

Міністерство освіти і науки України
Національний авіаційний університет

ДМИТРЕНКО ЄВГЕН АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 624.012.045

**РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ЗЧЕПЛЕННЯ У ЗАЛІЗОБЕТОНІ
ЗА НАЯВНІСТЮ ДИСКРЕТНИХ ТРИЩИН**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Колчунов Володимир Іванович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Семко Олександр Володимирович,
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка,
завідувач кафедри архітектури та міського будівництва;

кандидат технічних наук,
Гензерський Юрій Валерійович,
Товариство з обмеженою відповідальністю
«ЛІРА-САПР», заступник директора

Захист відбудеться “31” травня 2017 р., о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.12 у Національному авіаційному університеті (НАУ) за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 5, ауд. 5.303.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету (НАУ) за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий “27” квітня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доц.

О.В. Степанчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні роки вдосконалення залізобетонних конструкцій пов'язано з проблемою зчеплення арматури з бетоном, яка має фундаментальне значення для теорії залізобетону та практики будівництва.

Спільна робота арматури з бетоном, яка забезпечується силами зчеплення, є основною передумовою роботи залізобетону як конструкційного матеріалу. Таким чином зчеплення арматури з бетоном грає важливу роль у забезпеченні міцності, жорсткості та тріщиностійкості залізобетонних конструкцій.

До теперішнього часу задача взаємодії арматури та бетону не має задовільного рішення, – у різних дослідників епюри розподілу деформацій зчеплення у цілій низці випадків значно відрізняються одна від одної; не вивчена нисхідна гілка деформування при наявності деформаційних впливів; відсутня достатньо обґрунтована теорія зчеплення.

Сили зчеплення створюють складний напружено-деформований стан в армованих елементах і конструкціях. Точність визначення основних параметрів зчеплення у залізобетонному елементі (зусилля та податливість стержнів, довжина зчеплення, податливість та зусилля у стержні, напруження і деформації зчеплення) у значній мірі залежить від урахування реальних режимів навантажень та умов експлуатації конструкцій, а також від досконалого вибору розрахункових схем, які найповніше враховували б одночасно дію поздовжніх і поперечних напружень при взаємодії арматури з бетоном.

Отже, проблема зчеплення є найвагомішою в опорі залізобетонних конструкцій силовим і деформаційним впливам та тема обраних досліджень є **актуальною**, має теоретичне значення і практичне застосування при проектуванні будівель і споруд із залізобетону з несучими стінами, балок з отворами і колон, конструкцій будь-яких об'єктів при наявності дефектів і пошкоджень у них.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету в рамках наукових досліджень кафедри за держбюджетними темами № 6/10.01.02 «Новітні технології проектування залізобетонних конструкцій, що зводяться та експлуатуються в складних інженерно-геологічних умовах» (номер державної реєстрації 0111U004461), № 6/10.01.02 «Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу об'єктів цивільного та транспортного будівництва» та № 36/10.01.02 «Побудова теорії опору складених залізобетонних конструкцій на основі механіки руйнування залізобетону та її комп'ютерне моделювання».

Тема дисертаційної роботи відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики у галузі оцінювання технічного стану будівель та споруд відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 5 травня 1997 року №409 «Про забезпечення надійності й безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж».

Метою дослідження є побудова аналітичної моделі зчеплення арматури з бетоном у нелінійній постановці за наявністю дискретних тріщин при деформаційних впливах із урахуванням нисхідної гілки деформування.

Задачі дослідження:

- розробити аналітичну модель зчеплення арматури з бетоном у нелінійній постановці із побудовою загальної системи з нелінійних диференційних рівнянь;

- удосконалити методику проведення експерименту і провести експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном за деформаційними впливами при центральному (позацентровому) розтягу арматурного стержня у бетоні; витягуванні та вдавлюванні арматурного стержня з бетону (у бетон) та зсуві вздовж дискретної тріщини із варіюванням довжини анкерування, класів бетону (арматури), діаметрів арматури та урахуванням нисхідної гілки деформування;

- виконати порівняльний аналіз аналітичних, експериментальних та чисельних досліджень за різними методиками розрахунку;

- виконати впровадження результатів проведених досліджень в учбовий процес, практику будівництва та проектування.

Об'єкт дослідження: опір залізобетонних конструкцій промислових і цивільних будівель та споруд при взаємодії арматури з бетоном.

Предмет дослідження: зчеплення арматури з бетоном у залізобетонних конструкціях при деформаційних впливах.

Методи дослідження. Використовується експериментально-теоретичний метод. Під час виконання теоретичних і чисельних досліджень, використані загальні методи механіки твердого деформованого тіла, теорії залізобетону та програмні комплекси, зокрема ПК «ЛІРА-САПР».

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- вперше запропоновано аналітичну модель зчеплення арматури з бетоном у нелінійній постановці із побудовою системи замкнених нелінійних рівнянь, два із яких є диференційними рівняннями першого порядку;

- удосконалено методику і вперше проведено експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном при деформаційних впливах із урахуванням нисхідної гілки деформування у бетоні при центральному та позацентровому розтягу арматурного стержня; витягуванні арматурного стержня з бетону; вдавлюванні арматурного стержня у бетон та зсуві вздовж дискретної тріщини;

- отримано результати порівняльного аналізу експериментальних, аналітичних і чисельних досліджень із різними способами моделювання зчеплення арматури з бетоном із використанням ПК «Ліра-САПР».

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропонована аналітична модель зчеплення арматури з бетоном у залізобетонних конструкціях за наявністю дискретних тріщин та урахуванням параметрів і особливостей деформування арматури і бетону дозволяє отримати більш достовірні рішення та виявити резерви для раціонального використання матеріалів.

Пропозиції дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні залізобетонних конструкцій виробничих будівель підприємства Будівельний комбінат «Прогрес» по вул. Запорізькій, 14 у м. Бориспіль Київської області; при проектуванні та розрахунку залізобетонних конструкцій будівлі головного корпусу Центру для тимчасового утримання нелегальних мігрантів, який знаходиться у межах Прибужанської сільської ради Вознесенського району Миколаївської області у 2015р., та використовуються в навчальному процесі Національного авіаційного університету при викладанні дисциплін «Будівельні конструкції», «Залізобетонні та кам'яні конструкції» та «Реконструкція будівель і споруд аеропортів» для студентів, які навчаються за спеціальністю "Промислове і цивільне будівництво".

Особистий внесок здобувача:

– розробка аналітичної моделі для визначення параметрів зчеплення арматури з бетоном у нелінійній постановці із побудовою системи нелінійних диференціальних рівнянь;

– удосконалено методикау і вперше проведені експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном при деформаційних впливах із урахуванням нисхідної гілки деформування у бетоні при центральному та позацентровому розтягу арматурного стержня; витягуванні арматурного стержня з бетону; вдавлюванні арматурного стержня у бетон та зсуві вздовж дискретної тріщини;

– удосконалені чисельні моделі зчеплення арматури з бетоном, а також отримані результати порівняльного аналізу аналітичної та чисельних моделей із експериментальними даними та існуючими методиками розрахунку з використанням ПК «Ліра-САПР».

Особистий вклад здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві: у роботі [1] – розроблені нелінійні аналітичні залежності та побудована аналітична модель для визначення параметрів зчеплення арматури з бетоном залізобетонних конструкцій будівель та споруд; у [2] – чисельне моделювання нелінійної плоскої задачі зчеплення арматури з бетоном за допомогою ПК «Ліра-САПР»; у [3] – виконаний порівняльний аналіз запропонованої аналітичної моделі із скінченно-елементними стержньовими моделями, розрахованими у ПК «Ліра-САПР»; у [4] – застосування аналітичної моделі зчеплення і нелінійної податливості арматурних зв'язків при розкритті дискретних тріщин у залізобетонних конструкціях; у [5] – реалізація скінченно-елементних плоских моделей нелінійної задачі зчеплення арматури з бетоном та їх порівняння і аналіз; у [6] – розробка методикау експерименту зчеплення арматури з бетоном при витягуванні/вдавлюванні арматурного стержня із бетону/у бетон із урахуванням нисхідної гілки деформування; в [7] – отримання експериментальних результатів зчеплення арматури з бетоном при витягуванні та вдавлюванні під дією деформаційного навантаження, побудові відповідних залежностей та їхньому чисельному аналізі; у [8] – отримання експериментальних результатів параметрів зчеплення арматури з бетоном та їх чисельний аналіз; у [9] – отримання аналітичних залежностей для визначення жорсткості арматурних зв'язків при моделюванні дискретних тріщин у

залізобетонних конструкціях; у [10] – розроблені нелінійні аналітичні залежності для визначення параметрів зчеплення арматури з бетоном, виконане їхнє співставлення з результатами чисельних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися: міжкафедральному семінарі кафедри комп'ютерних технологій будівництва та кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів Навчально-наукового інституту Аеропортів Національного авіаційного університету (м. Київ, 2 березня 2017 р.), на кафедрі комп'ютерних технологій будівництва Навчально-наукового інституту Аеропортів Національного авіаційного університету (м. Київ, 28 лютого 2017 р.); II Міжнародній науково-практичній виставці-конференції молодих учених та студентів „Інновації у будівництві”, (20 – 22 жовтня 2016 р., м. Луцьк), XII Міжнародній науково-технічній конференції "Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація", (17-21 жовтня 2016 р., м. Полтава); The Seventh World Congress “Aviation in the XXI-st Century”. Safety in Aviation and Space Technologies / Symposium 10. Problems of development of the modern airport. (September 19-21, 2016, National Aviation University, Kyiv, Ukraine); XVI Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів "Політ. Сучасні проблеми науки" (6–8 квітня 2016 р., м. Київ); Міжнародній студентській науково-технічній конференції ДонНТУ «Математична культура інженера» (14 травня 2014 р., м. Донецьк); XIII Міжнародній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ДонНАБА «Будівлі та конструкції з використанням нових матеріалів та технологій» (24–25 квітня 2014 р., м. Макіївка).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано автором самостійно й у співавторстві у 10 наукових працях, з яких 8 наукових праць у спеціалізованих фахових виданнях, що затверджені МОН України, в тому числі 3 наукові статті, що включені до міжнародних наукометричних баз та 2 – за матеріалами конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із 4 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури із 188 найменувань, 2 додатків. Повний обсяг роботи складає 218 сторінок, у тому числі 142 сторінки основного тексту, який ілюструється 111 рисунками, містить 9 таблиць, 23 сторінки списку використаної літератури та 10 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** проведений аналіз робіт, в яких розглянуто проблематику зчеплення арматури з бетоном та тріщиностійкості залізобетонних конструкцій.

Спільна робота арматури з бетоном, яка забезпечується зчепленням, є основною передумовою роботи залізобетону як конструкційного матеріалу. Зчеплення арматури з бетоном грає важливу роль у забезпеченні міцності, жорсткості і тріщиностійкості залізобетонних конструкцій.

Проблемі зчеплення арматури з бетоном приділяється значна увага. Для вирішення цього завдання у нашій країні та за кордоном проведено велику

кількість експериментально-теоретичних досліджень, серед яких роботи О. Б. Голишева, О. С. Городецького, М. І. Карпенка, О. О. Оатула, М. М. Холмянського, Є. М. Бабича, А. М. Бамбури, В. С. Дорофєєва, В. І. Колчунова, А. М. Павлікова, М. В. Савицького, О. В. Семка, В. М. Тихомирова, В. М. Першакова, І. О. Рудного, А. В. Беніна, Ю. В. Гензерського, Дж. С. Круза, С. Дельгадо, В. В. Бедарева, М. Т. Гомеса Барбози та ін.

В останні роки у дослідженнях М.І. Карпенка зчеплення арматури і бетону та їхнє взаємне зміщення розглядається із урахуванням появи так званих кільцевих тріщин, які раніше були виявлені Я. Гото та іншими. Г.М. Шоршнєв, Г.П. Яковленко, А.В. Трофімов вирішували задачу зчеплення з позицій теорії складених стрижнів А.Р. Ржаніцина. Питання повзучості зчеплення бетону і арматури вперше отримала першу теоретичну апробацію в умовах лінійної повзучості в роботах О.О. Оатула та ін. Проводяться також експериментально-теоретичні дослідження зчеплення нових видів арматури, зокрема, арматури серповидного профілю (класу А500С) та інших профілів, гнучких анкерів у сталезалізобетонних конструкціях.

До теперішнього часу задача взаємодії арматури і бетону, яка має велике значення для будівельної практики, в тій чи іншій мірі вирішена, проте не маємо достатньо обґрунтованої і добре розробленої теорії зчеплення. Значний внесок у створення теорії зчеплення і у рішення її задач внесли такі вчені, як О. О. Гвоздев, Ю. А. Іващенко, М. І. Карпенко, В. М. Кольнер, Ю. Ф. Кутін, М. М. Мулін, О. О. Оатул, М. М. Холмянський, К. Г. Пахомова та ін.

Результати експериментально-теоретичних досліджень задачі зчеплення арматури з бетоном показують, що вид залежності напружень зчеплення τ від зсуву арматури s відносно бетону змінюється від перерізу до перерізу, тобто залежить від положення розглянутого перерізу по довжині зразка. При цьому розподіл напружень зчеплення τ від зсуву арматури s у різних авторів не збігається не тільки кількісно, але в ряді випадків і якісно.

Дослідники, які вивчають проблему зчеплення арматури з бетоном, відзначають наступне: наявність певної невизначеності підходів до вирішення цієї задачі і відсутність єдиної теоретично обґрунтованої методики розрахунку; істотного уточнення розрахунку, очевидно, можна досягти тільки при врахуванні деформаційного впливу, пластичної роботи бетону і нисхідної гілки деформування.

Значне неспівпадіння результатів при порівнянні законів зчеплення арматури з бетоном вказує на необхідність проведення подальших досліджень зчеплення з'єднання «бетон – арматура», а також на актуальність використання у розрахунках залізобетонних конструкцій експериментальних даних при деформаційних впливах.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений аналітичній моделі зчеплення арматури з бетоном, удосконаленій автором.

При розрахунку статично визначених і невизначених залізобетонних конструкцій за міцністю, жорсткістю і тріщиностійкістю велике значення мають фізичні залежності (залежності напружень від деформацій). Для

залізобетонних конструкцій вони залежать, у свою чергу, від рівня і режиму навантаження (жорстке або м'яке, активне навантаження або розвантаження, одноразове або циклічне і т. ін.), а також від стадії роботи конструкції – до або після утворення тріщин:

- із утворенням чіткої системи паралельних або перпендикулярних тріщин із практично постійним їхнім кроком;
- із утворенням однієї, двох, трьох тріщин або системи з непаралельними тріщинами.

Робота конструкцій у першому випадку досліджена досить докладно (в першу чергу, в роботах проф. Карпенко М. І., який розробив модель дисперсних тріщин). У той же час цей випадок досить поширений (наприклад, біля місць появи полів напружень і деформацій – місцеві навантаження, отвори, прорізи і т.ін.). Це необхідно враховувати при розрахунку залізобетонних конструкцій будівель та споруд з несучими стінами, балок і колон з отворами, конструкцій будь-яких об'єктів за наявності дефектів і пошкоджень у них.

При моделюванні бетону з тріщинами використовуються дві моделі.

1. Модель дисперсних (регулярних) тріщин. Ця модель заснована на припущенні, що після того, як головне розтягуюче напруження досягне значення міцності бетону при розтягу, в бетонному елементі утворюється ряд паралельних тріщин за напрямком, перпендикулярному напрямку головного розтягуючого напруження. Наявність тріщини моделюється різким зменшенням жорсткості матеріалу в системі двох ортогональних вісей – нормальної і дотичної до площини тріщини. Після руйнування бетону від розтягу (утворення тріщини) на кожному наступному кроці рішення виконується перевірка, чи залишається середня нормальна деформація розтягу. Якщо ні, то вважається, що дисперсні тріщини закриті і знову можуть передавати стискаюче зусилля.

2. Модель дискретних тріщин. Альтернативою моделі регулярних тріщин є концепція дискретних тріщин, у тому числі, в сітці скінченних елементів. Ці тріщини можуть бути отримані послідовним роз'єднанням загальних вузлів тих елементів, в яких напруження перевищили міцність бетону при розтягу (рис. 1, а, б).

У запропонованій автором моделі дискретних тріщин розглядається залізобетонний з одиночним центральним армуванням. До цього випадку точно або наближено зводяться усі види армування залізобетонних конструкцій із системою арматурних стержнів.

Лівий торець елемента жорстко закріплений від будь-яких переміщень, правий торець – вільний. До арматурного стержня прикладається розтягуюче зусилля N_s , що призводить до виникнення переміщень і поздовжніх відносних деформацій стержня і торця елемента ε_s і ε_c відповідно по усій довжині залізобетонного стержня (рис. 1, в). Зусилля зчеплення, які діють по контакту арматури з бетоном, характеризуються погонними дотичними зусиллями $t(x)$, які у бетоні діють за напрямком діючого навантаження, а в арматурі – у протилежному напрямі.

Закон зчеплення між бетоном і арматурою у запропонованій моделі – пружньо-пластичний, описується із залученням діаграми у вигляді ломаної

$\tau_{bond} - \varepsilon_q(x)$ (рис. 2), яка враховує експериментальні дані О. Б. Голишева, В. М. Кольнера, М. М. Холмянського, Є. М. Бабича та ін. та для білінійної діаграми має вид:

$$\tau_{bond} = k \cdot \varepsilon_q(x) = 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], \quad (1)$$

$$\text{при } \varepsilon_q(x) = [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] \leq \varepsilon_q^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}};$$

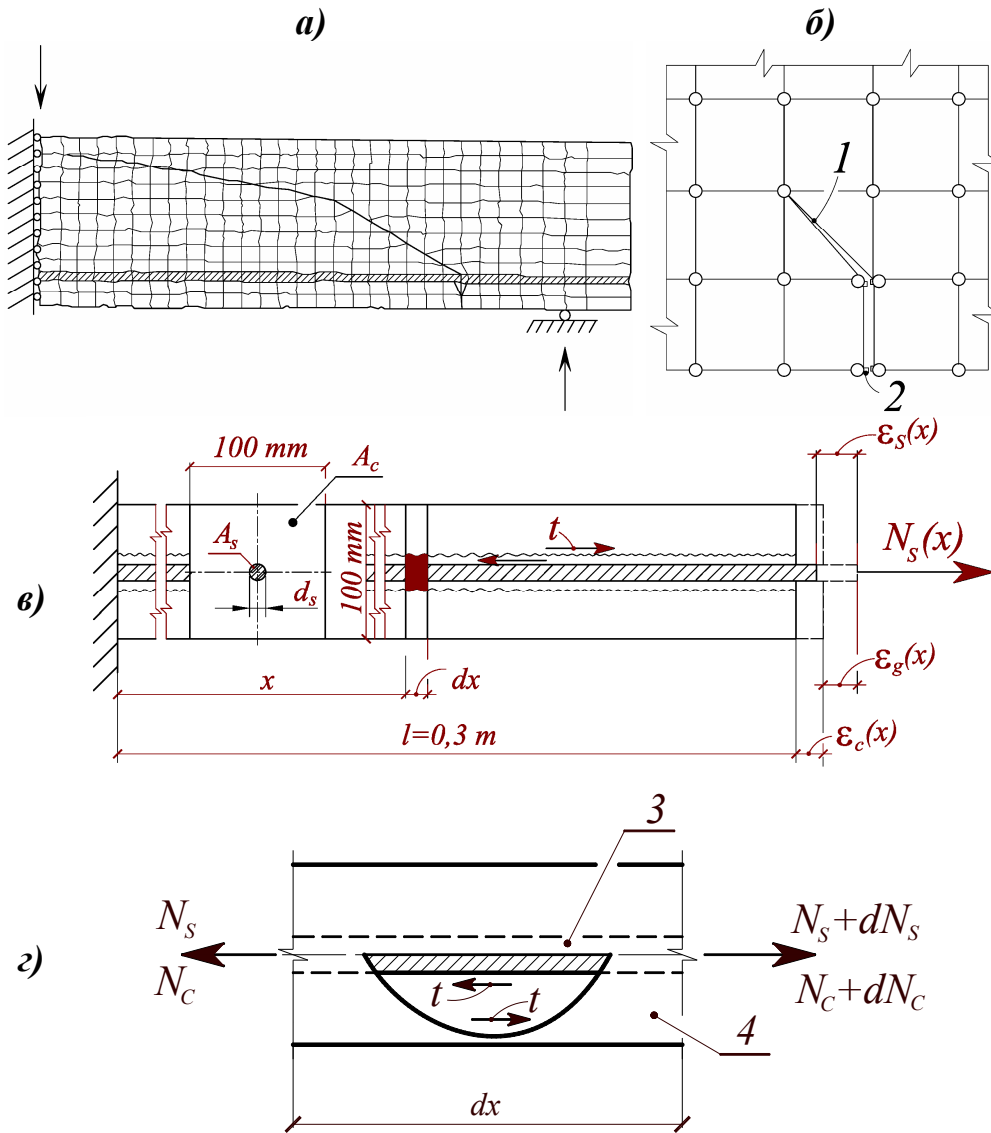


Рис. 1. Моделювання дискретних тріщин (а) із введенням пар вузлів (б) та розрахункова схема до створення аналітичної моделі зчеплення арматури з бетоном (в), (г):

1 – тріщини; 2 – арматурні зв'язки; 3 – арматурний стержень; 4 – бетонна матриця

$$\tau_{bond} = 0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}, \quad (2)$$

$$\text{при } \varepsilon_q(x) = [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] > \varepsilon_q^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}},$$

де $\varepsilon_q(x)$ – відносне взаємне зміщення арматури відносно бетону, в перерізі x ; (накопичення відносних взаємних зміщень арматури відносно бетону на ділянці

між тріщинами і складає значення ширини розкриття тріщин a_{cr}); $\varepsilon_q^*(x)$ – граничне відносне взаємне зміщення арматури відносно бетону, кінцева точка на першій ділянці діаграми зчеплення. Функціонування бетону в цій моделі також описується за допомогою ломаної діаграми $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис. 2, а).

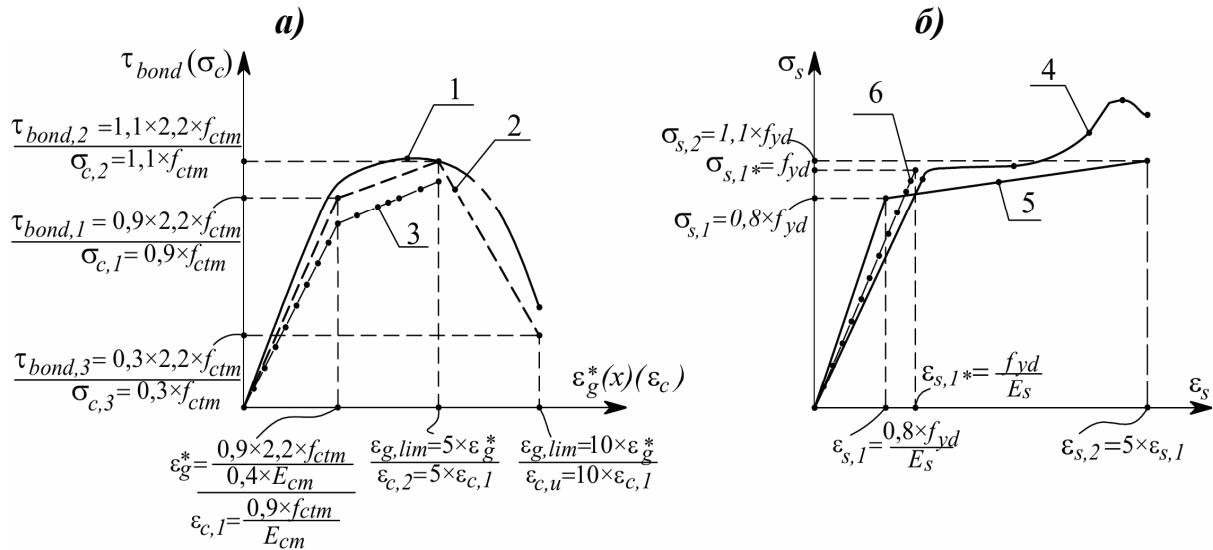


Рис. 2. Діаграми зв'язку: а – $\sigma_c - \varepsilon_c$ і $\tau_{bond} - \varepsilon_g$ для бетону; б – $\sigma_s - \varepsilon_s$ – для арматури:

1 – дійсна діаграма деформування бетону; 2 і 3 – трилінійна і білінійна залежності зчеплення та діаграма деформування бетону, відповідно; 4 – дійсна діаграма деформування арматурної сталі А400С; 5 – те ж, білінійна; 6 – те ж, лінійна

Таким чином, отримана система, яка складається з чотирьох рівнянь, два з яких – диференціальні рівняння першого порядку, і мають наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_s(x) = \frac{1}{E_s \cdot A_s} \cdot N_s(x); \\ \varepsilon_c(x) = \begin{cases} \frac{N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c}, & \text{якщо } \frac{N_c(x)}{A_c} \leq 0,9 \cdot f_{ctm}, \\ \frac{18 \cdot N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c} - 15,3 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, & \text{якщо } \frac{N_c(x)}{A_c} > f_{ctm}; \end{cases} \\ \frac{dN_s(x)}{dx} = \begin{cases} \pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{якщо } \varepsilon_q(x) \leq \varepsilon_q^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ \pi \cdot d_s \cdot \{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{якщо } \varepsilon_q(x) > \varepsilon_q^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}; \end{cases} \\ \frac{dN_c(x)}{dx} = \begin{cases} -\pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{якщо } \varepsilon_q(x) \leq \varepsilon_q^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ -\pi \cdot d_s \cdot \{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{якщо } \varepsilon_q(x) > \varepsilon_q^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}. \end{cases} \end{array} \right. \quad (3)$$

Граничні умови завдання записуються в наступному вигляді:

$$N_c(x=1) = 0, \quad N_s(x=1) = C. \quad (4)$$

Також у запропонованій моделі реалізовані наступні варіанти діаграм деформування арматури, бетону і зчеплення арматури з бетоном: варіант моделі з нелінійним бетоном, залежністю зчеплення і лінійною роботою арматури (рис. 2, криві 3 та 6); – варіант моделі з нелінійними бетоном, арматурою і залежністю зчеплення (рис. 2, криві 3 та 5); варіант моделі з трилінійними

бетоном, залежністю зчеплення і білінійною діаграмою деформації арматури (рис. 2, криві 2 і 5).

Використовуючи чисельні методи, реалізовані у прикладному пакеті системи комп'ютерної алгебри Wolfram Mathematica були отримані графіки розподілу функцій $\varepsilon_s(x)$, $\varepsilon_c(x)$, $N_s(x)$, $N_c(x)$ по довжині стержня, графіки залежності зусилля розтягу в арматурі $N_s(x)$ від експериментальних параметрів зчеплення арматури з бетоном (рис. 3, а), поздовжньої жорсткості C від зусилля $N_s(x)$ (рис. 3, б).

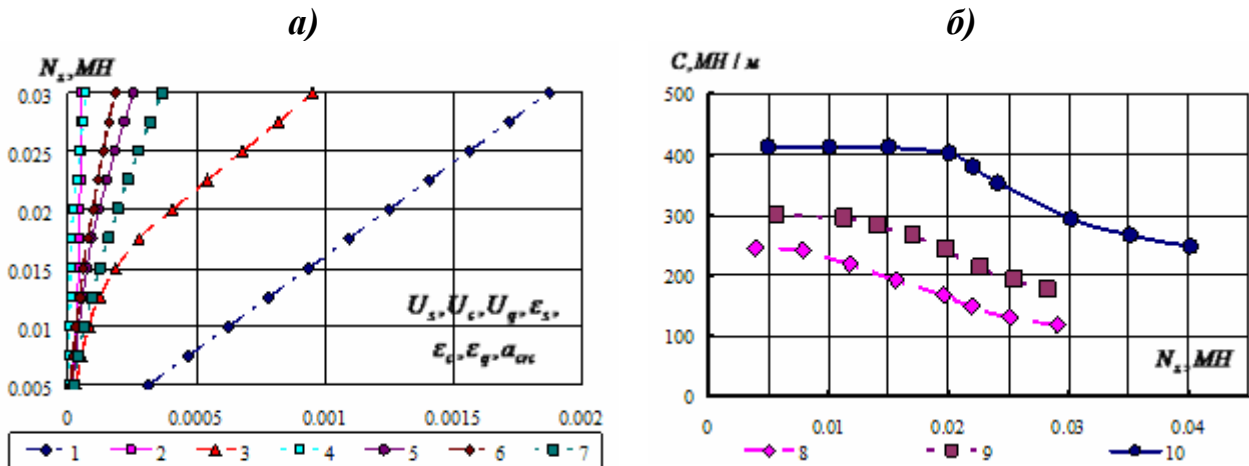


Рис. 3. Графіки залежностей зусилля розтягу в арматурі N_s від експериментальних параметрів зчеплення арматури з бетоном (а) та поздовжньої жорсткості C від N_s (б): 1 – залежність N_s від деформацій арматури ε_s (при $x = l$); 2 – те ж, від деформацій бетону ε_c (при $x = 0,67 \cdot l$); 3 – те ж, від відносних взаємних зміщень арматури відносно бетону ε_q (при $x = 0,67 \cdot l$); 4 – те ж, від переміщень бетону U_c (при $x = l, m$); 5 – те ж, від переміщень арматури U_s (при $x = l, m$); 6 – те ж, від взаємних зсувів арматури відносно бетону U_q (при $x = l, m$); 7 – те ж, від ширини розкриття тріщин a_{crc}, m ; 8, 9, 10 – залежності C від N_s для арматури (класу А400С) $\varnothing 10$ мм, $\varnothing 12$ мм та $\varnothing 16$ мм, відповідно

Обмежувачими факторами при цьому були: межа міцності арматури при розтягу f_{yd} ; середня межа міцності бетону при розтягу f_{ctm} , за якою визначалася стадія роботи залізобетонної частини перерізу елементу; граничні відносні зміщення арматури відносно бетону на кінці $\varepsilon_{q,lim}^*$, при яких відбувається зрив зв'язку арматури з бетоном, згідно прийнятої залежності роботи контакту арматури з бетоном; граничні відносні деформації бетону при розтягу $\varepsilon_{c,u}$, згідно прийнятої залежності деформації бетону.

Запропонована аналітична модель разом з моделюванням процесу арматури з бетоном може бути використана для визначення поздовжньої жорсткості арматурних зв'язків, які перетинають тріщину – необхідного параметра для розрахунку конструкцій за допомогою моделі дискретних тріщин. Повздовжня податливість λ_{sm} (жорсткість зв'язку C_{sm}) визначається відношенням переміщення U_{sm} до реакції зв'язку N_{sm} у ній, яка залежить від граничних умов, що варіюються у процесі дослідження:

$$\lambda_{sm} = \frac{1}{C_{sm}} = \frac{U_{sm}}{N_{sm}} \quad (5)$$

Отримані графіки розподілу $\varepsilon_s(x)$, $\varepsilon_c(x)$, $N_s(x)$, $N_c(x)$ за результатами розрахунку аналітичної моделі показують разом із зоною перерозподілу зусиль і деформацій наявність зони спільної (синхронної деформації) на ділянці від 0 до 0,3 м. Також за результатами розрахунку аналітичної моделі були побудовані графіки розподілу функцій $\varepsilon_s(x)$, $\varepsilon_c(x)$, $N_s(x)$, $N_c(x)$ для різних діаметрів арматурного стрижня ($\emptyset 10$; $\emptyset 12$; $\emptyset 16$), що висмикується з бетону.

Порівняння законів зчеплення у рамках представленої аналітичної моделі. Однією з характерних особливостей розробленої аналітичної моделі є можливість використання і дослідження різних законів зчеплення арматури з бетоном. Вираз закону зчеплення арматури з бетоном згідно з початковими передумовами завдання пов'язаний із зростанням зусиль у бетоні та арматурі і задається у 3 і 4 рівняннях системи (3). Графіки розподілу дотичних напружень зчеплення $\tau_{bond}(x)$ по довжині стрижня, отримані за різними розрахунковими методиками представлені на рис. 4.

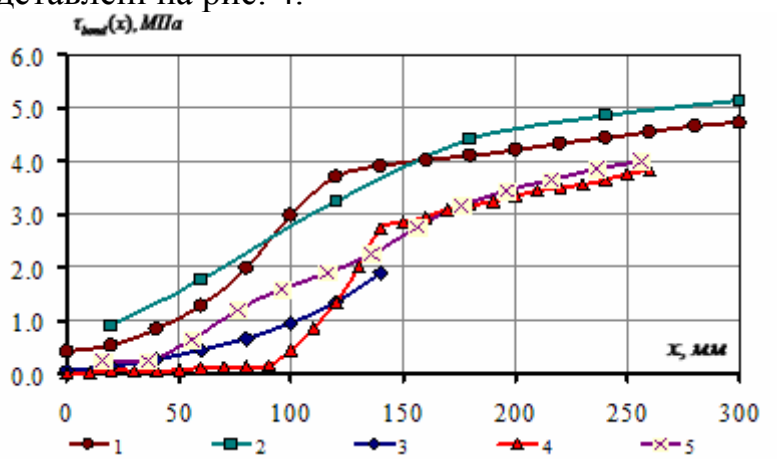


Рис. 4. Графіки розподілу дотичних напружень зчеплення $\tau_{bond}(x)$ по довжині стрижня при дії зусилля розтягу $N_s = 0,7 \cdot P_{fail}$, отримані за різними розрахунковими методиками:

- 1 – запропонована аналітична модель; 2 – експериментальна крива; 3 – аналітична модель із використанням пружньо-пластичного закону зчеплення М.М. Холмянського і лінійним законом деформування бетону (працює лише на $N_s = 0,25 \cdot P_{fail}$); 4 – двомірна СЕ-модель зчеплення з елементами зчеплення, що працюють зсув, реалізована у ПК «Ліра-САПР»; 5 – те саме, зі спеціальними елементами зчеплення СЕ 284

Аналізуючи отримані результати, слід зазначити, що зі зміною діаметру арматури, переміщення торця арматурного стержня, що витягується, збільшуються до 61% із зменшенням діаметру арматури (на 60% за площею її поперечного перерізу); при цьому урахування пружньо-пластичної роботи бетону і зчеплення також помітно збільшує ці переміщення до 39% у порівнянні з моделлю М. М. Холмянського. Слід зазначити, що для переміщень торця бетонної призми (у точці перетину з віссю арматури) характерна така ж тенденція (відмінність між запропонованою моделлю і моделлю М. М. Холмянського складає 68%), що і для арматурного стержня, проте вигнутість кривих деформацій арматури переходить у випуклість для кривих

деформування бетону, тобто якісно змінюється характер зростання переміщення.

Ширина розкриття дискретних тріщин за запропонованою моделлю визначається за наступною формулою:

$$a_{crc} = 2 \cdot U_{q|_{\text{при } x=1}} = 2 \cdot (U_{s|_{\text{при } x=1}} - U_{c|_{\text{при } x=1}}). \quad (6)$$

Дотичні напруження зчеплення визначаються за залежностями (1) і (2). При цьому відносні взаємні зміщення арматури і бетону визначаються за наступною формулою:

$$\varepsilon_q(x) = \left[\frac{\partial U_s}{\partial x} - \frac{\partial U_c}{\partial x} \right] = [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)]. \quad (7)$$

Таким чином, запропонована аналітична модель дозволяє виконувати розрахунки ширини розкриття тріщин в елементах залізобетонних конструкцій, що згинаються, центрально-розтягнутих, позацентрово-розтягнутих, з урахуванням нелінійної роботи залізобетону і контактної зони бетону і арматури. Також за допомогою цієї моделі обчислюється жорсткість і податливість арматурного стержня, що перетинає дискретну тріщину.

Експериментальним дослідженням автора присвячений **третій розділ** дисертаційної роботи.

В результаті випробувань на висмикування арматури з бетону було виявлено **три види** руйнування зразків :

– внаслідок виходу арматури з бетону (порушення зв'язків зчеплення арматури з бетоном), характерно для зразків відносно малої довжини анкерування арматури в бетоні (висоти бетону) – зразки АН–V–50–1, АН–V–50–2, АН–V–75–3, АН–V–75–4, АН–V–100–5, рис. 5, а.

– внаслідок перевищення напружень в арматурі межі міцності арматури на розтяг f_{yd} , різкий розрив арматури – є характерним для більшості випробуваних зразків з довжиною анкерування (висотою бетону) більше 100мм: АН–V–100–6, АН–V–150–8, АН–V–200–9,10, АН–V–250–11, АН–V–300–13–17, 20;

– внаслідок перевищення напружень в арматурі межі текучості арматури f_{yd} , різкий розрив арматури є характерним для частини випробуваних зразків з довжиною анкерування більше 100мм:

Характерним при руйнуванні за тілом арматури є одночасне руйнування бетону навколо арматурної зони біля торця зразка.

Завдяки проведеним експериментальним дослідженням зчеплення арматури з бетоном побудовані графіки залежності висмикуючого (рис. 6, а) та вдавлюючого (рис. 6, б) зусилля P від взаємних зсувів арматури щодо бетону U_q .

Отримані графіки залежності висмикуючого зусилля P від взаємних зсувів арматури щодо бетону U_q для елементів, зруйнованих внаслідок порушення зв'язків зчеплення (рис. 6, а), показують, що максимальне значення висмикуючого зусилля підвищується зі збільшенням висоти (анкерування) стержня у бетоні. Графіки, представлені на рис. 6, а характеризуються наявністю двох гілок: зростаючої і нисхідної, і, що, примітно, наявністю прямої ділянки між ними, які присутні в залежностях зчеплення інших дослідників.

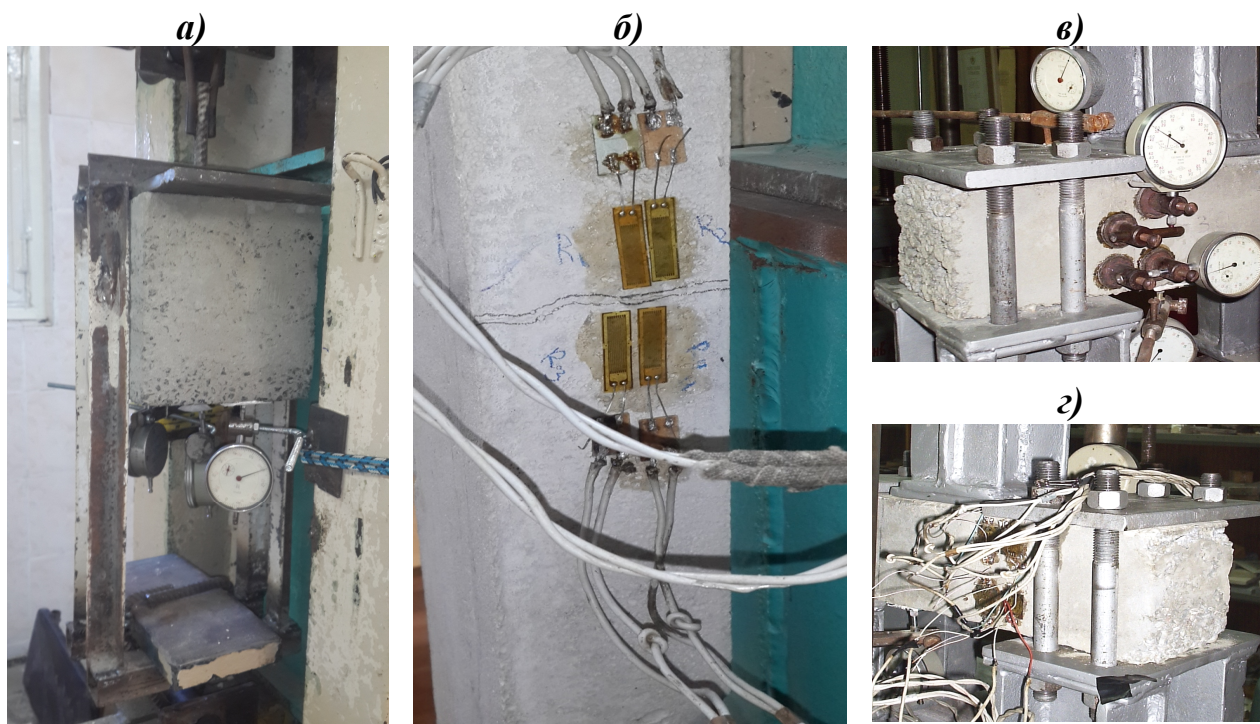


Рис. 5. Випробування на висмикування зразка п'ятої серії АН-V-150-7(a), зразка сьомої серії ЦР-VII-1 на центральний розтяг (б), розміщення механічних приладів на центрально-армованій призмі другої серії В20-В30-В20 (в) та тензометричних розеток (г)

Граничне зусилля перед порушенням зв'язків зчеплення арматури з бетоном залежить від довжини анкерування та з її збільшенням – зростало (табл. 1). Граничне зусилля при витягуванні P_{fail} , що виникає від розриву арматури приведено в табл. 1, практично не змінюється і становить в середньому 48,23 кН. На підставі виконаних експериментальних досліджень зчеплення арматури з бетоном при втисканні арматурного стержня побудовані графіки залежності вдавлюючого зусилля P від взаємних зсувів арматури щодо бетону U_q , рис. 6, б.

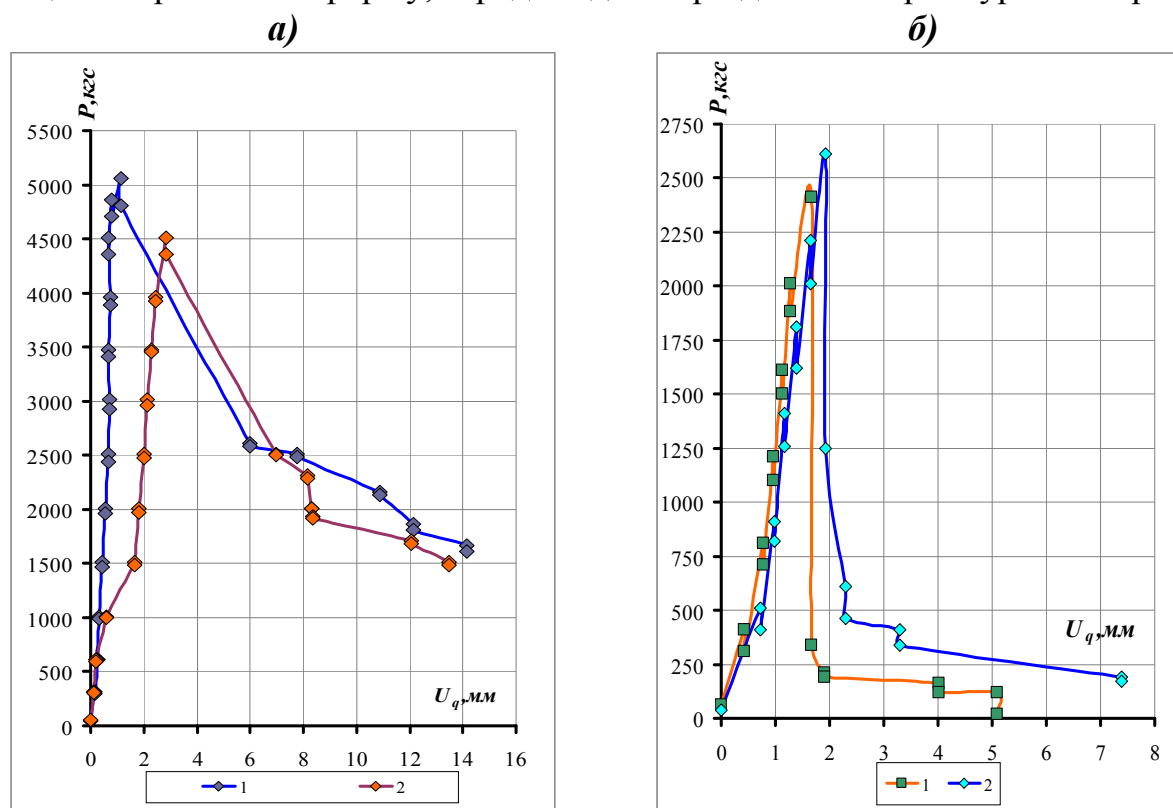
Для зразків, випробуваних на вдавлювання, характерні дві форми руйнування: внаслідок поступового руйнування зв'язків зчеплення арматури з бетоном і в результаті цього, поступового виходу арматурного стрижня з бетону; руйнування внаслідок розколювання бетону в околиці арматурної зони при вдавлюванні арматури в бетон (порушення зв'язків зчеплення арматури з бетоном), характерно для зразків відносно малої довжини анкерування арматури в бетоні (висоти бетону) – зразки В-VI-50-1; В-VI-50-2, В-VI-75-3; В - VI-75-4.

Граничне стискаюче зусилля P , яке до появи першої тріщини в зразках збільшувалося із збільшенням висоти бетону і склало для зразків: В-VI-50-1 – 10,1 кН; В-VI-50-1 – 9,1 кН; В-VI-75-3 – 13,1 кН; В-VI-75-4 – 15,1 кН; В-VI-100-1 – 24,1 кН і В-VI -100-2 – 26,1 кН, відповідно, табл. 1.

Для експериментальних зразків, які доведені до зрушення арматури відносно бетону при її витягуванні, розраховані середні (умовні) експериментальні граничні напруження зчеплення τ_{gm} за нижчеприведеною формулою:

$$\tau_{gm} = \frac{N}{ul} = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{\pi d_s l}, \quad (8)$$

де N і σ_s – граничне зусилля і напруження в стрижні, відповідно, d_s та l – площа поперечного перерізу, середній діаметр і довжина арматурного стрижня.



1 – АН-V-100-5; 2 – АН-V-75-3

1 – В-VI-100-5; 2 – В-VI-100-6

Рис. 6. Графіки залежності зусилля P від взаємних зсувів арматури щодо бетону U_q :

а – при висмикуванні арматури з бетонного блоку; б – при вдавлюванні арматури у бетон

Також проведені експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном при центральному (позацентровому) розтягу арматурного стержня у бетоні, а також при зсуві уздовж дискретної тріщини бетонних та центрально-армованих складених призм.

Отримані в процесі експериментальних випробувань значення дослідних параметрів, представлені в табл. 1.

Отримані експериментальні дані значною мірою доповнюють накопичений експериментальний матеріал і надають можливість перевірки запропонованого розрахункового апарату.

Розробці чисельних скінченно-елементних моделей зчеплення арматури з бетоном у ПК «Ліра-САПР» і порівнянню їх із запропонованим розрахунковим апаратом, а також з експериментальними даними, отриманими у [6, 7, 8] і іншими дослідниками зчеплення арматури з бетоном, серед яких роботи І.О. Рудного, В.М. Тихомирова, Б.Ш. Шамурдова, А.О. Веселова, М.М. Холмянського присвячений **четвертий розділ** дисертації.

Авторами [2, 3, 5] розроблено дві стрижневі та п'ять плоских моделей залізобетонного призматичного стрижня, центрально-армованого стержньовою гарячекатаною арматурою, яка висмикується із бетонної матриці: стрижнева

трюхелементна модель зчеплення; стрижнева спеціальна модель зчеплення; плоска модель з елементами зчеплення, які працюють на розтяг; плоска модель з елементами зчеплення, які працюють на стиск; плоска модель з елементами зчеплення, які працюють на зсув; плоска модель зі спеціальними стрижневими елементами зчеплення (SE264 у ПК «Ліра-САПР»); – плоска модель із спеціальними пластинчастими елементами зчеплення (SE284 у ПК «Ліра-САПР»).

Таблиця 1

Значення a_{crc} , P_{fail} , $C(\zeta)$, отриманих у результаті випробувань

| № серії | Шифр зразка | Геометричні розміри | | | Армування, \emptyset , клас | Клас бетону | Ширина розкриття тріщин, a_{crc} , мм | Граничне зусилля, (відп. U_{qu}), P_{fail} , кН | Жорсткість, C , кН/м (для призм ζ , кН/см ²) |
|---------|-----------------------------|---------------------|----------|----------|-------------------------------|--------------------|---|--|--|
| | | b , мм | h , мм | l , мм | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| I | B20-B30-B20 ($a=10$ мм) | 100 | 100 | 400 | — | C16/20 (C25/30) | — | 8,57 | 7,22 |
| | B30-B30-B30 ($a=15$ мм) | 100 | 100 | 400 | — | C25/30 (C25/30) | — | 17,2 | 6,38 |
| | B40-B30-B40 ($a=15$ мм) | 100 | 100 | 400 | — | C25/30 (C32/40) | — | 9,08 | 12,98 |
| II | B20-B30-B20 ($a=10$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 6A240C$ | C16/20 (C25/30) | 0,15–5,5 | 20,27 | 4,21 |
| | B20-B30-B20 ($a=15$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 6A240C$ | C16/20 (C25/30) | 0,1–6,7 | 6,16 | 0,97 |
| | B20-B30-B20 ($a=20$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 6A240C$ | C16/20 (C25/30) | 0,3–5,9 | 38,6 | 1,63 |
| III | B30-B30-B30 ($a=15$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 6A240C$ | C25/30 (C25/30) | 0,35–9,4 | 38,4 | 1,67 |
| | B30-B30-B30 ($a=15$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 10A240C$ | C25/30 (C25/30) | 0,15–8,2 | 25,16 | 3,27 |
| | B30-B30-B30 ($a=20$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 10A400C$ | C25/30 (C25/30) | 0,1–6,5 | 21,25 | 2,71 |
| IV | B40-B30-B40 ($a=15$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 6A240C$ | C25/30 (C32/40) | 0,3–8,4 | 26,7 | 2,62 |
| | B40-B30-B40 ($a=15$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 10A240C$ | C25/30 (C32/40) | 0,2–8,7 | 10,16 | 2,98 |
| | B40-B30-B40 ($a=20$ мм) | 100 | 100 | 400 | $\emptyset 10A240C$ | C25/30 (C32/40) | 0,3–8,5 | 15,16 | 1,48 |
| V | AH-V-50-1(2) | 150 | 150 | 50 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 0,3–3,5 | 25,86(27,36) | 15725(16456) |
| | AH-V-75-3(4) | 150 | 150 | 75 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 0,05–1,6 | 14,86(20,36) | 22943(29845) |
| | AH-V-100-5(6) | 150 | 150 | 100 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 0,05–0,35 | 16,11(42,61) | 59764(24788) |
| | AH-V-150-7(8) | 150 | 150 | 150 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 0,05–0,15 | 44,11(47,65) | 34178(49896) |
| | AH-V-200-9(10) | 150 | 150 | 200 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 0,2–0,6 | 46,36(44,50) | 35952(41269) |
| | AH-V-250-11(12) | 150 | 150 | 250 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 0,05–0,3 | 45,05(48,11) | 45913(45394) |
| VI | AH-V-300-13(14-20) | 150 | 150 | 300 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 0,05–1,0 | 45,60...47,8 | 42369...55365 |
| | B-VI-50-1(2) | 150 | 150 | 50 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 4,5–6,0 | 0,032(0,043) | 11130(9555) |
| | B-VI-75-3(4) | 150 | 150 | 75 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 1,3–6,0 | 0,11(0,029) | 8526(30101) |
| VII | B-VI-100-5(6) | 150 | 150 | 100 | $\emptyset 10A400C$ | C16/20 | 3,3–5,2 | 0,12(0,17) | 20547(19267) |
| | ЦР-VII-1(2) | 70 | 70 | 600 | $\emptyset 10A400C$ | C20/25 | 0,035–3 | 46,29(46,29) | 32582(30870) |
| VIII | ВЦР-VIII-3(4) | 70 | 70 | 600 | $2\emptyset 10A400C$ | C20/25 | 0,4–3,5 | 47,39(47,39) | 56219(74598) |
| | ВЦРС-VIII-5(6-8) | 70 | 200 | 600 | $2\emptyset 10A400C$ | C20/25 (C25/30) | 0,4–3,2 | 45,29(45,29) | 98460 (133028) |

Побудовані і проаналізовані графіки розподілу повздовжніх зусиль, переміщень і деформацій, діючих у різних перерізах по довжині стрижня у розроблених моделях, а також моделях інших авторів. Порівняльний аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень показує задовільну збіжність результатів розрахунку за запропонованою аналітичною моделлю із експериментом, про що свідчить максимальне відхилення 12,67%.

Аналіз вихідних параметрів запропонованих одномірних і плоских моделей із результатами, отриманими при обчисленні аналітичної моделі, показав, що найбільш близькою до неї за значеннями вихідних параметрів серед стержневих моделей є *трьохелементна модель* (відхилення значень вихідних параметрів для контрольного перерізу знаходиться у межах від 9,5 до 22,4%). Дану модель подано у загальному порівняльному аналізі.

Серед плоских моделей найбільш близькими виявилися *модель із елементами зчеплення, що працюють на зсув* (відхилення результатів складає від 15,1% до 24,6%) і *модель зі спеціальними пластинчастими плоскими елементами SE 284* (відхилення результатів складає від 16,3 до 26,3%).

Модель залізобетонного стержня із арматурою, що витягується з бетонної матриці є плоскою скінченно-елементною задачею, яка складається із бетонних пластинчатих елементів (фізично-нелінійних чотирикутних SE плоскої задачі (балка-стінка) SE230), із розмірами 10×10мм (у площині XoY), на які розбитий весь дослідний елемент, за винятком пластинчатих елементів, які моделюють арматуру. Елементи, які моделюють арматуру Ø10 класу А400С (чотирикутний SE плоскої задачі (балка-стінка) KE30), мають розмір 5×10мм і примикають з обох боків до повздовжньої вісі елемента.

Загальний порівняльний аналіз, здійснений між запропонованою розрахунковою методикою, чисельним моделюванням зчеплення арматури з бетоном при розтягу арматурного стержня, закріпленого у бетоні, проведеними експериментальними дослідженнями і експериментальними дослідженнями вчених, які раніше займалися вирішенням задачі зчеплення арматури з бетоном, а саме Рудного І.О., Тихомирова В.М., Шамурадова Б.Ш., Веселова А.О., автора, Холмянского М.М. (загалом 124 зразка).

При цьому критерієм порівняння є відношення теоретичних взаємних зміщень арматурного стрижня відносно бетону $U_{q,teor}$ до їх експериментальних значень $U_{q,exp}$. Як видно з таблиці 2, запропонований спосіб розрахунку має

Таблиця 2

Порівняння розрахункових методик

| Розрахункова методика | Кількість дослідів | Результати статистичної обробки даних | | |
|---|--------------------|---------------------------------------|----------|---------|
| | | \bar{X} | σ | C_V |
| Запропонована аналітична методика | 124 | 1,084 | 0,11087 | 11,432% |
| Чисельна стрижнева модель, реалізована з використанням ПК «Ліра-САПР» | 124 | 1,349 | 0,38248 | 32,098% |

помітні переваги. З аналізу статистичних даних випливає, що запропонована розрахункова методика дає прийнятні результати при дії зусилля розтягу в експлуатаційній стадії роботи, про що свідчить коефіцієнт варіації $C_V = 11,432\%$; значення середнього \bar{X} , близького до одиниці.

Це дозволяє зробити висновок, що запропонована розрахункова методика досить ефективна для визначення ширини розкриття тріщин у центрально-розтягнутих, позацентрово-розтягнутих елементах, а також елементах залізобетонних конструкцій, які працюють на згин, повздожньої жорсткості (податливості) арматурних зв'язків, які перетинають тріщину і взаємних зміщень арматури відносно бетону при дії сил зчеплення і зовнішнього зусилля розтягу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Основні висновки і результати роботи зводяться до наступного:

1. Встановлено, що подальший розвиток теорії зчеплення залізобетонних конструкцій і пошук відповідних розрахункових моделей зчеплення арматури з бетоном відбувається в напрямку поглибленого дослідження природи і характеру тріщиноутворення та розробки аналітичного апарату, заснованого на оцінці дійсного напружено-деформованого стану.

2. На основі узагальнення та аналізу зібраних результатів експериментальних і теоретичних досліджень удосконалена аналітична модель зчеплення арматури з бетоном у нелінійній постановці, що складається із замкнутої системи нелінійних рівнянь, два з яких є диференціальними рівняннями першого порядку.

3. Удосконалено методику та проведені експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном при деформаційних впливах із урахуванням нисхідної гілки деформування у бетоні при центральному і позацентровому розтязі арматурного стержня. Отримані нові експериментальні дані щодо характеру деформування арматури і бетону при витягуванні (вдавлюванні) арматурного стержня із бетону (у бетон) і зсуві вздовж дискретної тріщини із урахуванням нисхідної гілки деформування.

Для зразків, випробуваних на витягування і зруйнованих внаслідок виходу арматури, отримано середнє (умовне) експериментальне максимальне напруження зчеплення τ_{gm} , при яких відбувається зрив зв'язку арматури з бетоном – 17,32МПа.

4. Виконано чисельні дослідження із використанням накопиченого банку експериментальних даних у кількості 124 (серед яких 16, виконаних автором) випробувань зчеплення арматури з бетоном у широкому діапазоні зміни довжини анкерування, які дозволили отримати співпадіння теоретичних і експериментальних параметрів для визначення взаємних зсувів арматури відносно бетону при дії сил зчеплення і зовнішнього розтягуючого зусилля. З аналізу статистичних даних випливає, що запропонована розрахункова методика дає прийнятні результати при дії розтягуючого навантаження в експлуатаційній стадії роботи, про що свідчить коефіцієнт варіації $C_V = 11,432\%$; значення середнього \bar{X} , близького до одиниці.

5. Пропозиції дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні залізобетонних конструкцій виробничих будівель підприємства Будівельний комбінат «Прогрес» по вул. Запорізькій, 14 у м. Бориспіль Київської області; при проектуванні і розрахунку залізобетонних конструкцій будівлі головного корпусу Центру для тимчасового утримання нелегальних мігрантів, що знаходиться в межах Прибужанського сільської ради Вознесенського району Миколаївської області, та використовуються в навчальному процесі Національного авіаційного університету при вивченні дисциплін «Будівельні конструкції», «Залізобетонні та кам'яні конструкції» і « Реконструкція будівель і споруд аеропортів».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України

1. Kolchunov V. I. The analytical core model formation of the nonlinear problem bond armature with concrete / V. I. Kolchunov, I. A. Yakovenko, E. A. Dmitrenko // Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2016. – Вып. 2(47). – С. 125–132. (*Видання входить до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus*).

2. Колчунов В. И. Конечно-элементное моделирование нелинейной плоской задачи сцепления бетона и арматуры в ПК Лира-САПР / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2016. – №3. – С. 6–15.

3. Колчунов В. И. Аналитическая и конечно-элементные стержневые модели нелинейной задачи сцепления арматуры с бетоном, их сравнение и анализ // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. збірник. – К. : КНУБА, 2016. – Вып. 60. – С. 184–197.

4. Колчунов В. И. Аналитическая модель сцепления и нелинейная податливость арматурных связей при раскрытии дискретных трещин в железобетонных конструкциях / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2016. – Вып. 32. – С. 183 – 196.

5. Колчунов В. И. Конечно-элементные плоские модели нелинейной задачи сцепления арматуры с бетоном, их сравнение и анализ / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вып. 165. – С. 240–259. (*Видання входить до міжнародних наукометричних баз даних Index Copernicus, Google Scholar*).

6. Колчунов В. И. Методика экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при выдергивании (сжатии) арматурного стержня из бетона (в бетон) с учетом ниспадающей ветви деформирования / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2016. – Вып. 33. – С. 162 – 173.

7. Колчунов В. И. Основные результаты экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при выдергивании и вдавливании деформационным воздействием с учетом ниспадающей ветви деформирования / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Е. А. Дмитренко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2016. – Вип. 5(100). – С. 115–124. (*Видання входить до міжнародних наукометричних баз даних Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor, Scientific Indexing Services*).

8. Дмитренко Е.А. Некоторые результаты экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при деформационном режиме нагружения / Е. А. Дмитренко // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. збірник. – К. : КНУБА, 2016. – Вип. 62. – С. 191–200.

Публікації у збірниках праць за матеріалами конференцій

9. Дмитренко Е.А. Аналитическая оценка жесткости арматурных связей при моделировании дискретных трещин железобетонных конструкций / Е. А. Дмитренко // Проблеми розвитку сучасного аеропорту, секція «Міське, промислове, цивільне та транспортне будівництво» : матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів "Політ. Сучасні проблеми науки" (6–8 квітня 2016 р., Київ) : зб. тез доп. – К. : НАУ, 2016.

10. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A., Dmitrenko E.A. Analytical modeling of nonlinear problem bond armature with concrete / V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko, E.A. Dmitrenko // The Seventh World Congress "Aviation in the XXI-st Century". Safety in Aviation And Space Technologies / Symposium 10. Problems of development of the modern airport. (September 19-21, 2016, National Aviation University, Kyiv, Ukraine).

АНОТАЦІЯ

Дмитренко Є.А. Розрахункова модель зчеплення у залізобетоні за наявністю дискретних тріщин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

Дисертація присвячена розробці розрахункової моделі зчеплення у залізобетоні за наявності дискретних тріщин у нелінійній постановці і деформаційних впливах із урахуванням нисхідної гілки деформування на основі проведених експериментально-теоретичних досліджень.

Запропоновано аналітичну модель зчеплення арматури з бетоном, яка складається із замкнутої системи нелінійних рівнянь, два з яких є диференційними рівняннями першого порядку.

Проведено експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном при деформаційних впливах із урахуванням нисхідної гілки деформування при різних видах навантажень.

Виконано чисельні дослідження з використанням накопиченого банку експериментальних даних по вивченню зчеплення арматури з бетоном у широкому діапазоні зміни довжини анкерування, які дозволили отримати співпадіння теоретичних і досліджуваних параметрів для визначення взаємних зсувів арматури щодо бетону при дії сил зчеплення і зовнішнього розтягуючого зусилля (коефіцієнт варіації у накопиченій дослідницькій вибірці не перевищує 11,432%).

Ключові слова: зчеплення арматури з бетоном, залізобетонні конструкції, нелінійні рівняння, нисхідна гілка деформування, дискретні тріщини.

АННОТАЦИЯ

Дмитренко Е.А. Расчетная модель сцепления в железобетоне при наличии дискретных трещин. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный авиационный университет, Киев, 2017.

Диссертация посвящена разработке расчетной модели сцепления в железобетоне при наличии дискретных трещин в нелинейной постановке и деформационных воздействиях с учетом нисходящей ветви деформирования на основе проведенных экспериментально-теоретических исследований.

Предложена аналитическая модель сцепления арматуры с бетоном, которая состоит из замкнутой системы нелинейных уравнений, два из которых являются дифференциальными уравнениями первого порядка.

Проведены экспериментальные исследования сцепления арматуры с бетоном при деформационных воздействиях с учетом ниспадающей ветви деформирования при разных видах загрузений.

Выполнены численные исследования с использованием накопленного банка экспериментальных данных по изучению сцепления арматуры с бетоном в широком диапазоне изменения длины анкеровки, которые позволили получить сопоставление теоретических и опытных параметров для определения взаимных смещений арматуры относительно бетона при действии сил сцепления и внешнего растягивающего усилия (коэффициент вариации в накопленной исследовательской выборке не превышает 11,432%).

Ключевые слова: сцепление арматуры с бетоном, железобетонные конструкции, нелинейные уравнения, ниспадающая ветвь деформирования, дискретные трещины.

ABSTRACT

Dmytrenko Ye. A. The calculation model of bond in reinforced concrete at the presence of discrete cracks. – The manuscript.

The thesis for obtain the scientific degree of the candidate of technical sciences by specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – National Aviation University. – Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the development of computational models of coupling in reinforced concrete in the presence of discrete cracks in the nonlinear formulation

and deformation effects, taking into account the descending branch of the deformation carried out on the basis of experimental and theoretical studies.

An analytical model of the bond reinforcement with concrete consists of a system of nonlinear equations, two of which are first-order differential equations.

The graphs of the distribution of relative longitudinal strains movements, forces in concrete and reinforcement bar, as well as tangential bond stresses in the contact zone of the reinforcement bars and concrete along the length of the bar, the longitudinal reinforcement stiffness crossing the discrete crack from the acting force and displacement in the reinforcement are obtained as a results of experiments.

The proposed model allows to conduct the calculation of the crack opening width in bent, centrally-stretched, eccentrically-stretched elements of reinforced concrete structures taking into account the nonlinear work of reinforced concrete and the contact zone of concrete and reinforcement.

The techniques and experimental studies of the bond reinforcement with concrete under the deformation effects were developed, taking into account the descending branch of the strain in a representative volume of concrete by the acting the central and eccentric tensile force were carried out. New experimental data have been obtained on the nature of the deformation of reinforcement and concrete when the reinforcing bar is pulled from concrete (into concrete) and shifted along a discrete crack, taking into account the descending branch of deformation, among which the graphs of the dependence of the measured displacements on the acting loads, the pattern of crack formation in time. The cracks opening width, the values of destructive forces and cracking forces, the types of failure under various force impacts are performed.

The two bar and five flat finite-element models of the adhesion between reinforcing bar and concrete are developed and investigated in terms of the central extension of the reinforcement in concrete in the environment of the PC “LIRA-SAPR”, and differentiate in the way of modeling the contact of the reinforcement with concrete. On the basis of a comparative analysis of the results obtained with the FEM models and the proposed analytical model, the most reliable finite element models of the reinforcement coupling with concrete are selected. Recommendations are given for modeling the coupling of reinforcement to concrete by the finite element method.

Numerical studies using the accumulated bank of experimental data to study the bond reinforcement with concrete in a wide range of anchoring length, which yielded a comparison of theoretical and experimental parameters for determining relative displacements with respect to the concrete reinforcement under the action of the engagement of forces and the external tensile force (the coefficient of variation in research accumulated sample not exceeding 11,432%).

Keywords: bond reinforcement with concrete, reinforced concrete structures, nonlinear equations, the descending branch of the deformation, discrete cracks.