрів багаторівневого утворення нормальних тріщин.
6. Побудова методики розрахунку залишкового енергетичного ресурсу залізобетонних елементів конструкцій в рамках подальшого розвитку деформаційно-силової моделі їх опору силовим впливам.
7. Експериментально-статистична оцінка розроблених методів розрахунку багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин.
8. Апробація загального та спрощеного методів розрахунку багаторівневого утворення і розкриття нормальних тріщин.

Об'єкт дослідження – процес багаторівневого утворення і розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах на основі моделі, що враховує зчеплення арматури з бетоном.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан (НДС) згинальних та центрально розтягнутих залізобетонних елементів, математична модель багаторівневого утворення нормальних тріщин, рівні утворення, крок та ширина їх розкриття.

Методи дослідження – вивчення та аналіз результатів найбільш відомих експериментально-теоретичних досліджень, висвітлених у відкритих літературних джерелах та пов'язаних з тріщиностійкістю залізобетонних елементів; синтез, абстрагування, фізичне та математичне моделювання визначальних характеристик та параметрів НДС стержневих залізобетонних елементів конструкцій з урахуванням зчеплення арматури з бетоном; методи числового аналізу НДС залізобетонних елементів за умов багаторівневого утворення нормальних тріщин; методи теорії ймовірностей та математичної статистики обробки результатів експериментальних та теоретичних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що автором даних досліджень отримано нові експериментальні дані щодо рівнів та параметрів утворення і розвитку нормальних тріщин в залізобетонних елементах та *вперше*:

- запропоновано силовий критерій локального порушення зчеплення арматури з розтягнутим бетоном, який дозволяє прогнозувати кількість рівнів утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах та відповідні їм рівні завантаження;
- зв'язок між середніми напруженнями зчеплення арматури з бетоном та нормальними напруженнями в самій арматурі на всьому діапазоні її

деформування представлено нелінійною функцією, що забезпечило формування загальної моделі багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах;

- розроблено модель і методику визначення енергетичного ресурсу залізобетонних елементів за конкретно встановленими деформаційними параметрами (прогинами, кроком та шириною розкриття тріщин), що дозволяє оцінювати та прогнозувати реальний напружено-деформований стан елементів в проєктованих та експлуатованих будівлях і спорудах;

удосконалено:

- деформаційно-силову модель (ДСМ) опору залізобетонних елементів силовим впливам в питаннях утворення та розвитку нормальних тріщин з урахуванням зчеплення арматури з бетоном;
- загальну методику розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин з позицій послідовного багаторівневого накопичення взаємних зміщень бетону і арматури, що в дійсності відповідає реальному характеру розвитку тріщин в залізобетонних елементах;

отримали подальший розвиток:

- модель зчеплення арматури з бетоном завдяки використанню нелінійної функції середніх напружень зазначеного зчеплення, що дозволяє у найпростіший спосіб контролювати зусилля взаємодії арматури з бетоном на будь-якій стадії деформування залізобетонних елементів;
- модель багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах з урахуванням локального порушення зчеплення арматури з бетоном, що забезпечило застосування єдиного методологічного підходу до їх розрахунку;
- методика визначення відстаней між нормальними тріщинами будь-яких рівнів за рахунок нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном, що дозволило відмовитись від низки емпіричних параметрів та коефіцієнтів.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати досліджень: розвивають загальну теорію зчеплення арматури з бетоном та загальну модель багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах; доповнюють деформаційно-силову модель опору залізобетонних елементів силовим впливам в питаннях тріщиностійкості; удосконалюють методи розрахунку тріщиностійкості нормальних перерізів залізобетонних елементів; забезпечують можливість об'єктивної оцінки напружено-деформованого стану конструктивних елементів, що потребують відповідного підсилення через зниження свого ресурсу.

За результатами проведених досліджень розроблено інженерні експрес-методи розрахунку багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах, які не потребують створення спеціального програмного забезпечення та дозволяють виконувати більшість розрахунків за розробленими відносно простими та компактними алгоритмами.

В цілому результати дисертаційних досліджень знайшли застосування в:

- Рівненській філії державного підприємства «Український державний науково-дослідний інститут проєктування міст “Діпромісто”» при розрахунку несучих конструкцій залізобетонних перекриттів при проєктуванні кварталу житлової та

громадської забудови по вул. Костромська-Гагаріна в м. Рівне (II черга);
 – ПАТ «Рівнеінвестпроект» при розрахунку несучих конструкцій залізобетонних перекриттів наступних об'єктів: №13.2308.19 «Робочий проект релігійно-просвітницького центру «Ковчег»» в м. Лубни Полтавської області; №40.2335.19 «Робочий проект добудови ТРЦ «Чайка» в м. Рівне».

Результати дисертаційних досліджень також використані в навчальному процесі Київського національного університету будівництва та архітектури і Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне) при вивченні фаховоспрямованих навчальних дисциплін студентами спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія» за спеціалізацією «Промислове та цивільне будівництво» та виконанні ними магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Основні ідеї, наукові розробки та практичні результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У спільних публікаціях зі співавторами здобувачу належить в роботах: [2] – розробка основних положень загальної моделі багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин, формулювання універсального силового критерію взаємодії арматури з бетоном за появи тріщин; [3] – розробка загального та спрощеного методів розрахунку основних параметрів тріщиностійкості залізобетонних елементів в нормальних перерізах; [6] – формулювання енергетичного критерію та розробка моделі і методики розрахунку енергетичного ресурсу залізобетонних елементів за конкретно встановленими деформаційними параметрами (прогинами, кроком та шириною розкриття тріщин); [7; 10] – формування основних положень узагальненої моделі зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах та отримання нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном; [8] – розробка методики експериментальних досліджень, обробка їх результатів та статистична оцінка запропонованих методів розрахунку багаторівневого утворення і розкриття нормальних тріщин.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційних досліджень оприлюднювались на: VII-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (14-16 листопада 2018, м. Харків); III-й міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (26-28 вересня 2019, м. Одеса); VIII-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (20-22 листопада 2019, м. Харків); VII-й міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (12-15 травня 2020, м. Одеса); 3-й міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (26-27 травня 2020, м. Львів).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць. Основні результати проведених досліджень містяться у 7-и статтях в наукових журналах і збірниках фахових спеціалізованих видань України, 4-и з яких у виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою Index Copernicus; у 3-х статтях наукових періодичних видань іноземних держав, з яких 2-а індексуються міжнародною наукометричною базою Scopus, а 1-е – міжнародною наукометричною базою Index Copernicus.

Матеріали дисертаційної роботи також висвітлені в тезах доповідей 5-ти міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4-х розділів, загальних висновків, списку використаної літератури (365 найменувань) та 6-ти додатків. Дисертація викладена на 217 сторінках, з яких 130 сторінок основного тексту, 36 сторінок списку літератури, 31 сторінка додатків. До основної частини дисертації входить 51 рисунок і 18 таблиць на 8-ми повних сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми та сформульовано мету, основні завдання і методи досліджень, представлено загальну характеристику, наукову новизну та практичне значення дисертаційної роботи, наведено результати її апробації та означено особистий внесок здобувача.

Перший розділі присвячено розвитку теорії тріщиностійкості залізобетону з позицій зчеплення арматури з бетоном. Підкреслена роль вітчизняних вчених Азізова Т. Н., Бабича Є. М., Бамбури А. М., Бачинського В. Я., Бліхарського З. Я., Вахненка П. Ф., Голишева О. Б., Городецького О. С., Демчини Б. Г., Дорофеева В. С., Журавського О. Д., Карпюка В. М., Кваші В. Г., Клімова Ю. А., Клименка Є. В., Колчунова В. І., Кочкарьова Д. В., Молодченка Г. А., Павлікова А. М., Прокоповича А. А., Ромашка В. М., Семка О. В., Шмуклера В. С., Яковенка І. А. та багатьох інших у її вдосконаленні.

Виділено 4-и основних етапи та напрямки розвитку теорії зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах (рис. 1).

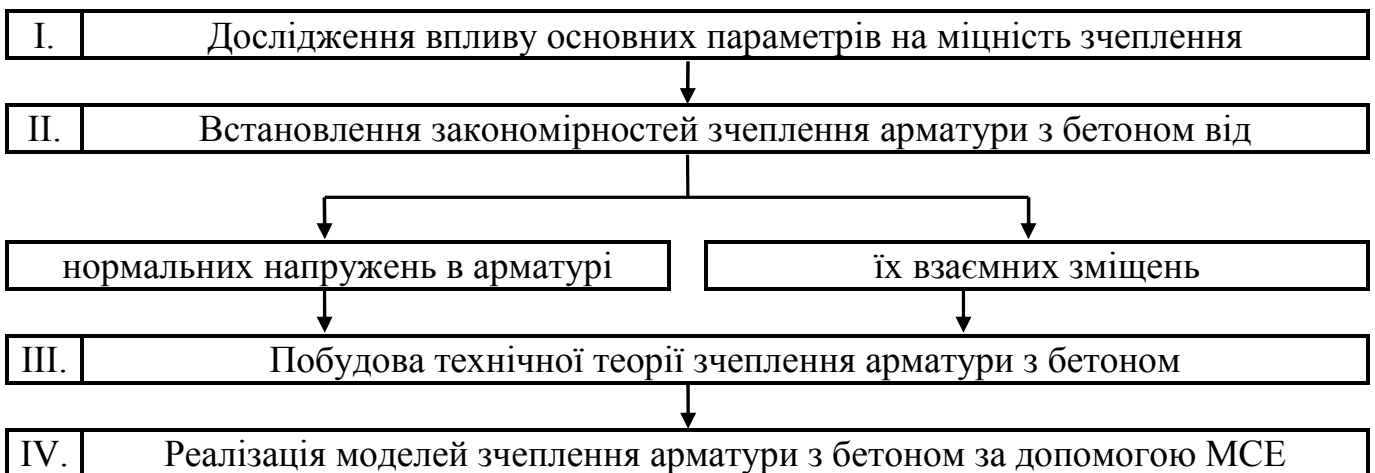


Рисунок 1 – Напрями (етапи) досліджень зчеплення арматури з бетоном

Здійснено детальну класифікацію моделей зчеплення арматури з бетоном за їх масштабом і структурою, за схемами подання бетону і арматури, за характером руйнування, за схемами та математичним вирішенням їхньої взаємодії (рис. 2). Виконано критичний аналіз найбільш відомих на сьогодні діаграм зчеплення арматури з бетоном. 24-ри різновиди цих діаграм зведено до 4-х груп згідно робіт нижчеказаних авторів (рис. 3...6).

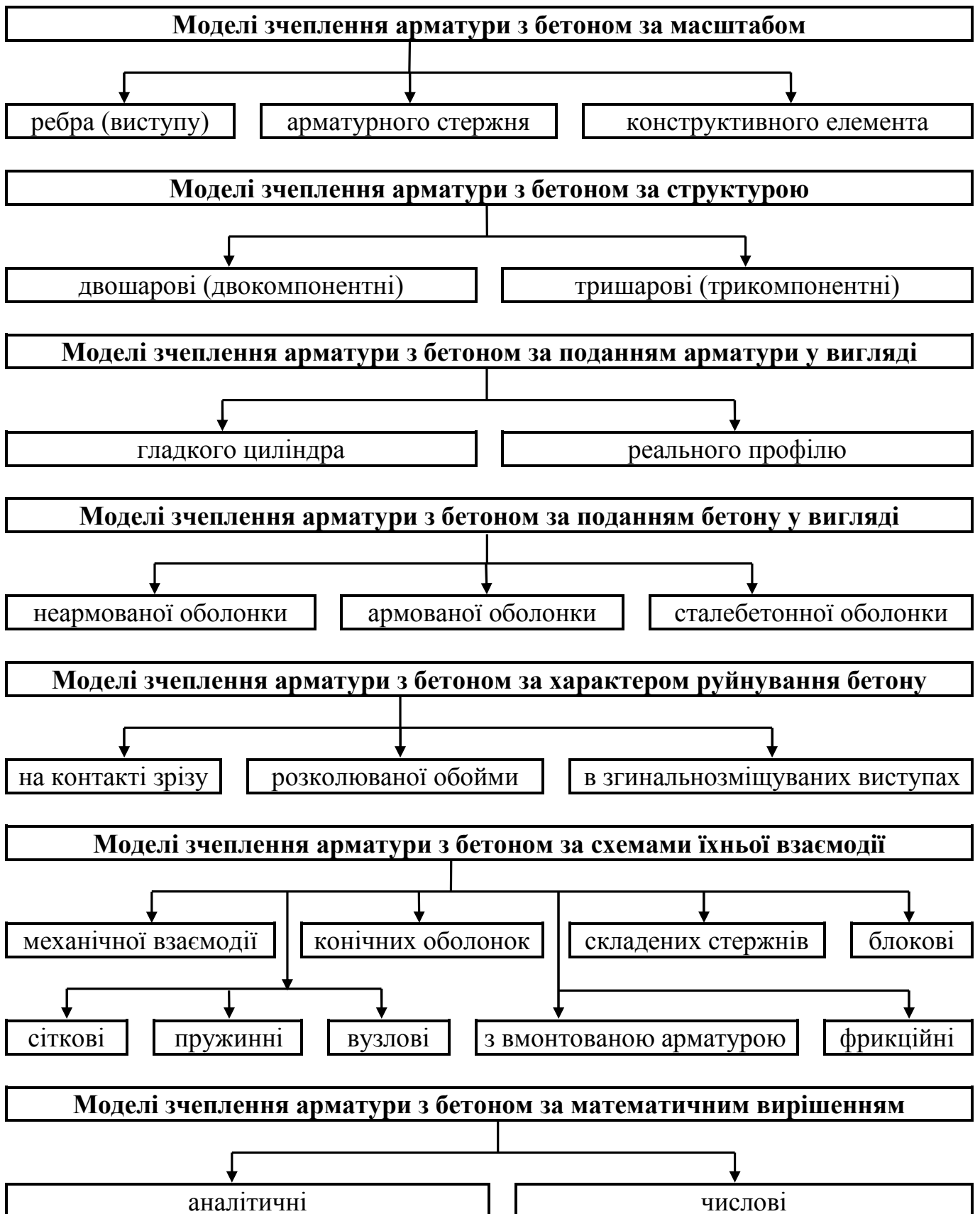


Рисунок 2 – Класифікація моделей зчеплення арматури з бетоном

Здійснено класифікацію та критичний аналіз:

– 59-ти різних залежностей дотичних напружень зчеплення арматури з бетоном від

їх взаємного зміщення;

- 33-х функцій з визначення граничних напружень зчеплення арматури з бетоном;
- 12-ти залежностей з визначення середніх напружень зчеплення арматури з бетоном у граничній стадії;
- 18-ти функцій з визначення кроку нормальних тріщин в залізобетонних елементах за параметрами зчеплення арматури з бетоном;
- 16-ти залежностей з розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах за параметрами взаємного зсуву арматури з бетоном.

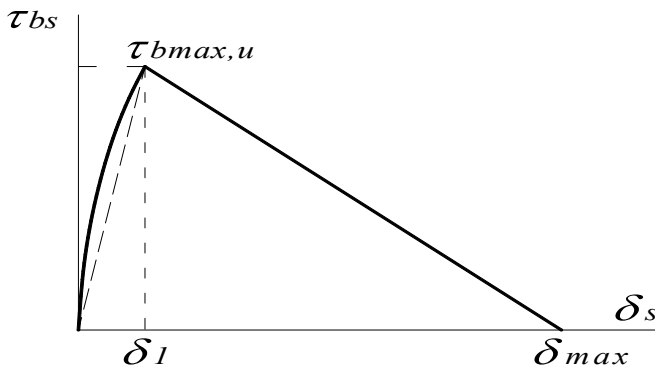


Рисунок 3 – Діаграми з обмеженням максимальних зміщень:

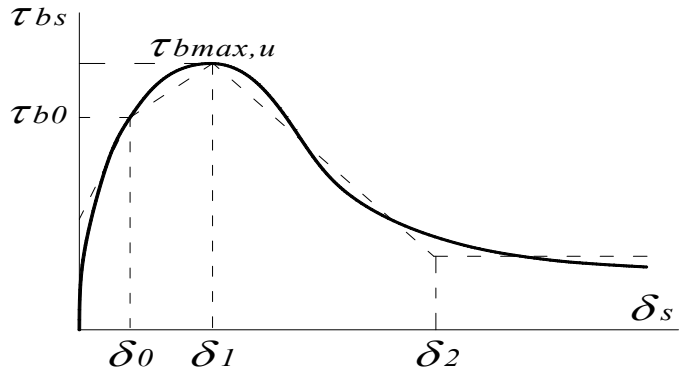


Рисунок 4 – Діаграми без обмеження максимальних зміщень:

Rehm G., Muguruma H., Mirza S. A., Martin H., Birkenmaier M., Noakowski P., Dörr K., Koch R., Fehling E., Schießl A., Avak R., Munoz M.B., Ngo D., Morita S., Giuriani E., Колчунов В. И., Hawkins N., Kwak H. G., Khalfallah S., Nagatomo K., Malvar L. J., Weisse D., Ruiz M. R.

Sigrist V., Naaman A. E., Bigaj A. J., Rehm G., Alvarez M., Lorenzis L., Munoz M. B., Hota S., Sharaky I. A., Pochanart S., Карпенко Н. И., Nilson A. H., Бондаренко В. М., Martins P., Yankelevsky D. Z., Холмянский М. М., Gan Y., Tassios T. P., Бенин А. В., Самошкин А. С.

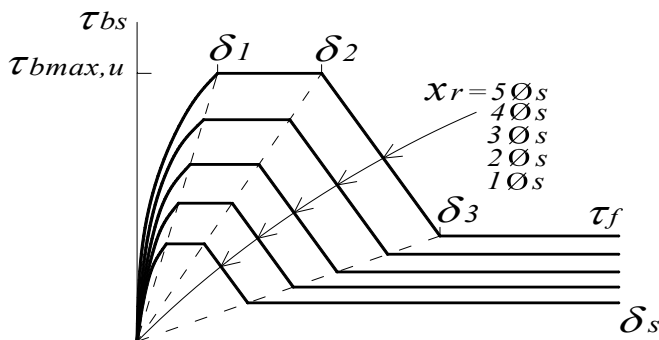


Рисунок 5 – Диференційовані діаграми з фіксованою ділянкою пластичності бетону:

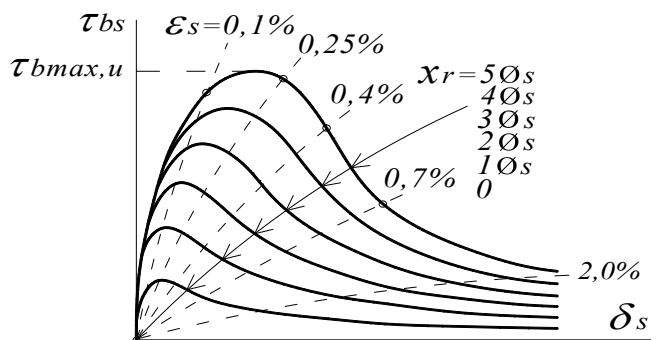


Рисунок 6 – Диференційовані діаграми без фіксованої ділянки пластичності бетону:

Ciampi V., Eligehausen R., Balasz G.L., Kreller H., Harajli M. H., Magnusson J., Lowes L. N., CEB-FIP MC 1990, Khalfallah S., Lettow S., Huang Z., Lundgren K., Lin X., Wu Y. F., M., CEB-FIP MC 2010

Холмянский М. М., Shima H., Okamura H., Nilson A.H., Mirza S. A., Gambarova P. G., Tepfers R., Naaman A. E., Cheng Y., Trost H., Schenkel M., Tassios T. P., Alvarez M., Ikki N., Viwathanatapa S., Nagatomo K., Weisse D.

Підкреслена особлива роль Рівненської (проф. Бабич Є. М.), Львівської (проф. Кваша В. Г. та проф. Демчина Б. Г.) та Київської (проф. Клімов Ю. А. та проф. Колчунов В. І.) наукових шкіл в дослідженнях зчеплення арматури з бетоном.

Саме завдяки вищенаведеному аналізу і були визначені основні задачі даних досліджень.

Другий розділ присвячено розробці теоретичних основ загальної моделі та методики розрахунку багаторівневого утворення і розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах з урахуванням зчеплення арматури з бетоном на основні положень, гіпотез та передумов, прийнятих для розробки зазначених моделей.

За критерій локального порушення зчеплення арматури з бетоном на ділянках їх активної взаємодії, викликаного утворенням нормальних тріщин (рис. 7), прийнято зусилля граничного зчеплення арматури з бетоном

$$N_{bd,cr} = N_{ct,cr} \cdot \quad (1)$$

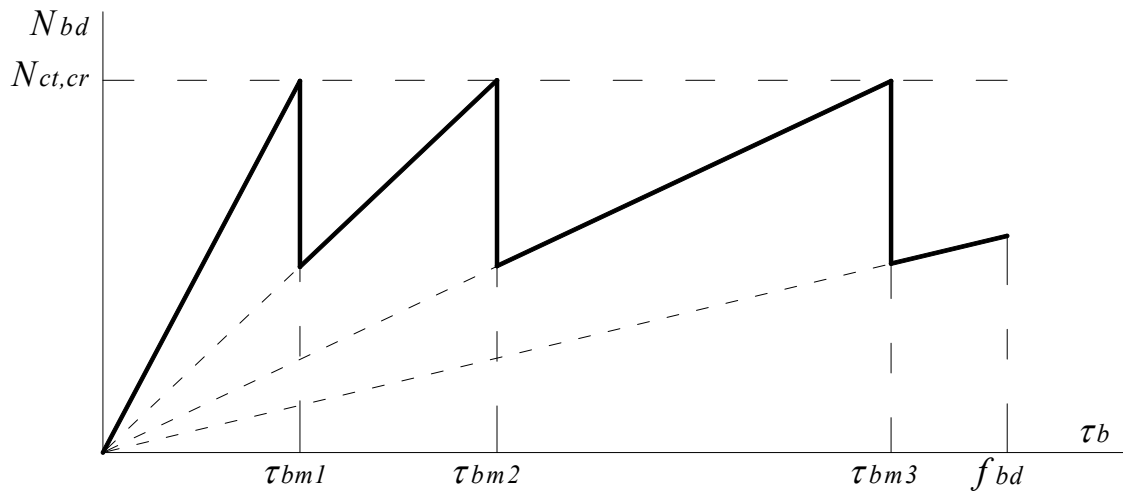


Рисунок 7 – Зміна зусилля зчеплення арматури з бетоном при багаторівневому утворенні нормальних тріщин в залізобетонному елементі

Інакше кажучи, взаємодію компонентів контактної системи «арматура – контактний шар – розтягнутий бетон» при утворенні тріщин запропоновано відображати за допомогою силових параметрів за наступною схемою

$$N_s \Rightarrow N_{bd} \Rightarrow N_{ct}, \quad (2)$$

де зусилля в компонентах цієї системи є функціями відповідних напружень (рис. 8)

$$N_s = f(\sigma_s); \quad N_{bd} = f(\tau_{bm}); \quad N_{ct} = f(\sigma_{ct}). \quad (3)$$

Взаємодію арматури з бетоном змодельовано у найпростіший спосіб – за допомогою середніх напружень зчеплення арматури з бетоном. Встановлено, що їх залежність від напружень в самій арматурі є нелінійною (рис. 9). Подібну залежність запропоновано описувати степеневою функцією (4), отриманою з виразів (2) і (3)

$$\tau_{bmi} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\sigma_{si} / \sigma_{s,max})^{1-1/\eta_1}, \quad (4)$$

де η_1 – коефіцієнт, що враховує профіль арматури за індексом Рема f_R , пропонується визначати за отриманим виразом

$$\eta_1 = 1 + 29 \cdot f_R - 120 \cdot f_R^2, \quad (5)$$

що має довірчий інтервал з експериментом 2σ (σ – середньоквадратичне відхилення).

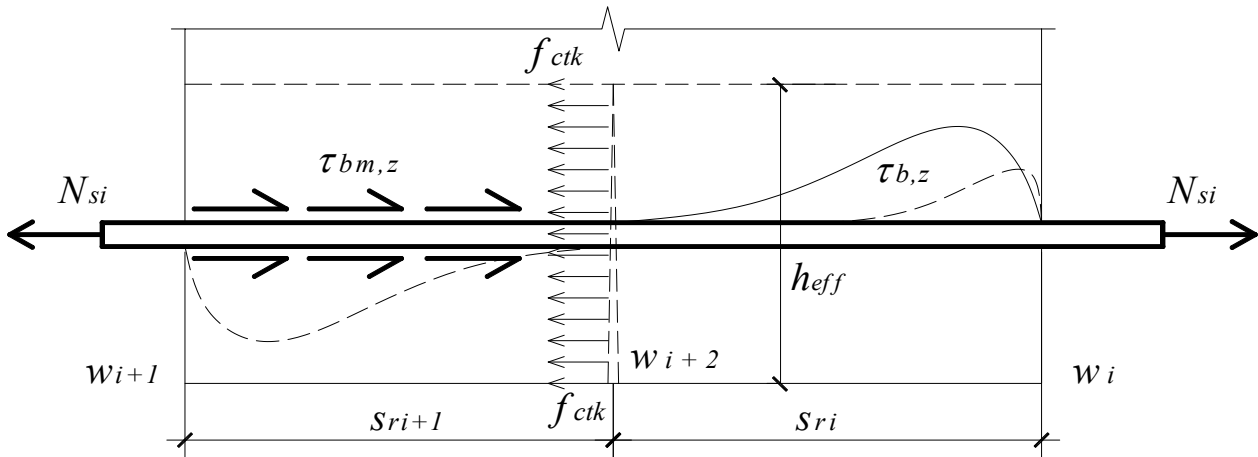


Рисунок 8 – До взаємодії компонентів контактної системи «арматура – контактний шар – розтягнутий бетон»

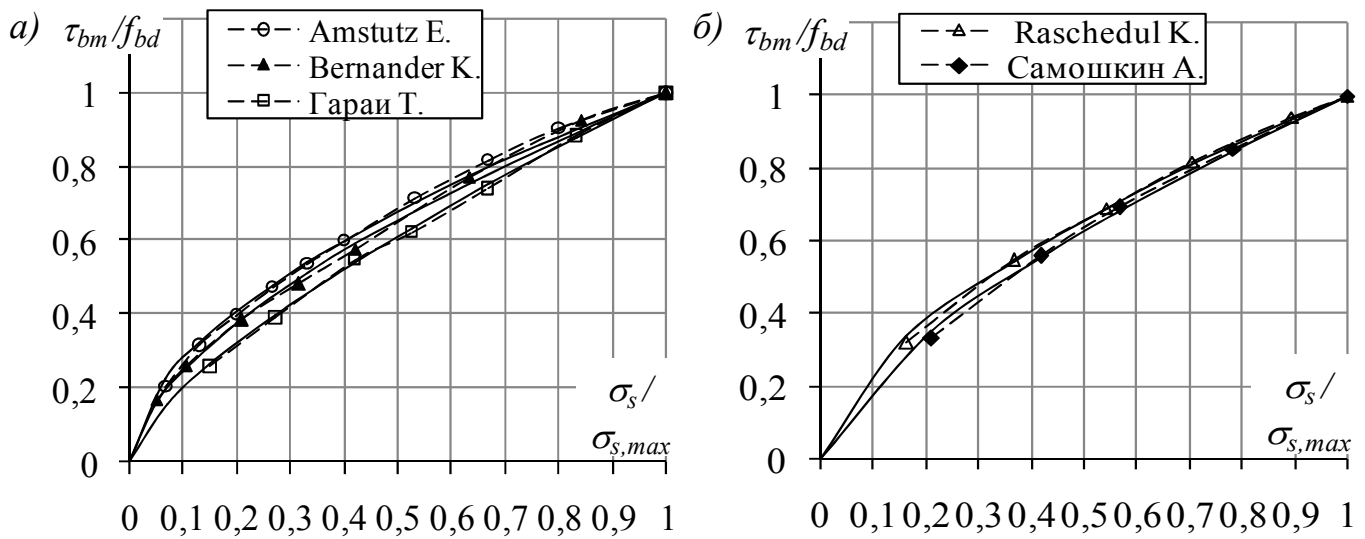


Рисунок 9 – Теоретичні (—) та експериментальні (---) залежності середніх дотичних напружень зчеплення від нормальних напружень в арматурі періодичного профілю за дослідями: а) –1955-59 рр.; б) – 2014-17 рр.

Доцільність розрахунку середніх напружень зчеплення арматури з бетоном за нелінійною залежністю (4) обґрунтовано статистично (табл. 1). Крім того, для деформаційно-силової моделі вона є більш прийнятною, порівняно з лінійною функцією Кочкарьова Д. В.

$$\tau_{m,i} = f_{ctm} \cdot ((\eta_1 \cdot \eta_2 - \alpha_0) \cdot \sigma_{si} / f_{yd} + \alpha_0), \quad (6)$$

оскільки не накладає ніяких обмежень на її використання в приграничних зонах: $0 \leq \tau_{bmi} < \tau_0$ та $\sigma_l < \sigma_{si} \leq \sigma_y$.

Якщо дотримуватись узагальненого критерію порушення зчеплення арматури з бетоном (1), то за багаторівневого утворення нормальних тріщин для залізобетонного елемента можна записати

$$N_{bd,i} = N_{bd,i+1}, \quad (7)$$

де $N_{bd,i}$ і $N_{bd,i+1}$ – зусилля активного зчеплення арматурного стержня з бетоном, що відповідають утворенню тріщин попереднього та наступного рівнів відповідно.

Таблиця 1 – Порівняння теоретичних та дослідних значень середніх напружень зчеплення арматури з бетоном

Автори досліджень	Рік	Профіль і діаметр арматури, мм	Відхилення від дослідних даних					
			за формулою (4)			за функцією (6)		
			Δ	σ	ν , %	Δ	σ	ν , %
Amstutz E.	1955	періодичний, 30	0,99	3,22	3,25	1,091	6,03	5,53
Bernander K.	1957	періодичний, 16	1,01	2,26	2,25	1,048	3,18	3,03
Гараи Т.	1959	періодичний, 20	0,99	1,34	1,35	1,049	3,30	3,15
Кольнер В.	1965	періодичний, 20	1,00	1,73	1,73	1,08	5,27	4,88
Adrouche K.	1987	періодичний, 16	0,995	2,00	2,01	1,01	2,32	2,30
Rashedul K.	2014	періодичний, 20	0,994	2,29	2,30	1,051	4,48	4,26
Самошкин А.	2017	періодичний, 16	0,998	2,28	2,29	1,023	2,76	2,70

З урахуванням виразу (3) залежність (7) набуде наступного вигляду

$$\tau_{bmi} \cdot s_{ri} = \tau_{bmi+1} \cdot s_{ri+1}, \quad (8)$$

де s_{ri} і s_{ri+1} – відстані між тріщинами попереднього та наступного рівнів; τ_{bmi} і τ_{bmi+1} – середні напруження зчеплення арматури з бетоном на ділянках між тріщинами тих же рівнів.

Для центрально розтягнутого елемента (рис. 10) параметри утворення тріщин першого та другого рівнів, згідно (8), будуть пов'язані між собою виразами

$$s_{r2} = s_{r1} / 2, \quad \tau_{bm2} = 2 \cdot \tau_{bm1}. \quad (9)$$

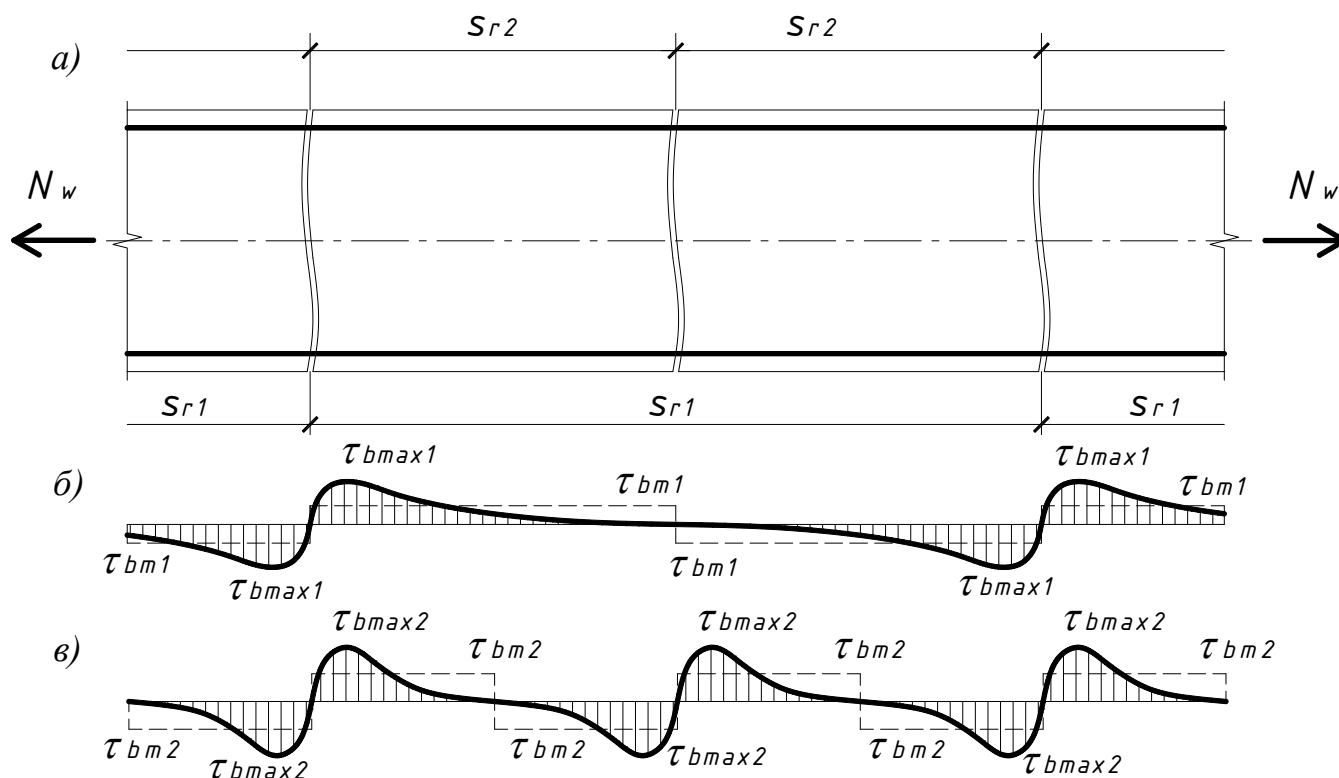


Рисунок 10 – Схема (а), перший (б) та другий (в) рівні утворення тріщин в центрально розтягнутому залізобетонному елементі з відповідними епюрами напружень зчеплення

Виходячи з виразів (3) та (4), відстань між суміжними тріщинами першого рівня на рівні центру ваги розтягнутої арматури, при напруженнях в ній $\sigma_{s,cr1}$, можна розрахувати за наступною залежністю

$$s_{r1} = \varnothing_s / (4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot (\sigma_{s,cr1} / f_{yk})^{1-1/\eta_1} \cdot \rho_{l,t}), \quad (10)$$

де $\rho_{l,t} = A_s / A_{ct,cr}$ – коефіцієнт армування розтягнутого бетону в зоні активного зчеплення арматури з бетоном.

Середні напруження та деформації в арматурному стержні, за яких почнуть утворюватися тріщини другого рівня, можна визначати за доволі простими виразами, отриманими з (4) та (9)

$$\sigma_{s,cr2} = \sigma_{s,cr1} \cdot 2^{\eta_1/(\eta_1-1)}; \quad \varepsilon_{s,cr2} = \varepsilon_{s,cr1} \cdot 2^{\eta_1/(\eta_1-1)}. \quad (11)$$

Якщо ж врахувати, що в центрально розтягнутих елементах відстань між тріщинами другого рівня зменшується вдвічі $s_{r2} = s_{r1} / 2$, то напруження, за яких ці тріщини почнуть утворюватися, можна розрахувати безпосередньо за формулою

$$\sigma_{s,cr2} = f_{yk} \cdot \varnothing_s / (2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot s_{r1} \cdot \rho_{l,t})^{\eta_1/(\eta_1-1)}. \quad (12)$$

В згинальних елементах (рис. 11) відстані між суміжними тріщинами першого рівня $s_{r1,1}$ теж слід обчислювати за виразом (10).

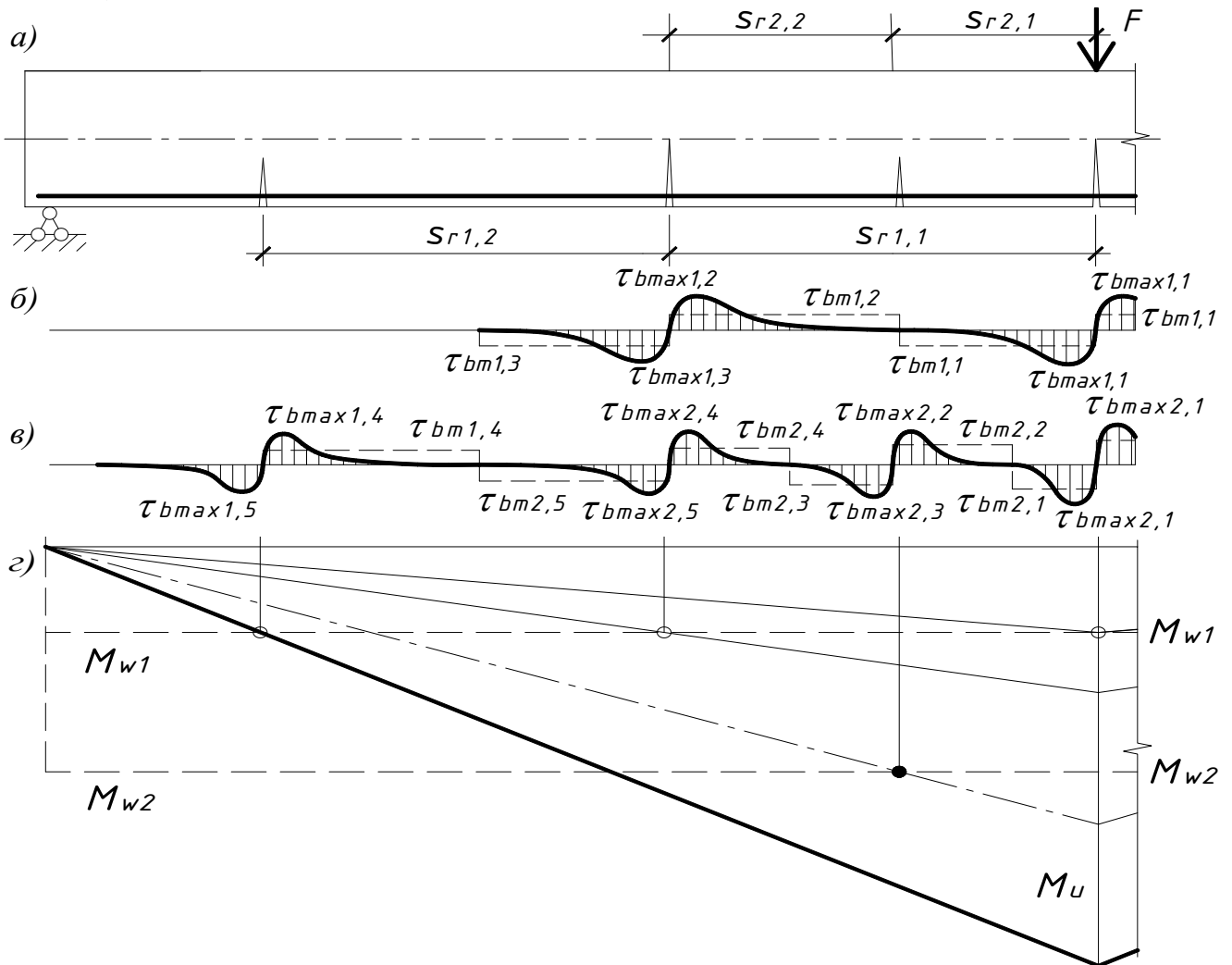


Рисунок 11 – Схема рівневого утворення тріщин (а), відповідні епюри напружень зчеплення (б, в) та моментів (з) в згинальному елементі

Однак максимальні зусилля в бетоні розтягнутої зони $N_{ct,cr} = f(\varepsilon_{ctu})$ необхідно визначати за допомогою загальноновизнаної системи співвідношень механіки деформованого твердого тіла (МДТТ)

$$\left. \begin{aligned} & \bullet \text{ статичних } M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s), \quad N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ & \bullet \text{ геометричних } 1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ & \bullet \text{ фізичних } \sigma_c = f(\varepsilon_c), \quad \sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}), \quad \sigma_s = f(\varepsilon_s) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

з її доповненням, згідно ДСМ, аналітичною залежністю діаграми стану елемента « $M - (1/r)$ » та функцією граничних деформацій стиснутого бетону ε_{cu} .

У більшості випадків розрахунок ширини розкриття нормальних тріщин за гіпотезою Томаса є доволі складним. Основна проблема полягає в необхідності інтегрування функції взаємних зміщень бетону і арматури, яка не може бути описана якоюсь універсальною залежністю.

Але розрахунок ширини розкриття найбільш небезпечної тріщини з позицій послідовного накопичення взаємних зміщень бетону і арматури можна дещо спростити та виконати за наступною формулою

$$w_k = s_{r1} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}) - \dots - s_{ri} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm,cri} - \varepsilon_{ctm}). \quad (14)$$

Для центрально розтягнутих залізобетонних елементів та для згинальних елементів у зоні чистого згину різницею зусиль в розтягнутій арматурі у перерізах з суміжними тріщинами можна знехтувати ($\Delta\sigma_s = 0$). Тоді вираз (14) для вказаних елементів за $s_{r2} = s_{r1} / 2$ набуде наступного вигляду

$$w_k = s_{r2} \cdot (\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{sm,cr2} - \varepsilon_{ctm}). \quad (15)$$

Розроблено спрощену методику розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин, в якій, крім спрощень в розрахунку осередненої кривини елемента, площу розтягнутого бетону в зоні його активного зчеплення з арматурою, рекомендується обмежувати за рис. 12.

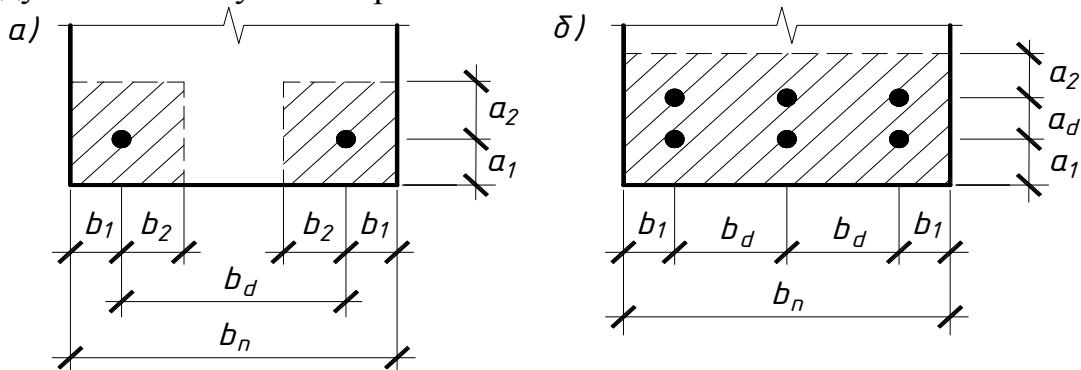


Рисунок 12 – До визначення площі перерізу розтягнутого бетону в зоні активного зчеплення з арматурою для випадків: а) $b_d > 5 \cdot \varnothing_s$; б) $b_d \leq 5 \cdot \varnothing_s$ ($a_d \leq 5 \cdot \varnothing_s$)

Третій розділ присвячено експериментальній перевірці запропонованої моделі та розроблених методів розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин. Мета та об'єм експериментальних досліджень наведені в табл. 2.

Всі залізобетонні призмові елементи та балки виготовлені з важкого бетону класу С20/25 та армовані стержнями діаметром 10 мм класу А500С. Схеми їх армування наведені на рис. 13.

Таблиця 2 – Мета та об'єм експериментальних досліджень

№ з/п	Тип та розміри зразків	К-ть, шт.	Мета випробувань
1.	Призми ПС, 10x10x40 см	3	Міцність та модуль пружності стиснутого бетону на момент випробування основних зразків
2.	Призми ПР, 10x10x60 см	3	Міцність бетону за осьового розтягу на момент випробування основних зразків
3.	Призмкові елементи ПАЗ, 10x10x50см	3	Тріщиностійкість центрально розтягнутих залізобетонних елементів до повної втрати зчеплення арматури з бетоном
4.	Призмкові елементи ПАР, 10x10x50см	3	Багаторівневе утворення тріщин в центрально розтягнутих елементах
5.	Балки Б, 20x10 см, $l = 200$ см	3	Багаторівневе утворення тріщин в згинальних залізобетонних елементах

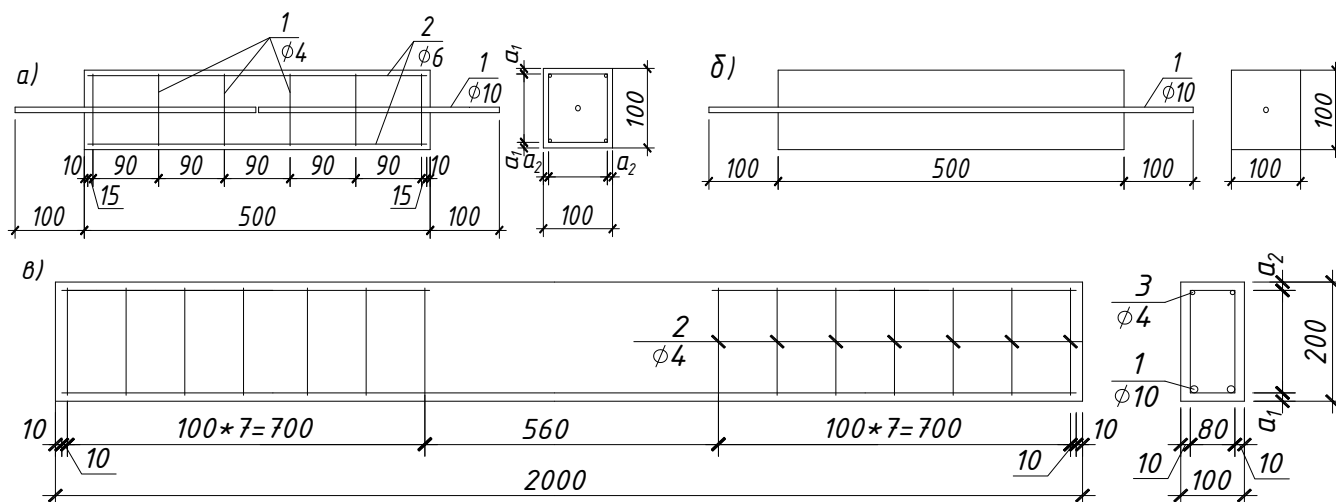


Рисунок 13 – Конструкція та схеми армування дослідних зразків: а) призм ПАЗ; б) призм ПАР; в) балок Б

Деформування розтягнутого бетону контролювали за допомогою індикаторів ІМІГ, встановлених з базою вимірювань 200 мм на бокових гранях дослідних зразків. Деформації арматури в балках вимірювали за допомогою тензометрів Гугенбергера. Розвиток тріщини контролювали візуально за допомогою мікроскопа МПБ-3 з ціною поділки 0,02 мм.

Призми випробовували в універсальній розривній машині УИМ-50. Розгортки утворення тріщин в призмкових зразках показані на рис. 14, а графіки їх розкриття – на рис. 15 і 16. Тут же наведені графіки теоретичних значень ширини розкриття нормальних тріщин, розрахованих за різними методиками, у тому числі і чинних норм: ДБН В.1.2-14-2008, Єврокод-2 і СП 63.13330.2012. Параметри статистичної оцінки вказаних методів розрахунку ширини розкриття тріщин в центрально розтягнутих елементах, наведені в табл. 3 і 4, підтвердили пріоритетність використання розробленої автором загальної методики в практичних розрахунках.

Випробовування залізобетонних балок проводили в спеціальній дослідній установці рамного типу (рис. 17). Графік розкриття тріщин в одній із балок та схема

(розгортка) розвитку тріщин в іншій залізобетонній балці наведені на рис. 18 та 19, відповідно. Деформації найбільш стиснутих бетонних фібр та розтягнутих арматурних стержнів в залізобетонних балках відображені графіками на рис. 20.

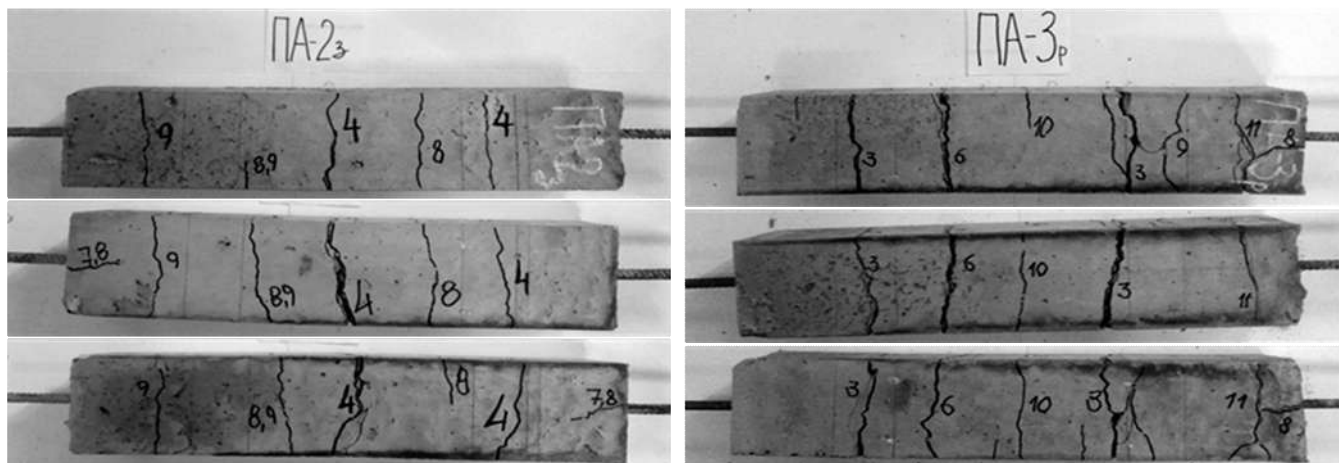


Рисунок 14 – Розгортки утворення і розвитку тріщин в призмах ПА-2з та ПА-3р

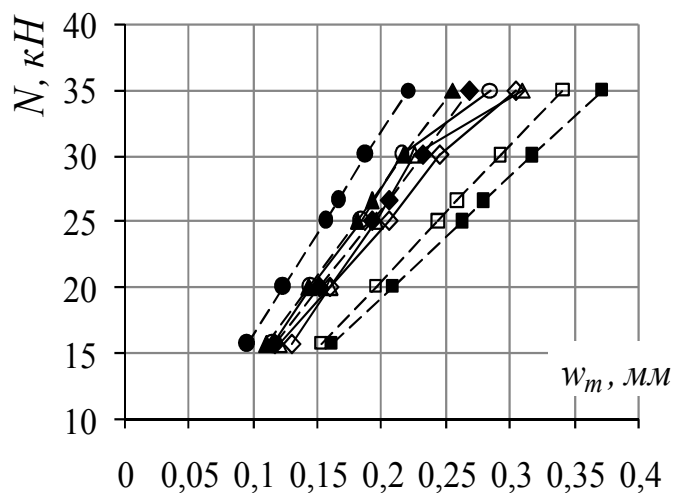


Рисунок 15 – Графіки розкриття тріщин: дослідні в призмах \circ – ПА-1з, \diamond – ПА-2з, Δ – Па-3з; теоретичні за методиками \blacksquare – ДБН, Єврокод-2, \square – СП, \bullet – ДСМ з лінійними τ_{bm} , \blacklozenge – загальною автора, \blacktriangle – спрощеною автора

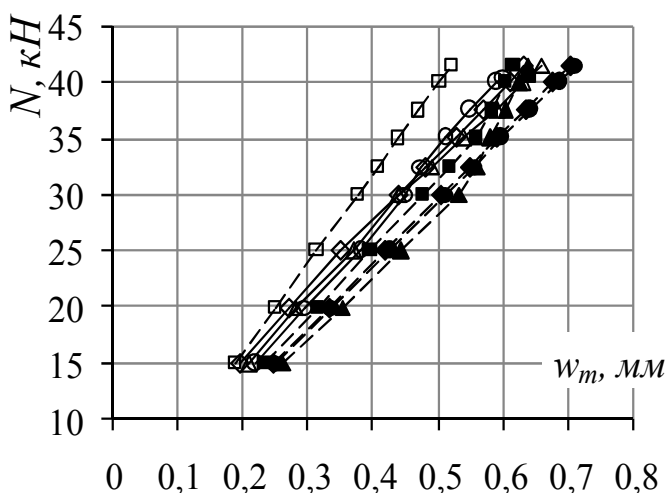


Рисунок 16 – Графіки розкриття тріщин: дослідні в призмах \circ – ПА-1р, Δ – ПА-2р, \diamond – ПА-3р; теоретичні за методиками \blacklozenge – ДБН, Єврокод-2, \square – СП, \blacktriangle – ДСМ з лінійними τ_{bm} , \blacksquare – загальною автора, \bullet – спрощеною автора

Таблиця 3 – Параметри статистичної оцінки методик розрахунку ширини розкриття тріщин в призмах ПАз

Методика розрахунку	Середні відхилення від дослідних даних		Коефіцієнт варіації $v_w, \%$
	арифметичні $\Delta_w, \%$	квадратичні $\sigma_w, \%$	
ДБН, Єврокод-2	33,25	8,29	6,22
СП	17,75	12,79	10,87
ДСМ і лінійних τ_{bm}	21,2	4,9	6,22
загальна автора	3,05	6,3	6,5
спрощена автора	9,14	5,69	6,22

Таблиця 4 – Параметри статистичної оцінки методик розрахунку ширини розкриття тріщин в центрально розтягнутих елементах ПАр

Методика розрахунку	Середні відхилення від дослідних даних		Коефіцієнт варіації $v_w, \%$
	арифметичні $\Delta_w, \%$	квадратичні $\sigma_w, \%$	
ДБН, Єврокод-2	13,93	4,69	4,11
СП	14,85	3,98	4,67
ДСМ і лінійних τ_{bm}	14,24	9,92	8,69
загальна автора	7,32	4,74	4,41
спрощена автора	15,47	4,78	4,14



Рисунок 17 – Вигляд дослідної установки з балкою Б-3

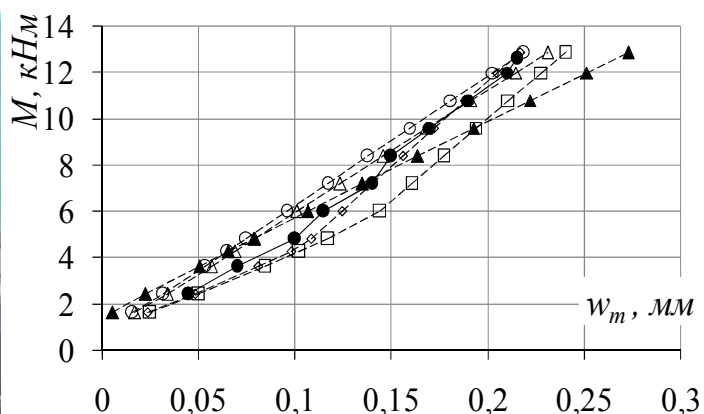


Рисунок 18 – Графіки розкриття тріщин в балці Б-3: ● – дослідні; теоретичні за методиками Δ – ДБН, Єврокод-2, \blacktriangle – СП, \square – ДСМ з лінійними τ_{bm} , \diamond – загальною автора, \circ – спрощеною автора

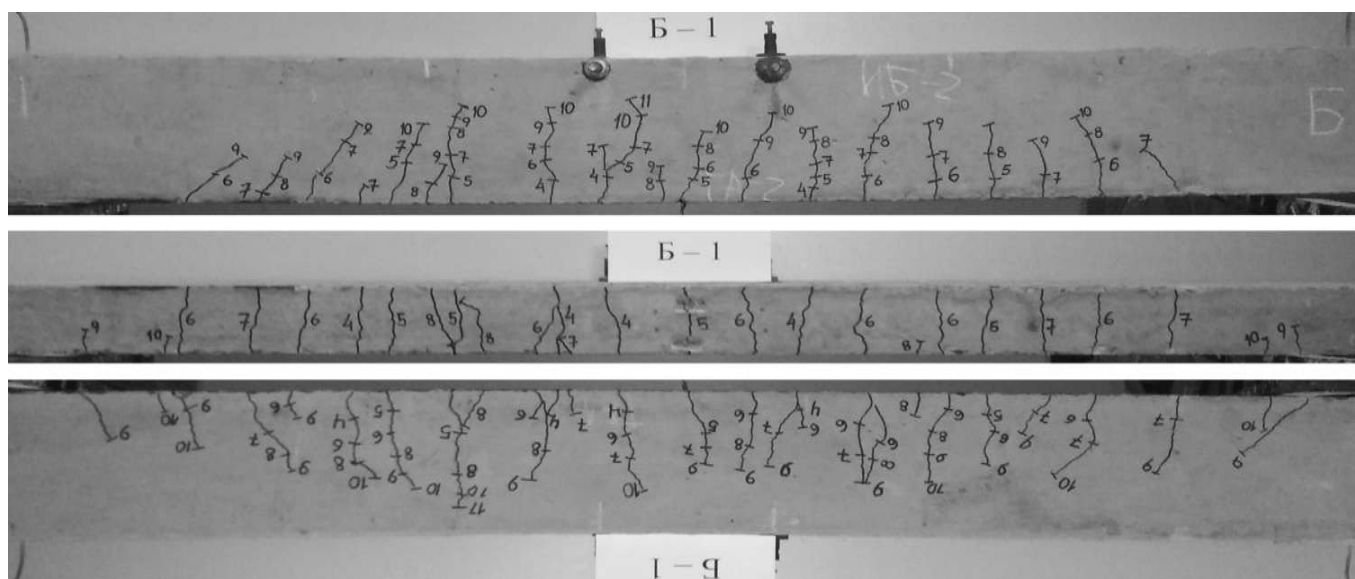


Рисунок 19 – Схема (розгортка) розвитку тріщин в залізобетонній балці Б-1

Параметри статистичної оцінки різних методів розрахунку ширини розкриття тріщин в дослідних балках Б-1...Б-3, наведені в табл. 5, підтвердили пріоритетність використання в практичних розрахунках розробленої автором загальної методики.

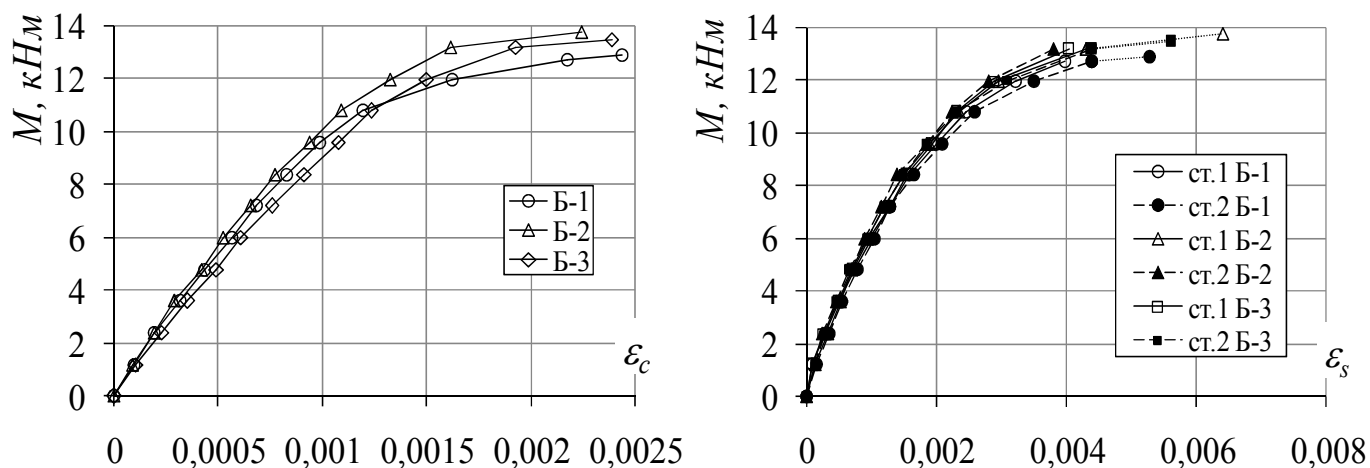


Рисунок 20 – Деформації найбільш стиснутих бетонних фібр та розтягнутих арматурних стержнів в залізобетонних балках

Таблиця 5 – Параметри статистичної оцінки різних методів розрахунку ширини розкриття тріщин в дослідних балках Б-1...Б-3

Методика розрахунку	Середні відхилення від дослідних даних		Коефіцієнт варіації $v_w, \%$
	арифметичні $\Delta_w, \%$	квадратичні $\sigma_w, \%$	
ДБН, Єврокод-2	7,26	10,74	11,58
СП	3,0	23,14	23,87
ДСМ і лінійних τ_{bm}	16,04	5,17	4,46
загальна автора	5,0	6,6	6,29
спрощена автора	12,93	9,57	10,99

На рис. 21 і 22 показано графіки зміни кривини та розвитку прогинів в дослідних балках Б-1...Б-3, а в табл. 6 оцінено способи розрахунку цих характеристик за системою рівнянь МДТТ та за узагальненою діаграмою стану залізобетонного елемента в ДСМ. В табл. 7 наведено збіжність теоретичних та експериментальних значень несучої здатності випробуваних балок.

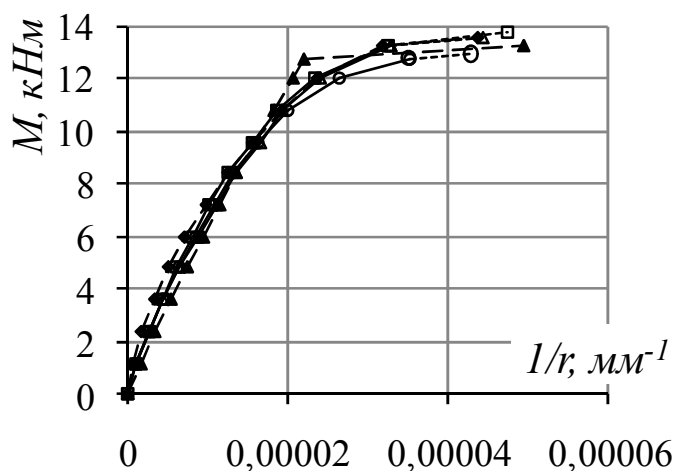


Рисунок 21 – Графіки зміни кривини: дослідні балок \circ – Б-1, \square – Б-2, \triangle – Б-3; теоретичні \blacktriangle – за системою рівнянь МДТТ, \blacklozenge – за діаграмою стану елемента в ДСМ

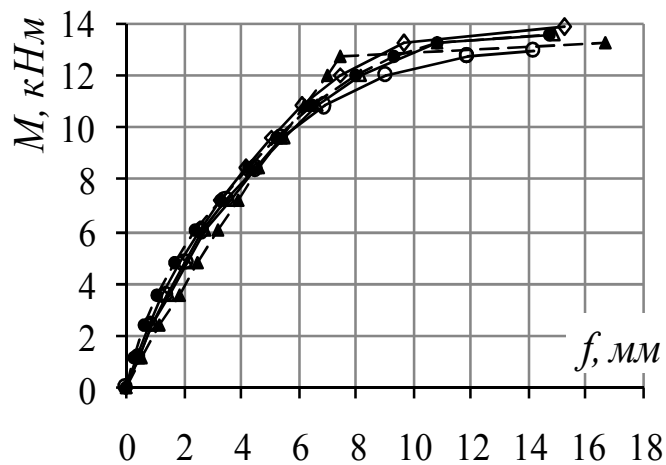


Рисунок 22 – Графіки прогинів: дослідні в балках \circ – Б-1, \diamond – Б-2, \triangle – Б-3; теоретичні \blacktriangle – за системою рівнянь МДТТ, \bullet – за діаграмою стану елемента в ДСМ

Таблиця 6 – Параметри статистичної оцінки різних способів розрахунку кривини/прогинів балок

Спосіб розрахунку	Середні відхилення від дослідних даних		Коефіцієнт варіації $v, \%$
	арифметичні $\Delta, \%$	квадратичні $\sigma, \%$	
за МДТТ	12,92/14,82	21,56/22,37	19,09/19,48
за ДСМ	13,87/12,1	12,14/14,49	14,1/16,47

Таблиця 7 – Збіжність теоретичних та дослідних значень несучої здатності залізобетонних балок

Шифр балки	Значення несучої здатності, кНм		Відношення M_{th} / M_{exp}
	дослідні M_{exp}	теоретичне M_{th}	
Б - 1	12,85	13,1	1,020
Б - 2	13,83		0,947
Б - 3	13,54		0,968

Четвертий розділ присвячено прикладному застосуванню та статистичній оцінці розроблених методів розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів.

Розроблена модель і методика розрахунку енергетичного ресурсу залізобетонних елементів конструкцій за такими параметрами натурних досліджень, як прогин та крок і ширина розкриття тріщин. В їх основу закладається гіпотеза незмінності потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента, витраченої на його руйнування $W = const$. Тобто залишковий ресурс залізобетонного елемента можна пов'язати з його кривиною $1/r_i$ (рис. 23) та визначити за доволі простим виразом

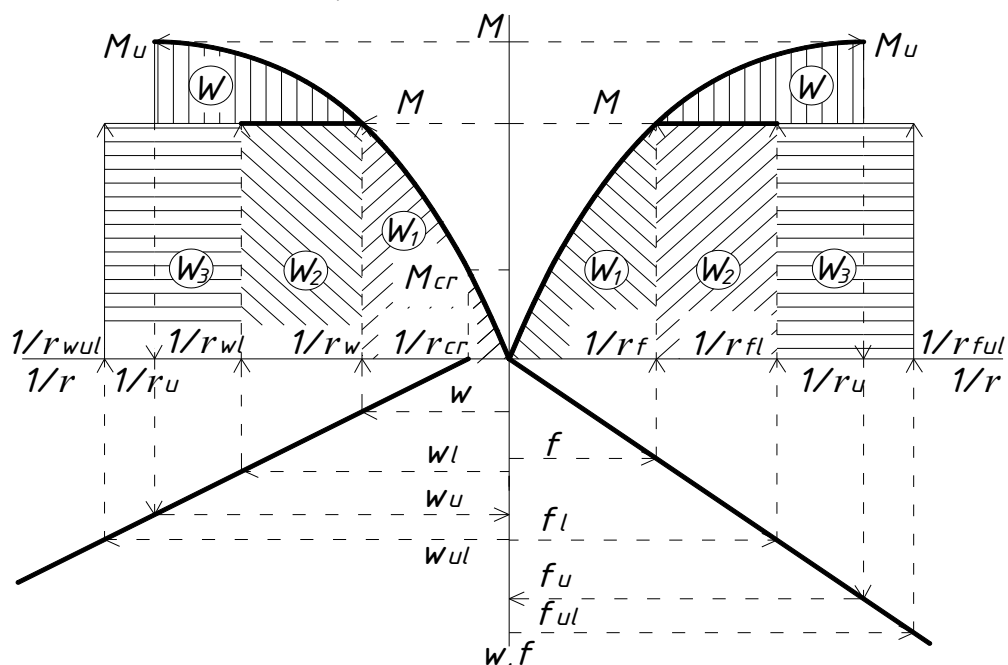


Рисунок 23 – До визначення потенціальної енергії деформування згинального залізобетонного елемента за дії навантажень різної тривалості

$$W_3 = W - W_1 - W_2, \quad (16)$$

де

$$W = \int_0^{1/r_u} M d(1/r) = \frac{M_u \cdot (1/r_u)}{(K-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln(K-1) \right], \quad (17)$$

$$W_1 = \frac{M_u}{(K-2)} \left[-\frac{(1/r_f)^2}{2 \cdot (1/r_u)} + \frac{(1/r_f) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_u) \cdot \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left(1 + (K-2) \frac{1/r_f}{1/r_u} \right) \right], \quad (18)$$

$$W_2 = M \cdot (1/r_{f1} - 1/r_f); \quad K = D_0 \cdot (1/r)_u / M_u. \quad (19)$$

Придатність запропонованої моделі та розроблених методів розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин перевірена на залізобетонних елементах, випробуваних автором та закордонними дослідниками. Найважливіші характеристики дослідних зразків наведені в табл. 8. Результати перевірки деталізовані на рис. 24 і 25 та наведені в табл. 9 і 10.

Таблиця 8 – Найважливіші характеристики дослідних зразків

Автори дослідів		Makhlouf H., Malhas F.	Pundinaitė M.	Ivanchev I.Y.	
Найважливіші характеристики та параметри випробування дослідних зразків	рік		1996	2010	2018
	розміри, мм	h	400	298-305	275-300
		b	600	275-285	150
		l_o	1900	3000	3000
	бетон, МПа	f_{ck}	40	43,7-49,5	25
		f_{ctk}	2,5	2,9	1,8
		$E_c \cdot 10^3$	33,4	34,1-35,3	23
	Арматура, МПа (і мм ²)	f_{yk}	430	578-632	500
		$E_s \cdot 10^3$	200	199,3-223,5	190
		A_s	1249-2822	229,3-776,8	226,2-508,9

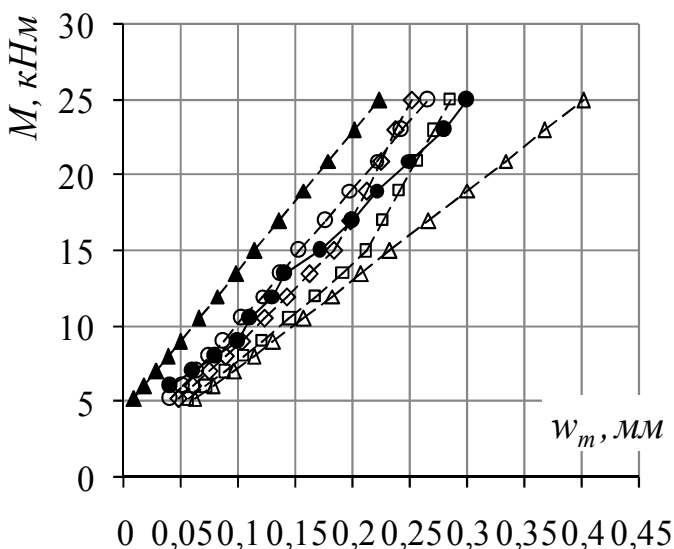


Рисунок 24 – Графіки розкриття тріщин в балці А-1 [Ivanchev I.Y.]: ● – дослідні; теоретичні за методиками Δ – ДБН, Єврокод-2, ▲ – СП, □ – ДСМ з лінійними τ_{bm} , ◇ – загальною авторською, ○ – спрощеною авторською

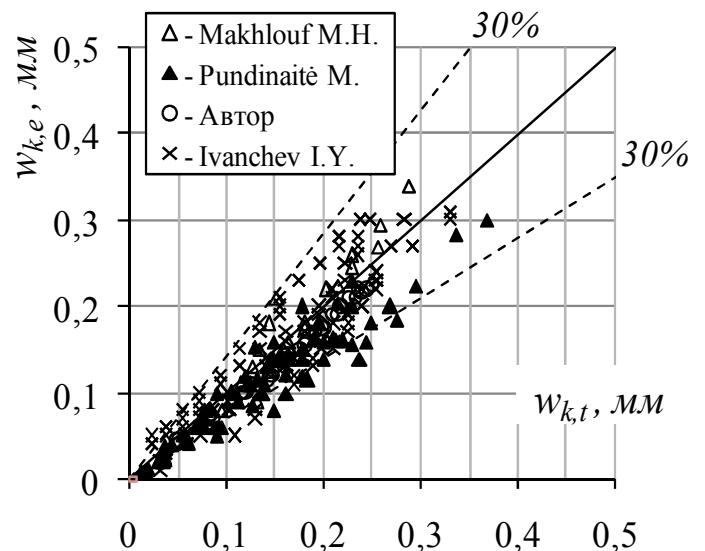


Рисунок 25 – Збіжність теоретичних (за загальною авторською методикою) та дослідних значень ширини розкриття тріщин в згинальних залізобетонних елементах, випробуваних різними дослідниками

Таблиця 9 – Порівняння теоретичних та дослідних значень ширини розкриття нормальних тріщин

Автори дослідів, кіл-сть зразків (вимірювань)		Makhlouf H., Malhas F., 3 зр.(21 вимір.)	Pundinaitė M., 10 зр. (66 вимір.)	Ivanchev I.Y., 12 зр. (142 вимір.)	Автор 3 зр. (30 вимір.)	Загалом, 28 зр. (259 вимір.)	
Відхилення (%) експериментальних даних від розрахункових за методикою	ДБН, Єврокод	Δ	59,81	34,98	22,36	7,26	26,86
		σ	29,87	18,99	25,21	10,74	22,33
		ν	18,69	14,07	21,82	11,58	18,41
	СП	Δ	15,26	19,67	40,42	3,0	28,76
		σ	18,77	10,92	14,44	23,14	14,9
		ν	22,15	13,59	24,34	23,87	21,37
	ДСМ і лінійних τ_{bm}	Δ	18,5	28,13	22,2	16,04	22,70
		σ	18,73	20,27	29,39	5,17	23,40
		ν	15,81	15,82	24,05	4,46	19,02
	загальна автора	Δ	0,0	15,3	3,98	5,0	6,67
		σ	15,97	15,1	16,78	6,6	15,11
		ν	15,97	13,1	16,13	6,3	14,21
	спрощена автора	Δ	8,42	2,63	18,38	12,93	12,93
		σ	14,68	11,57	19,39	9,57	15,88
		ν	16,04	11,88	20,36	10,99	16,76

Таблиця 10 – Забезпеченість точності розрахунків ширини розкриття тріщин

Методика	Кіл-ть зразків (дослідів)	Оцінювані параметри	Забезпеченість точності у %				
			± 5	± 10	± 15	± 20	± 25
ДБН, Єврокод-2	28 (259)	$w_{k,th} / w_{k,ex}$	17,7	34,3	49,8	63,2	73,7
СП			26,3	49,7	68,6	82,0	90,7
ДСМ і лінійних τ_{bm}			16,9	33,1	47,9	60,8	71,4
загальна автора			25,9	49,1	67,9	81,5	90,2
спрощена автора			24,7	47,1	65,5	79,2	88,5

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Завдяки результатам проведених експериментально-теоретичних досліджень розв'язано важливе науково-прикладне завдання з моделювання та розрахунку багаторівневого утворення і розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах конструкцій з позицій локального порушення зчеплення арматури з бетоном. Його вирішення забезпечено тим, що:

1. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном, що побудована за допомогою

- нелінійної функції середніх напружень їхнього зчеплення, дозволяє достовірно оцінювати спільну взаємодію арматури з бетоном на будь-якій стадії деформування залізобетонних елементів конструкцій.
2. Отриману нелінійну функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном можна вважати загальною, оскільки вона є багатofакторною та дозволяє розраховувати величину зусилля їхньої механічної взаємодії у найпростіший спосіб на всьому діапазоні деформування залізобетонних елементів без виключення.
 3. Розроблена модель багаторівневого утворення нормальних тріщин узгоджена з узагальненою моделлю зчеплення арматури з бетоном за критерієм локального порушення такого зчеплення та дозволяє застосовувати гіпотезу Томаса у спрощеній формі.
 4. Отримані нові експериментальні дані засвідчують, що на кількість рівнів утворення нормальних тріщин та на відповідну їм величину рівнів завантаження найбільше впливають вид напружено-деформованого стану залізобетонних елементів та вид профілю арматури.
 5. Розроблена загальна методика розрахунку основних параметрів багаторівневого утворення нормальних тріщин розвиває деформаційно-силову модель та загальну теорію деформування залізобетонних елементів в частині їх тріщиностійкості. Вона дозволяє суттєво підвищити точність розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах ($\Delta = 6,67\%$, $\sigma = 15,11\%$) порівняно з нормативною ($\Delta = 26,86\%$, $\sigma = 22,33\%$).
 6. Спрощена методика розрахунку основних параметрів багаторівневого утворення нормальних тріщин вирізняється відносною простотою, відносно високою продуктивністю та точністю ($\Delta = 12,93\%$, $\sigma = 15,88\%$), а тому може бути рекомендована до використання в якості експрес-методу оцінки параметрів тріщиностійкості залізобетонних елементів.
 7. Пов'язування точної та спрощеної методик розрахунку параметрів тріщиностійкості залізобетонних елементів з узагальненими діаграмами їх стану « $M - 1/r$ » дозволяє суттєво зменшити кількість ітераційних операцій та позбутися використання низки емпіричних параметрів і коефіцієнтів.
 8. Запропоновану методику розрахунку енергетичного ресурсу залізобетонних елементів конструкцій можна вважати узагальненою, оскільки вона розроблена в рамках деформаційно-силової моделі опору зазначених елементів силовим впливам та спрямована на її подальший розвиток.
 9. Достовірність розроблених методів розрахунку багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин підтверджено експериментально-статистичною оцінкою результатів розрахунку за тріщиностійкістю залізобетонних елементів, випробуваних не тільки автором, але й іншими вітчизняними і закордонними дослідниками.
 10. Розроблені методи розрахунку основних параметрів багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин пройшли апробацію при проектуванні реальних об'єктів та використані в навчальному процесі при підготовці фахівців будівельного профілю.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У наукових періодичних виданнях іноземних держав та у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Romashko-Maistruk O. V. Fundamentals of the energy model of deformation of reinforced concrete elements and structures. *Science and education a new dimension. Natural and technical science*. 2020. VIII (29), Iss. 238. P.12-15. (Index Copernicus – DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-238VIII29-02>).
2. Romashko O. V. and Romashko V. M. Model of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. No. 1. 012069. (SCOPUS – DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012069>).
3. Romashko V., Romashko O. Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02028. (SCOPUS – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002028>).
4. Ромашко-Майструк О. В. Дослідження рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах. *Наук.-техн. зб. «Комунальне господарство міст»*. 2020. Вип. 4(157). С. 18-24. (Index Copernicus – DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-4-157-18-24>).
5. Ромашко-Майструк О. В. Моделювання зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2020. Вип. 190. С. 35-41. (Index Copernicus – DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213925>).
6. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Розрахунок енергетичного ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2019. Вип. 186. С. 23-30. (Index Copernicus – DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186169>).
7. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 92-99. ((Index Copernicus – DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147756>).

у наукових фахових виданнях України:

8. Журавський О., Ромашко-Майструк О. Експериментальні дослідження багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах. *Будівельні конструкції: теорія і практика*. 2019. Вип. 4. С. 28-38. (DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.4.2019.28-38>).
9. Ромашко-Майструк О. В. Загальна методика розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. 2020. Вип. 38. С. 339-346.
10. Ромашко О. В., Ромашко В. М., Журавський О. Д. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. 2019. Вип. 37. С. 214-221. (<http://bud.nuwm.edu.ua/index.php/budres/article/view/319>)

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. VII-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (14-16 листопада 2018, м. Харків).
http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2018.pdf
2. III-я міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (26-28 вересня 2019, м. Одеса).
https://nubip.edu.ua/sites/default/files/programa_konf_ekspl_ta_rekonstr_2019_1.pdf
3. VIII-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (20-22 листопада 2019, м. Харків).
http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2019_part2.pdf
4. VII-а міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки» (12-15 травня 2020, м. Одеса).
<https://drive.google.com/file/d/1RIruKchAIDCfvCfEtoi33HkeKcIpoLSx/view>
5. 3-я міжнародна науково-технічна конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (26-27 травня 2020, м. Львів).
http://www.lnau.edu.ua/lnau/attachments/6323_%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8.pdf

АНОТАЦІЯ

Ромашко-Майструк О. В. Опір залізобетонних елементів багаторівневого утворенню нормальних тріщин. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2021.

Дисертація присвячена розробці загальної методики розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням багаторівневого утворення нормальних тріщин. Вона доповнює та розвиває узагальнену деформаційно-силову модель опору залізобетонних елементів силовим впливам в питаннях утворення нормальних тріщин з урахуванням особливостей зчеплення арматури з бетоном. Запропоновано спрощений метод розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів, який пропонується використовувати у якості експрес-методу.

Вперше запропоновано енергетичний критерій визначення залишкового ресурсу залізобетонних елементів конструкцій за конкретно встановленими параметрами їх деформування. На його основі розроблено загальну модель та методику розрахунку енергетичного ресурсу залізобетонних елементів за такими деформаційними параметрами, як прогин, крок і ширина розкриття тріщин, тощо. Це є особливо актуальним для оцінювання та прогнозування реального напружено-деформованого стану конструктивних елементів в проєктованих та експлуатованих будівлях і спорудах.

Проведено експериментально-статистичну оцінку та порівняння розроблених методів розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин з іншими методами, у тому числі і нормативними.

Ключові слова: залізобетонні елементи, арматура, бетон, зчеплення, тріщини, рівні утворення тріщин, крок та ширина тріщин, енергетичний критерій, залишковий ресурс.

АННОТАЦИЯ

Ромашко-Майструк Е. В. Сопротивление железобетонных элементов многоуровневому образованию нормальных трещин. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно, 2021.

Диссертация посвящена разработке общей методики расчета трещиностойкости железобетонных элементов с учетом многоуровневого образования нормальных трещин. Она дополняет и развивает обобщенную деформационно-силовую модель сопротивления железобетонных элементов силовым воздействиям в вопросах образования нормальных трещин с учетом особенностей сцепления арматуры с бетоном. Предложен упрощенный метод расчета трещиностойкости железобетонных элементов, который предлагается использовать в качестве экспресс-метода.

Впервые предложен энергетический критерий определения остаточного ресурса железобетонных элементов конструкций по конкретно установленным параметрам их деформирования. На его основе разработана общая модель и методика расчета энергетического ресурса железобетонных элементов по таким деформационным параметрам, как прогиб, шаг и ширина раскрытия трещин. Это особенно актуально для оценки и прогнозирования реального напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов в проектируемых и эксплуатируемых зданиях и сооружениях.

Проведено экспериментально-статистическую оценку и сравнение разработанных методов расчета многоуровневого образования нормальных трещин с другими методами, в том числе и нормативными.

Ключевые слова: железобетонные элементы, арматура, бетон, сцепление, трещины, уровни образования трещин, шаг и ширина трещин, энергетический критерий, остаточный ресурс.

ABSTRACT

Romashko-Maistruk O. V. Resistance of reinforced concrete elements to the multilevel formation of normal cracks. – On the rights of manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Science Degree in Specialty 05.23.01 «Construction structures, buildings and structures» (192 – Construction and civil engineering). – National University of Water Management and Nature Recourses Use, Rivne, 2021.

Thesis is devoted to the development of a general method of calculating the fracture resistance of structural reinforced concrete elements, taking into account the multilevel formation and the opening of normal cracks. The dissertation work supplements and develops a generalized deformation and force model of reinforced concrete elements resistance by force influences in the questions of normal cracks formation and development taking into account features of reinforcement with concrete coupling. In this case, all calculations of reinforced concrete elements are performed taking into account their nonlinear deformation by solving a closed system of well-known static, geometric and physical relationships of the deformed solid body mechanics involving the defining hypotheses of the deformation and force model.

A simplified method for calculating the fracture toughness of reinforced concrete structural elements with regard to the multilevel formation of normal cracks, which is proposed to be used as an express method, is also shown.

The 4 main stages and directions of development of the theory of reinforcement with concrete coupling in concrete elements are highlighted. Here the detailed classification of reinforcement with concrete coupling models according to their scale and structure, according to concrete and reinforcement representation schemes, according to schemes, character of destruction and mathematical solution of their interaction is made. Also, a classification and critical analysis of the most known to date are given: diagrams and criteria of reinforcement with concrete adhesion strength, analytical dependences for determination of limit and average stresses of reinforcement with concrete adhesion. The main advantages and disadvantages of the considered models, diagrams, criteria and dependencies that describe the interaction of reinforcement with concrete in reinforced concrete elements are identified and evaluated.

The development peculiarities of the general theory of reinforced concrete structural elements fracture toughness are given in brief, taking into account the basic provisions of the reinforcement with concrete adhesion theory. The classification and critical analysis of recently proposed normal cracks multilevel formation models are presented. The focus is on proposals for calculating the distances between cracks and their opening width. A critical analysis of the studies results in which these characteristics directly or indirectly correlate with the reinforcement to concrete adhesion parameters is made. The main disadvantages of the most well-known dependences on step and crack opening width determination in reinforced concrete elements are established.

The generalized model of reinforcement with concrete coupling is based on the nonlinear function of specified coupling average stresses, which allows in the easiest way to control the efforts of reinforcement with concrete interaction at any stage of reinforced concrete elements deformation. The relationship between the average adhesion stresses of the reinforcement with concrete and the normal stresses in the reinforcement itself is presented for the first time by a nonlinear function and thoroughly substantiated not only by the results of our own experimental-theoretical studies, but also by the results of numerous studies by domestic and foreign authors.

A general force criterion for the reinforcement with concrete interaction is proposed, which allows to determine or predict the size and number of levels of normal cracks formation in reinforced concrete elements. The criterion for the normal cracks formation by the limiting efforts of the reinforcement with concrete interaction can be considered as universal in the calculation of any level cracks. Together with the generalized state diagram of the reinforced concrete element $M - 1/r$, it provides the versatility of the developed cracking model, since it allows to calculate from a single methodological position the moment of normal cracks formation, their step and opening width at any stage of reinforced concrete element deformation.

The general calculation method of the normal cracks opening width from the standpoint of consistent multilevel accumulation of concrete and reinforcement mutual displacements has been improved, which actually corresponds to the real character of the cracks development in reinforced concrete elements. The technique of determining distances between normal cracks of any levels has been further developed due to the use of variable average stresses of reinforcement with concrete adhesion. This, in turn, allowed us to refuse the use a number of empirical parameters and coefficients.

For the first time, the energy criterion for determining the residual resource of reinforced concrete structural elements according to the specified parameters of their deformation is proposed. On the it's basis the general model and calculation method of reinforced concrete elements energy (deformation and force) resource according to such deformation parameters as bending, step and crack opening width, etc. are developed. The method of calculating the reinforced concrete elements residual resource is constructed in such a way that the field studies results can be directly embedded in the generalized state diagrams of those structural elements that need appropriate reinforcement. And this is especially relevant for the assessment and prediction of the real stress-strain state of structural elements in designed and operated buildings and structures.

The reliability of the developed "accurate" and simplified methods for calculating the formation and opening of normal cracks is statistically substantiated and evaluated according to the experimental studies results of other, mainly foreign authors. Comparison of the developed calculation methods with the methods of other authors and current regulatory documents, including other countries, was made.

The obtained results of author experimental-theoretical researches are tested by separate project organizations in the calculations of the reinforced concrete overlappings basic elements of different purpose objects and are introduced into the higher education institutions educational process in the construction profile specialists preparation.

Keywords: reinforced concrete elements, reinforcement, concrete, adhesion, cracks, levels of crack formation, step and width of cracks, energy criterion, residual resource.

Підписано до друку 14.01.2021 р. Формат 60x84 1/16.
Папір офсет. Гарнітура «Times New Roman». Друк офсет.
Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 0,9. Наклад 100 пр. Зам. 16.
Друкарня видавництва «Волинські обереги».
33028 м. Рівне, вул. 16 Липня, 38; тел./факс: (0362) 62-03-97.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єкта
видавничої справи ДК № 270 від 07.12.2000 р.
33028 м. Рівне, вул. 16 Липня, 38; тел./факс: (0362) 62-03-97.