

УДК 624.012.45

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.38.2.10>

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ

Дмитренко Євген Анатолійович¹, Усенко Микола Володимирович²,
Пилипака Олександр Сергійович³, Бакай Тимофій Валерійович⁴,
Яковенко Ігор Анатолійович⁵

¹ кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва,

Національний університет біоресурсів і природокористування, Київ, Україна, e-mail:
zdmirenko26@gmail.com, orcid: 0000-0001-9737-943X

² кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри будівництва,

Національний університет біоресурсів і природокористування, Київ, Україна,
e-mail: usenko.m@nubip.edu.ua, orcid: 0009-0001-1969-1265

³ кандидат технічних наук, науковий співробітник,
Державне підприємство «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва» імені
В.С. Балицького, Київ, Україна,
e-mail: pylypaka@ukr.net, orcid: 0009-0003-3009-9179

⁴ аспірант кафедри будівництва,
Національний університет біоресурсів і природокористування, Київ, Україна, e-mail:
t.bakay@nubip.edu.ua, orcid: 0009-0007-1160-7333

⁵ доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри будівництва,
Національний університет біоресурсів і природокористування, Київ, Україна, e-mail:
i2103@ukr.net, orcid: 0000-0003-4256-9855

Анотація. Мета: проведення системного критичного аналізу існуючих експериментальних методів дослідження (pull-out та beam tests) зчеплення арматури з бетоном, систематизація численних визначальних факторів (включаючи властивості бетону та арматури, умови навикишнього середовища, геометричні та динамічні параметри) на міцність та характер руйнування зчеплення, а також обґрунтування необхідності застосування сучасних методик моніторингу (DFOS та DIC) для підвищення достовірності моделі зчеплення арматури з бетоном в умовах різного ступеня обмеження арматурного стержня у бетонній матриці.

Методологія. Дослідження ґрунтується на критичному аналізі та порівнянні традиційних експериментальних методів (випробування на висмикування/вдавлення та балкові випробування/випробування кінців балок), які є основними для визначення середніх та локальних напружень зчеплення. Проведено систематизацію впливу матеріальних (клас бетону, діаметр арматури), геометричних (довжина анкерування, захисний шар, обмеження, умови бетонування) та зовнішніх/динамічних (корозія, температура, швидкість навантаження) факторів. Ключовим методологічним підходом є аналіз потенціалу новітніх методик моніторингу розподілене волоконно-оптичне зондування (DFOS) та цифрова кореляція зображень (DIC).

Результати. Виявлено, що випробування на висмикування створюють нерепрезентативний напружено-деформований стан (стиск бетону) та часто дають

завищені значення міцності зчеплення, особливо у зразках без зони відсутності зчеплення. Натомість балкові випробування (зокрема, модифікація fib Model Code 2020) краще відображають роботу арматури у розтягнутій зоні елементів. DFOS та DIC дають змогу точно розраховувати локальні параметри τ_{bond} та δ , забезпечуючи зовнішню валідацію даних та контроль кінематики руйнування. Установлено, що збільшення довжини анкерування (наприклад, з 5Ø до 10Ø) призводить до зниження середньої міцності зчеплення (до 32%). Достатнє обмеження запобігає крихкому розколюванню (*splitting*), сприяючи пластичному висмикуванню (*pull-out*), яке краще описується аналітичними моделями $\tau_{bond} - \delta$, рекомендованими чинними нормативними документами. Корозія (понад 6%) та високі температури значно знижують міцність зчеплення, тоді як висока швидкість навантаження (динамічні впливи) може підвищити його (динамічний фактор збільшення $DIF \approx 1,5$).

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у системному критичному синтезі багатофакторної проблеми зчеплення, що підкреслює обмеженість традиційних експериментальних баз даних та обґрунтовує синергетичне застосування DFOS та DIC як ключового інструменту для отримання деталізованих локальних даних. Ці дані є необхідними для механістично обґрунтованого уточнення параметрів моделі $\tau_{bond} - \delta$ в умовах, які відповідають експлуатаційним (урахування впливу обмеження, технологічних, динамічних та корозійних ефектів).

Практична значущість. Проведений критичний аналіз існуючих традиційних методів випробувань дає змогу розробити нові, більш удосконалені методи експериментальних досліджень зчеплення арматури з бетоном. Отримані висновки щодо доцільності методів випробувань та чинників впливу створюють надійну експериментальну базу для розроблення вдосконалених чисельних та аналітичних моделей зчеплення, що в кінцевому підсумку дасть змогу підвищити достовірність розрахунків ширини розкриття тріщин, анкерування та розробити обґрунтовані рекомендації для відновлення і посилення будівель та споруд.

Ключові слова: залізобетон, зчеплення арматури з бетоном, *bond-slip*-модель, середні напруження зчеплення, випробування на висмикування (*pull-out test*), випробування кінців балок (*beam-end test*), методи розподіленого волоконно-оптичного зондування (DFOS), метод цифрової кореляції зображень (DIC).

ВСТУП

Спільна робота арматури і бетону є фундаментальною умовою функціонування залізобетонних конструкцій, забезпечуючи їх несучу здатність, жорсткість та тріщиностійкість [13]. Ця взаємодія, відома як зчеплення арматури з бетоном, дає змогу двом матеріалам працювати як єдине ціле. У разі руйнування або порушення зчеплення несуча та деформаційна здатності елементів залізобетонних конструкцій суттєво знижуються [13].

Міцність зчеплення залежить від великої кількості різномірних факторів [3], включаючи характеристики матеріалів, геометричні параметри анкерування та зовнішні впливи (корозія, температура, динамічне навантаження) [6]. Урахування спільного впливу цих чинників у моделюванні є надзвичайно складним завданням, що вимагає системного підходу [5].

Сучасні виклики, спричинені війною в Україні, призвели до масових пошкоджень

цивільної та критичної інфраструктури. Значна частина залізобетонних конструкцій, які зазнали екстремальних динамічних, ударних або сейсмічних впливів, а також ті, які потребують відновлення, часто є застарілими та мають ознаки довгострокової деградації, наприклад корозійні пошкодження [18]. Поєднання цих факторів, а саме вікового погіршення та нових динамічних пошкоджень, вимагає критичної оцінки залишкової несучої здатності. У таких умовах зчеплення арматури з бетоном стає критичним фактором для ефективно роботи конструкції, оскільки його порушення, зокрема через розколювання захисного шару, може істотно вплинути на несучу та деформаційну здатність елементів [13].

Однією з ключових проблем механіки залізобетону залишається розроблення надійних, універсальних та точних моделей, які описували б локальну взаємодію в контактній зоні арматури з бетоном. Точне визначення залежності «напруження

зчеплення – проковзування» має вирішальне значення для адекватного розрахунку ширини розкриття тріщин та моделювання напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, особливо в умовах нелінійного деформування [24].

Традиційні експериментальні методи дослідження зчеплення арматури з бетоном характеризуються певною обмеженістю у сфері застосування та мають певні недоліки. Це стимулює необхідність проведення критичного аналізу існуючих методик та застосування новітніх технологій моніторингу, які забезпечують квазібезперервну інформацію про локальні деформації та кінематику тріщин під час експериментальних досліджень зчеплення арматури з бетоном.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження зчеплення арматури з бетоном є одним із наріжних каменів механіки залізобетону і веде свою історію з початку ХХ ст. [13]. Ранні дослідження зчеплення, які мали на меті визначити фізичну природу взаємодії, розпочалися ще у 1913 р. Д. Абрамсом та продовжилися А. Кларком у 1949 р. Значний внесок у розвиток теорії зчеплення арматури з бетоном був зроблений німецькими дослідниками, зокрема Г. Ремом, який у 1961 р. провів фундаментальні дослідження основ зчеплення між сталлю та бетоном.

Серед вітчизняних наукових шкіл вагомою є спадщина професора М.М. Холмянського, який у 1981 р. видав монографію «Контакт арматури з бетоном». Його дослідження, а також роботи А.Я. Барашикова, В.І. Колчунова, О.Б. Голишева та ін. [6], стали основою для подальшого розвитку теорії зчеплення та розрахункового апарату [23]. Холмянський також розробив «нормальний закон» зчеплення, який використовується для розрахунку міцності зчеплення центрально армованих елементів за висмикування арматурного стержня з бетонного блоку.

Ключові роботи Елігехаузена, Попова та Бертеро (ВРЕ-модель), що з'явилися у 1983 р., сформулювали локальні залежності $\tau_{bond} - \delta$ для арматурних стержнів під час випробування на висмикування. Ці моделі лягли в основу положень міжнародних нормативних документів, включаючи CEB-FIP Model Code 1990 та fib Model Code 2010 [9].

На даний момент розроблено велику кількість аналітичних моделей, які тим чи іншим способом моделюють залежність «напруження зчеплення – проковзування». Дані моделі за характером математичної залежності умовно поділяють на лінійні (пружні),

нелінійні (пружнопластичні), диференційовані та варіаційні [3].

Для чисельного моделювання взаємодії арматури з бетоном використовують спеціальні комп'ютерні програми, такі як ПК «LIRA САПР», «ABAQUS», «ANSYS», «DIANA» та «NASTRAN» та ін. [3; 19]. Як правило, ці моделі застосовують калібровані залежності для прогнозування поведінки зразків. Чисельні дослідження зчеплення включають 3D-мезомасштабне моделювання інтерфейсу між ребристою сталлю та бетоном та МСЕ моделювання з урахуванням пошкоджень [21].

Активно досліджується поведінка зчеплення арматури з бетонами, які відрізняються від звичайних, наприклад у високоміцних (HSC), надвисокоміцних (VHSC) та ультрависокопродуктивних бетонах (UHPC) [15].

Останнім часом активно розвивається застосування методів машинного навчання (МН), включаючи штучні нейронні мережі (АНМ) [22], метод опорних векторів (SVR), для моделювання поведінки зчеплення [12]. Так, моделі на основі машинного навчання використовуються для класифікації та прогнозування форм руйнування зчеплення (висмикування або розколювання), що є складним завданням. ШІ застосовується для оцінки впливу пошкоджень, зокрема для оцінки сейсмічної стійкості кородованих залізобетонних колон на основі дата-орієнтованих підходів. МН-моделі, такі як GWO-SVR, використовуються для прогнозування міцності зчеплення залізобетонних конструкцій [12].

МЕТА

Мета дослідження полягає у проведенні системного критичного аналізу існуючих експериментальних методів дослідження зчеплення арматури з бетоном, систематизації численних визначальних факторів (включаючи властивості бетону та арматури, умови навколишнього середовища, геометричні та динамічні параметри) на міцність та характер руйнування зчеплення, а також обґрунтуванні необхідності застосування сучасних методик моніторингу (DFOS та DIC) для підвищення достовірності конститутивної моделі «напруження зчеплення – проковзування» в умовах різного ступеня обмеження арматурного стержнів у бетонній матриці.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Загальновідомим є те, що зчеплення арматури з бетоном забезпечується *хімічною адгезією, тертям*, яке виникає унаслідок усадки бетону, та *механічним зачепленням*, котрий є основним механізмом зчеплення для

арматури періодичного профілю [1]. Однак виміряти на мікроскопічному рівні внесок кожного із цих факторів у міцність зчеплення окремо вкрай важко, тому традиційно дослідниками прийнято для виразу міцності зчеплення використовувати середні та локальні напруження зчеплення [25].

Дослідження зчеплення арматури з бетоном умовно можна розділити на: експериментальні дослідження [5], розроблення аналітичних моделей [23] та створення чисельних моделей за допомогою різноманітних чисельних методів та підходів [19]. Як правило, усі ці види досліджень пов'язані між собою. Експериментальні дослідження є фундаментальною основою, яка забезпечує достовірність математичного моделювання та отриманих даних. Вони визначають реальну поведінку матеріалів та системи «арматура – бетон» [10]. Результати експериментів використовуються для оцінки та калібрування моделей. Більшість аналітичних зчеплення ґрунтується на напівемпіричному або напівтеоретичному підході: математичні моделі (наприклад, товстостінний циліндр) поєднуються з експериментальними даними для налаштування параметрів. Велика кількість аналітичних залежностей та факторів, які вони містять, сильно залежить від експериментів, включених у базу даних для калібрування [25]. Чисельні моделі (зокрема, на основі методу скінченних елементів) використовують калібровані залежності «напруження зчеплення – проковзування», щоб прогнозувати поведінку зразків, що, як правило, добре узгоджується зі спостережуваною деформаційною поведінкою [19].

Зчеплення арматури з бетоном часто характеризують залежністю «напруження зчеплення – проковзування» ($\tau_{bond} - \delta$), яка

є основною конститутивною моделлю [17], що встановлює зв'язок між номінальними до-
точними напруженнями зчеплення τ_{bond} та від-
носним проковзуванням арматури δ . Існує велике різноманіття аналітичних залежностей, включаючи степеневі формули, які відрізняються коефіцієнтами та показниками залежно від використаних баз даних результатів експериментальних досліджень [10]. Одними з найбільш розповсюджених моделей є моделі BPE (Бертеро – Попова – Елігеаузуна) та її модифікації у fib Model Code 2010, нормальний закон Холмянського, залежності χ та Harajli [25] (рис. 1).

Загальна залежність схематично зображує етапи розвитку зчеплення. Зазвичай крива складається з висхідної та нисхідної гілок. Висхідна гілка характеризує початкове зростання напружень зчеплення зі збільшенням проковзування, а нисхідна відображає зниження опору зчеплення після досягнення пікового навантаження, що є критично важливим для моделювання. У багатьох дослідженнях нисхідна гілка спрощується до прямої лінії, що може призводити до помилок порівняно з фактичною кривою [25].

Форма кривої $\tau_{bond} - \delta$ суттєво залежить від умов обмеження експериментальних зразків, які забезпечується захисним шаром бетону та/або поперечною арматурою.

Аналіз експериментальних методів досліджень зчеплення. Метод випробувань суттєво впливає на визначення напружень зчеплення та отримані експериментальні дані [5]. Усі відомі сьогодні експериментальні методики можна умовно поділити на дві основні категорії: випробування на висмикування/вдавлення (Pull-out/Push-in tests) та випробування на згин або балкові випробування (Beam tests) [24; 27].

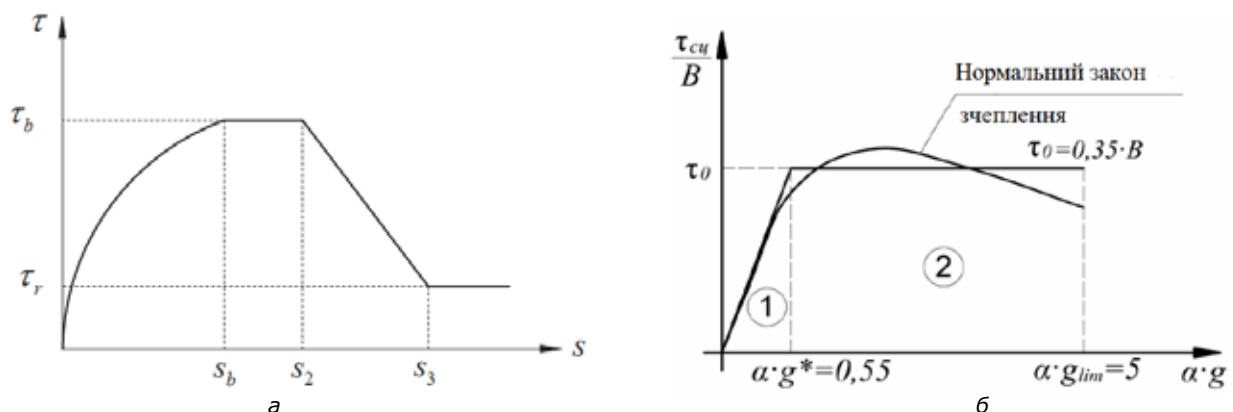


Рис. 1. Деякі найбільш розповсюджені залежності «напруження зчеплення» – «проковзування»: а) BPE-залежність $\tau_{bond} - \delta$; б) нормальний закон М. Холмянського та його пружньо-пластична апроксимація

Одним із найбільш розповсюджених експериментальних методів дослідження зчеплення є випробування на висмикування (*pull-out test*) (рис. 2).

Згідно зі схемою випробування, арматурний стержень анкерується у бетонному блоці (призмі), а випробування проводиться шляхом витягування стержня з бетонної матриці. Таким чином, арматура піддається розтягу, а бетон навколо неї перебуває у стиснутому стані [2].

Існують стандартизовані методи таких випробувань, такі як RILEM/CEB/FIP-RC6 [21], EN 10080:2015 [22].

Граничні середні дотичні напруження зчеплення τ_m розраховуються на основі руйнуючого зусилля F_u та номінальної площі контакту за формулою (1) [4]:

$$\tau_m = \frac{F_u}{\pi \cdot d_s \cdot l_b}, \quad (1)$$

де d_s – діаметр арматурного стержня; l_b – довжина анкерування стержня в бетоні.

За граничний стан часто приймають зміщення вільного кінця стержня на $d_u = 0,1$ мм, розколювання призми або розрив арматурного стержня [4].

Особливістю даної схеми випробування є те, що коли бетонний блок опирається на сталеву плиту (опору випробувальної машини) під час висмикування, створюється додаткове обтиснення або обмеження навколо зони анкерування [15], що спотворює реальний НДС арматурного стержня в бетоні згинального елемента. Для мінімізації або усунення цього

небажаного ефекту стандарти, зокрема, рекомендації RILEM/CEB/FIP-RC6 [23] пропонують специфічну геометрію зразка. Ця геометрія передбачає незакріплену ділянку біля опорної плити (рис. 1).

Наявність цієї незакріпленої зони (звичай реалізованої за допомогою ПВХ-трубки або рукава) забезпечує необхідну відстань між довжиною зчеплення та позицією стискальної опори бетону, тим самим зменшуючи вплив конічного руйнування та тертя опорної плити [18].

Методики експериментальних досліджень на висмикування вітчизняних дослідників, представлені в роботах М.М. Холмянського [4; 5], на відміну від вище зазначених стандартизованих методик не передбачають наявності зони відсутності зчеплення (рис. 3).

Це призводить до отримання вищих значень міцності зчеплення, особливо якщо довжина анкерування коротка або руйнування відбувається через розколювання, яке спричинене наявністю стискальних напружень від реакції опорної плити [20].

У цілому серед переваг випробувань на висмикування слід відзначити простоту та економічність під час виготовлення зразків та їх випробування [20; 12], гарну відтворюваність результатів [12], а також те, що дані випробування добре відображають концепцію анкерування стержня. Коефіцієнт варіації для максимального напруження зчеплення t_{max} може бути доволі низьким (у межах 18%) [9].

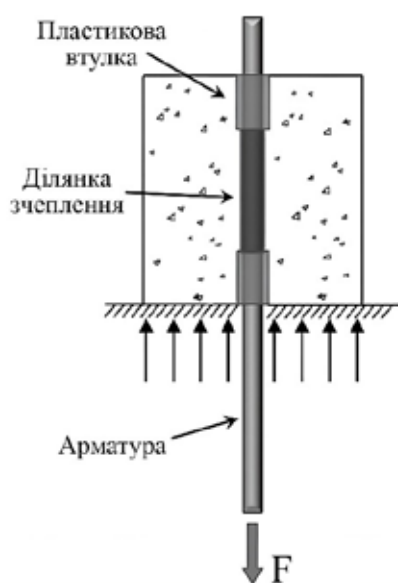


Рис. 2. Схема випробування зчеплення арматури з бетоном на висмикування [1]

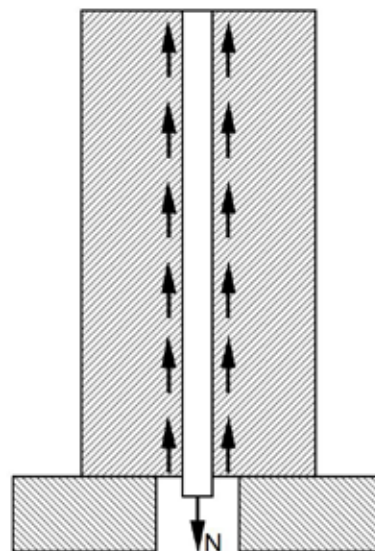


Рис. 3. Схема випробування зчеплення арматури з бетоном на висмикування без явної зони відсутності зчеплення [5]

Недоліки даного методу полягають, перш за все, у нерепрезентативному НДС, а саме у тому, що схема випробування не відповідає НДС у згинальних елементах, оскільки бетон під час випробування перебуває під дією стискальних напружень, а не розтягуючих, як у реальних конструкціях [27]. Унаслідок додаткового обмеження, яке не завжди вдається усунути повністю, як правило, дослідники отримують завищені значення напружень зчеплення порівняно з балковими випробуваннями.

Спорідненим до випробувань на висмикування є метод випробувань зчеплення на вдавлювання арматурного стержня в бетонний блок [5]. Міцність зчеплення, отримана методом вдавлювання, зазвичай вища, ніж за висмикування. Це пояснюється тим, що навколишній шар бетону чинить опір поперечному розширенню стиснутого стержня, створюючи додаткове обтиснення [5].

Випробування балок/кінців балок краще відтворюють напружено-деформований стан, характерний для залізобетонних елементів, що працюють на згин.

Схема випробування кінців балок являє собою спеціально розроблений зразок, що імітує опорну ділянку балки, де анкерований стержень висмикується під дією зовнішнього навантаження (рис. 4).

Для врівноваження моменту перекидання вертикальні опорні реакції прикладаються до кінців зразка, що дає змогу розвинути розпірно-розтяжний механізм у блоці з нахилом стискальної розпірки близько 450. Зразок сконструйований для того, щоб область анкерування розташовувалася у розтягнутій частині бетонного блоку, що є типовим для реальних конструкцій. Це забезпечує більшу гнучкість у виборі захисного шару та довжини анкерування, ніж у тестах на висмикування.

Даний метод є стандартизованим і виконується згідно з вимогами ASTM A944-10 [7].

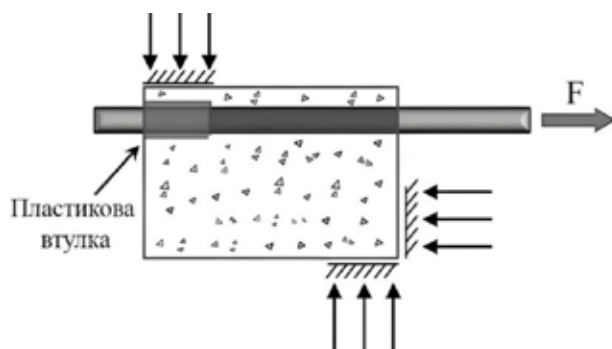


Рис. 4. Схема випробування кінців балок для дослідження зчеплення арматури з бетоном [2; 7]

Серед переваг даного методу є те, що він найкраще відображає фактичні умови анкерування арматури в реальних конструкціях [12], а також дає змогу оцінити вид руйнування через розколювання та ефект позиції бетонування. Недоліком даного методу є більш складний процес виготовлення та випробування зразків порівняно з випробуванням на висмикування [25].

У новій модифікації даного методу [20] використовується зразок, у якому дві арматури закладаються в протилежних кутах (одна в «хорошій» (нижній), інша – у «поганій» (верхній) позиції бетонування). Для оцінки анкерування часто використовують великі довжини закладення (наприклад, Ø20) (рис. 5).

Цей метод запропонований fib Model Code 2020 для визначення впливу типу бетону, ефектів обмеження та позиції бетонування на міцність анкерування [20].

Наступними різновидами балкових тестів є випробування анкерної балки (рис. 6а), балкове випробування із стержнями внахлест (рис. 6б), а також балкове випробування з шарніром посередині довжини балки (рис. 6в) [25].

Зразки для балкового випробування зі стержнями внахлест легші у виготовленні, ніж зразки анкерних балок, а міцність зчеплення, отримана за цим методом, має подібні значення до таких, які отримані за методом випробування анкерної балки [25]. Форма руйнування, яка виникає за даного методу досліджень «зчеплення – руйнування» через розколювання [22]. Балкове випробування зі сталевими шарнірами у верхній частині балки є найбільш трудомістким порівняно з іншими балковими методами.

Для отримання більш деталізованої інформації під час експериментальних випробувань останнім часом застосовуються ефективні новітні метод моніторингу.

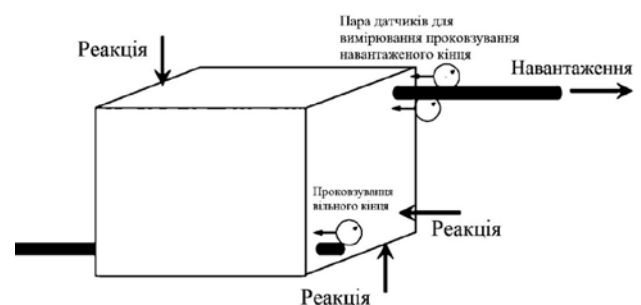


Рис. 5. Схема модифікованого випробування кінців балок для дослідження зчеплення арматури з бетоном [22]

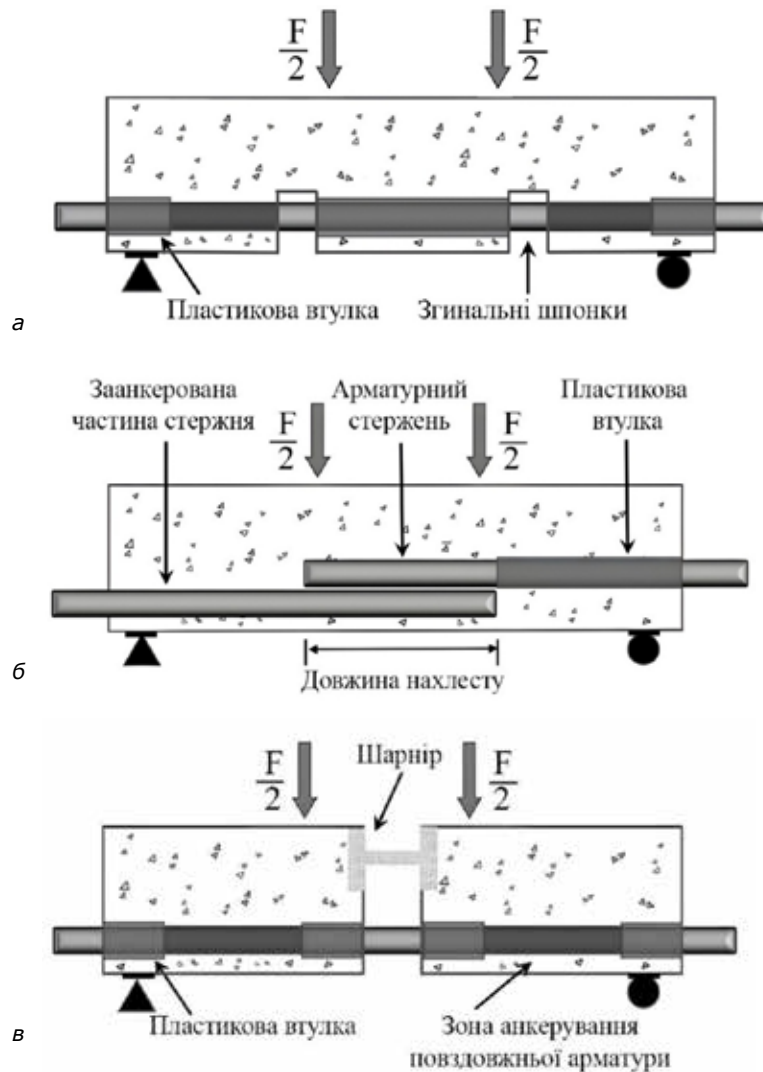


Рис. 6. Схеми балкових випробувань для дослідження зчеплення арматури з бетоном [25]: а) анкерної балки; б) зі стержнями внахлест; в) із шарніром посередині

Метод розподіленого волоконно-оптичного зондування (DFOS/FOS) дає змогу безперервно контролювати деформації арматурного стержня [13]. Використовується для вимірювання локальних напружень зчеплення τ_b та проковзування δ . Дана методика дає змогу вимірювати деформації з високою просторовою роздільною здатністю (наприклад, до 0,65 мм) і високими частотами збору даних [9]. DFOS можуть вимірювати деформації до 3–4%. Для вимірювання використовуються дуже тонкі скляні дроти (діаметром 125 мкм), порівнянні з товщиною волосини [8]. Сенсори встановлюються в спеціально вирізані поздовжні пази (наприклад, 1 мм x 1 мм) на протилежних сторонах арматурних стрижнів і фіксуються епоксидною смолою. Виміряні деформації арматури ε_s є ключовими вихідними даними, за якими можуть бути розраховані значення

напружень зчеплення τ_{bond} та відносних проковзувань δ .

На відміну від традиційних тензодатчиків, роздільна здатність яких була обмежена мінімальною відстанню між датчиками, DFOS надає квазібезперервну інформацію про деформації вздовж усього стержня [9].

DFOS мінімально впливає на поведінку арматури, оскільки це тонкі волокна, які не вимагають видалення ребер стержня. Це дає змогу інструментувати стержні малих діаметрів (діаметром 8–10 мм), що було неможливо для громіздких тензодатчиків або FBG-сенсорів [8].

Метод цифрової кореляції зображень (DIC) використовує інноваційну дешеву безконтактну оптичну техніку, яка використовується для вимірювання поля переміщень на поверхні бетону та розкриття тріщин (поздовжніх і конічних) [9]. DIC

працює шляхом порівняння цифрових фотографій зразка на різних стадіях деформування (рис. 7).

Система відстежує блоки пікселів стохастичного малюнка, нанесеного на поверхню бетону, і використовує алгоритм кореляції для побудови 2D- та 3D-векторних полів переміщень і карт деформацій [8]. Це дає змогу контролювати кінематику тріщин, включаючи вимірювання відкриття тріщин відколювання та тріщин розколювання на поверхні бетону [13]. Також цей метод використовується для обчислення переміщень бетону δ_s на поверхні, які є необхідними для визначення відносного проковзування δ_s .

Головна цінність методики полягає у тому, що вона забезпечує зовнішню валідацію внутрішніх даних DFOS та надає критично важливу інформацію про стан поверхні бетону, який є визначальним для руйнування.

Вплив довжини анкерування на напруження зчеплення. Випробування на висмикування залежно від довжини анкерування арматурного стержня у бетоні експериментальних зразків можна поділити на два види: випробування з малою та великою довжинами анкерування (рис. 8).

Випробування зразків із малими довжинами анкерування (наприклад, $l_b = \varnothing 5$) часто проводять із метою побудови локальної залежності «напруження зчеплення – проковзування» [9]. Такі випробування (із довжиною анкерування у межах від $\varnothing 1$ до $\varnothing 5$) показують, що арматура протягом усього етапу навантаження працює у межах лінійно-пружної фази роботи [27]. Так, для зразків із довжиною анкерування $l_b = \varnothing 5$ зі збільшенням міцності бетону (клас C16/20 до C25/30) міцність зчеплення (визначена як середня) для стержнів великих діаметрів (20 мм і 25 мм) зменшувалася, і за такої

довжини міцність арматури не використовується значною мірою [4].

Зі збільшенням довжини анкерування (наприклад, $l_b > \varnothing 10$ або $l_b > \varnothing 15$) розподіл напружень стає складнішим, а середня міцність зчеплення t_b зазвичай знижується. Коли довжина анкерування є значною, арматура піддається значним деформаціям через великі напруження та видовження. Так, у роботі [22] встановлено, що збільшення довжини анкерування з $\varnothing 5$ до $\varnothing 10$ призводило до зниження середньої міцності зчеплення t_b . Хоча загалом сила висмикування P_{max} зростає зі збільшенням довжини анкерування, цей ефект негативно впливає на середню міцність зчеплення t_b , яка може зменшитися до 32%. Це зниження середньої міцності є прямим наслідком того, що пікові напруження зчеплення, які утворюються біля навантаженого кінця, не можуть виникнути на всій довжині одночасно.

У зразках із великою довжиною анкерування напруження зчеплення t майже завжди розподіляються нерівномірно по довжині арматурного стержня, постійно змінюючи свої значення по довжині контакту арматури з бетоном [3]. Згідно з технічною теорією зчеплення, напруження зчеплення τ_b пов'язані з градієнтом осевих напружень у стержні. У пружній стадії, коли взаємні зміщення стержня і бетону незначні, навантаження передається переважно навантаженим кінцем, і напруження зчеплення є максимальними поблизу навантаженого кінця та зменшуються по довжині стержня. Руйнування зони контакту арматури з бетоном починається з верхньої грані експериментального зразка, у зв'язку з чим максимум епюри напружень зчеплення

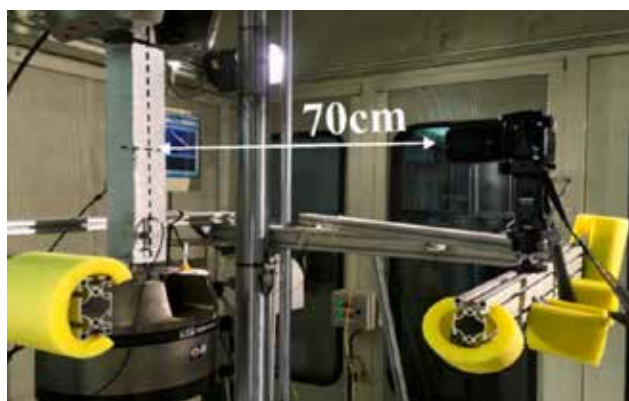


Рис. 7. Випробування армованого призматичного зразка на центральний розтяг та установка цифрової кореляції зображень [8]

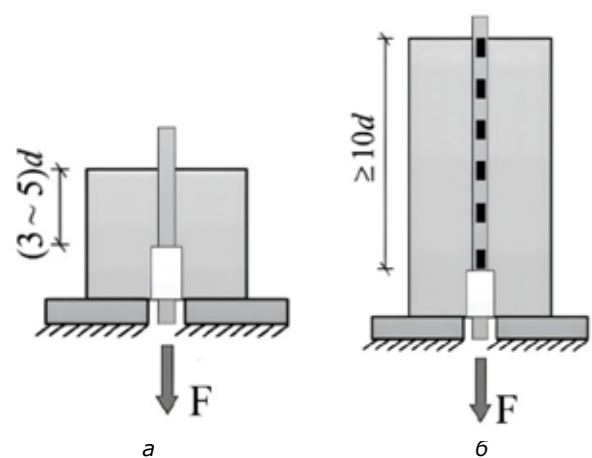


Рис. 8 Види випробувань зчеплення арматури з бетоном на висмикування [22]: а) зразок із малою довжиною анкерування; б) зразок із великою довжиною анкерування

поступово зсувається в глибину зразка у міру збільшення довжини зони зруйнованого контакту (рис. 9).

Однак для зразків із малою довжиною анкерування встановлено, що напруження зчеплення мають майже рівномірний характер розподілу по довжині зони анкерування [25].

Види руйнування та їх вплив на криві

τ_{bond} – s . Довжина анкерування, як і захисний шар бетону та/або наявність поперечного армування [10], напряду впливають на характер руйнування зразків.

За відносно великих довжин анкерування і великого захисного шару ($s \geq \varnothing 5$) зазвичай відбувається руйнування типу висмикування (pull-out failure [20]) (рис. 10а),

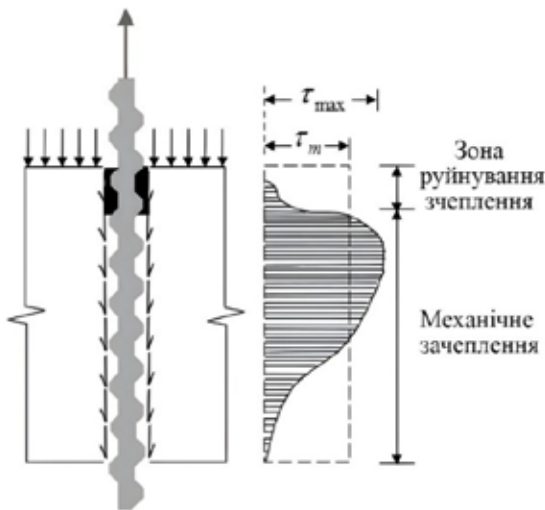


Рис. 9. Епюра напружень зчеплення арматури з бетоном при випробуванні на висмикування [13]

за якого відбувається зріз бетону над ребрами арматури.

Крихке руйнування типу розколювання (splitting failure) є більш імовірним за недостатнього захисного шару бетону або відсутнього поперечного армування (рис. 10б). Однак деякі дослідження показують, що погані умови бетонування (верхнє бетонування) також можуть спричиняти руйнування типу розколювання, особливо у разі довгої довжини анкерування [27].

Комбінований вид руйнування, відомий також як руйнування типу висмикування, спричинене розколом (splitting induced pull-out, SPO), або pull-out splitting failure (SP), являє собою перехідний режим руйнування між крихким руйнуванням типу розколювання та пластичним руйнуванням типу висмикування [12] (рис. 11а). Даний вид руйнування виникає в умовах часткового або помірного обмеження (яке забезпечується захисним шаром бетону та/або поперечним армуванням), тобто в умовах, які знаходяться між двома крайнощами – недостатнього обмеження та достатнього обмеження, наприклад за $\varnothing 1 < s < \varnothing 5$ і коли крихке руйнування запобігається [10].

Також можливим видом руйнування експериментальних зразків за таких умов є руйнування арматури від розтягування (rebar failure), що означає, що міцність зчеплення є вищою за міцність самого стержня (рис. 11б). Як правило, ця форма руйнування виникає поза зоною зчеплення (за межами бетонної матриці) [14]. Однак дана форма руйнування виникає також і під час випробувань зразків із малою довжиною анкерування арматури

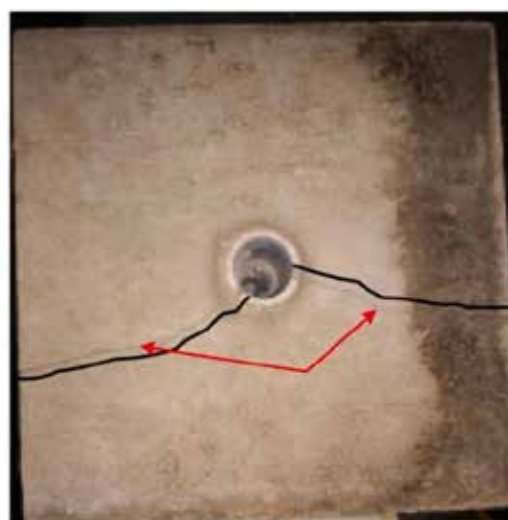


Рис. 10. Типові схеми руйнування експериментальних зразків за висмикування арматурного стержня з бетонного блоку [12]: а) схема руйнування типу висмикування; б) схема руйнування типу розколювання



Рис. 11. Типові схеми руйнування експериментальних зразків за висмикування арматурного стержня з бетонного блоку [12]: а) схема руйнування типу висмикування, спричиненого розколом; б) схема руйнування арматури від розтягування

(наприклад, $l_b = \emptyset 2$ або $l_b = \emptyset 4$) у разі високоміцного бетону (UHPC), у якому опір зчеплення є значно вищим порівняно зі звичайним бетоном [15].

Згідно з рис. 12 та даними інших джерел [22], кожен із видів руйнування має характерну криву «напруження зчеплення – проковзування».

Так, для руйнування типу висмикування крива $\tau_{bond} - s$ має відносно пластичний характер та характеризується найвищим піковим напруженням зчеплення $\tau_{b,max}$. Дана крива має гарну узгодженість з аналітичною залежністю, прийнятою у fib Model Code 2010. Проміжна крива (за часткового/помірного обмеження стержня та комбінованого виду руйнування)

демонструє зниження пікових напружень зчеплення порівняно з умовами гарного обмеження арматурного стержня, але має менш крихку постпікову реакцію. В умовах відсутності обмеження переміщень арматурного стержня (за руйнування типу розколювання) крива $\tau_{bond} - s$ має крихкий характер, а саме характеризується різким падінням напружень зчеплення одразу після досягнення пікових напружень.

Рис. 12 також демонструє вплив умов бетонування (ефект розташування) на залежність $\tau_{bond} - s$. Так, гарні умови (нижнє бетонування) передбачають, що арматурні стержні, відлиті в нижній частині форми, демонструють вищу міцність зчеплення та більшу жорсткість кривої. І навпаки, погані умови бетонування (верхнє бетонування) характеризують стержні, відлиті поблизу верхньої частини форми, які мають меншу міцність зчеплення та менш жорстку реакцію. Це пояснюється пластичним осіданням свіжого бетону та утворенням порожнин під ребрами стержня [10].

У моделях, таких як fib Model Code 2010 (MC2010), ці умови враховувалися шляхом зменшення максимального напруження зчеплення $\tau_{b,max}$ та збільшення відповідних ним значенням проковзувань δ для поганих умов бетонування [9].

Аналіз інших факторів, які впливають на міцність зчеплення арматури з бетоном. Як відомо, зчеплення арматури з бетоном залежить від численних параметрів [9]. Ці параметри можуть бути систематизовані у сім основних груп: геометричні параметри армування, фізичні характеристики арматури та бетону, тип напружено-деформованого стану (НДС), деформаційні параметри, тріщиностійкість та корозія [6].

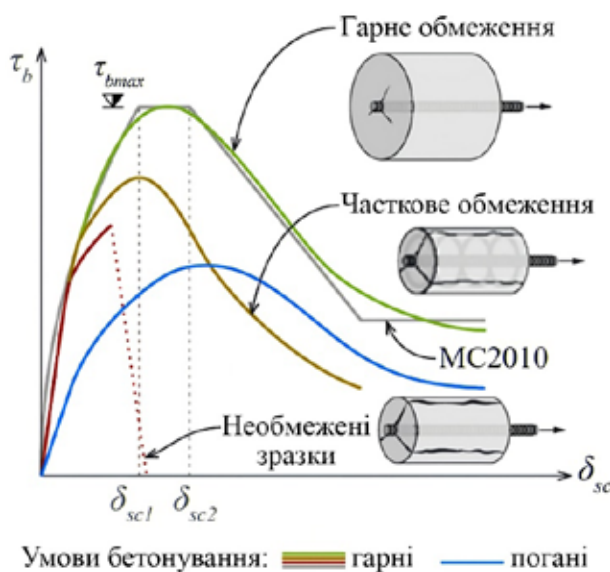


Рис. 12. Діаграми «напруження зчеплення – проковзування» для різних умов бетонування та різних обмежень [10]

Вплив геометричних та технологічних факторів, таких як захисний шар бетону s (або відношення $s / \varnothing$), наявності обмеження внаслідок поперечного тиску або поперечної арматури, умов бетонування на міцність зчеплення було розглянуто вище.

Вплив характеристик бетону та його властивостей

Міцність бетону f_{cm} є критично важливим фактором. Зазвичай міцність зчеплення лінійно пропорційна кореневі квадратному з міцності бетону. Бетон вищого класу (міцності) демонструє кращу стійкість до тріщин і кращу пакувальну структуру, що покращує властивості зчеплення [22]. Хоча загалом збільшення класу бетону призводить до збільшення зчеплення, приріст може бути меншим для вищих класів, аніж для менших [4]. З іншого боку, деякі дослідження показують, що лінійна залежність може переоцінювати міцність зчеплення для бетонів із вищою міцністю на стиск [9].

На міцність зчеплення впливає тип бетону, включаючи використання перероблених матеріалів та промислових відходів. Наприклад, деякі дослідження порівнюють звичайний ущільнений бетон та самоущільнюваний бетон, указуючи, що вміст в'язучого відіграє важливу роль у міцності бетону та, відповідно, зчепленні [22].

Включення фібри (наприклад, сталевих чи гібридних сталєво-поліпропіленових) може впливати на міцність зчеплення [16]. Додавання латексу, наприклад полівінілацетату (PVA), може покращити зчеплення завдяки підвищенню адгезійних властивостей на пружній стадії. Навіть розмір та тип заповнювача (агрегату) можуть впливати на розвиток міцності зчеплення [25].

Характеристики арматури та її геометрія

Діаметр арматури є ключовим геометричним параметром [6]. Загалом збільшення діаметра стержня призводить до зниження середньої міцності зчеплення. Наприклад, за довжини анкерування для стержнів діаметром 20 мм і 25 мм міцність зчеплення зменшувалася порівняно з меншими діаметрами [4].

В арматурі періодичного профілю напруження зчеплення формуються завдяки концентрації напружень поблизу її ребер. На міцність зчеплення впливають такі параметри, як *відносна площа ребер* (індекс зчеплення, або індекс Рема, f_R) та *поперечний кут ребра* β . Арматура з мінімальним індексом зчеплення може досягати вищої міцності та більш жорсткої реакції, ніж передбачено fib Model Code 2010 [9].

Орієнтація ребер відносно площини розколювання також може мати вплив. У випадках, де переважає руйнування через відрив або розколювання, вплив орієнтації ребер є більшим на перерозподіл напружень зчеплення, ніж на розвиток тріщин [10].

Стан поверхні (наприклад, іржа, забруднення, покриття) впливає на зчеплення. Деякі покриття (наприклад, епоксидні) можуть погіршувати зчеплення [13].

Умови навколишнього середовища та навантаження

Корозія арматури є одним із найбільш критичних видів погіршення стану залізобетонних конструкцій. Корозія призводить до розтріскування бетону та деградації зчеплення. Спочатку (за невеликої корозії до 6%) може спостерігатися підвищення зчеплення (через розширення продуктами корозії), але за перевищення певного рівня (зазвичай понад 6%) міцність зчеплення різко знижується [18].

Підвищення температури або вплив вогню є руйнівним. Під час нагрівання може спостерігатися значне зниження міцності зчеплення (до 54%) через утрату модуля пружності бетону та утворення численних тріщин (розколювання). Зниження температури (криогенні рівні) може призводити до збільшення міцності зчеплення до певного рівня (-80°C), після чого вона знижується [22].

Міцність зчеплення залежить від *швидкості навантаження*. Динамічні впливи (від руху кранів, сейсмічні чи вибухові) належать до важливих факторів НДС [14]. Дослідження показують, що за високих швидкостей навантаження поведінка зчеплення змінюється. Висока швидкість навантаження, як правило, призводить до підвищення міцності зчеплення арматури з бетоном. Цей ефект підтверджено численними експериментальними дослідженнями [14; 25].

Дослідження, проведені з використанням випробувань на висмикування (pull-out tests), показали, що за збільшення швидкості навантаження з 0,1 мм/с до 10 мм/с середні максимальні напруження зчеплення зросли приблизно на 20% (із 18,8 МПа до 22,6 МПа) [16].

Навіть за подальшого збільшення швидкості до 100 мм/с максимальні напруження зчеплення (20,8 МПа) усе ще були на 11% вищими, ніж за статичного навантаження (0,1 мм/с). Інші дослідження також підтверджують, що динамічний фактор збільшення DIF для середнього напруження зчеплення може становити близько 1,5 [14].

ВИСНОВКИ

На основі проведеного критичного аналізу експериментальних методів, систематизації чисельних факторів, що впливають на міцність зчеплення, та висвітлення ролі сучасного моніторингу можна сформулювати такі ключові висновки:

1. Основною залежністю для опису взаємодії арматури з бетоном є залежність «напруження зчеплення – проковзування», форма якої критично залежить від умов обмеження зразків (наявності поперечного тиску, захисного шару та/або поперечної арматури).

2. Випробування на висмикування є простими та економічними, але створюють нерепрезентативний напружено-деформований стан (НДС), оскільки бетон знаходиться у стиснутому, а не розтягнутому стані, що часто призводить до завищених значень напружень зчеплення, особливо якщо в експериментальних зразках не передбачено зони відсутності зчеплення. Балкові випробування, зокрема випробування кінців балок (Beam-end tests), краще відображають фактичні умови роботи арматури у розтягнутій зоні згинальних елементів. Нова модифікація цього методу, запропонована fib Model Code 2020, дає змогу ефективно оцінювати вплив ефекту позиції бетонування та обмеження.

3. Застосування розподіленого волоконно-оптичного зондування (DFOS/FOS) дає змогу отримувати квазібезперервну інформацію про деформації арматури, що є ключовим для точного розрахунку локальних напружень зчеплення τ_{bond} та проковзування δ . Метод цифрової кореляції зображень (DIC) забезпечує зовнішню валідацію даних DFOS та надає інформацію про кінематику тріщин (розколювання, відколювання) на поверхні бетону.

4. Збільшення довжини анкерування (наприклад, з $\varnothing 5$ до $\varnothing 10$) призводить до нерівномірного розподілу напружень зчеплення та, як наслідок, до зниження середньої міцності зчеплення (до 32% зниження). Погані умови бетонування (верхнє бетонування) викликають зниження міцності зчеплення та менш жорстку реакцію через пластичне осідання та утворення порожнин під ребрами стержня.

5. Товщина захисного шару s , наявність поперечного тиску від навантаження та/або поперечне армування є визначальними факторами обмеження, які впливають на характер руйнування. Достатнє обмеження сприяє пластичному руйнуванню типу висмикування, яке характеризується вищим максимальним напруженням зчеплення та краще узгоджується

з fib Model Code 2010. Недостатнє обмеження призводить до крихкого руйнування типу розколювання.

6. Початкова корозія (до 6%) може дещо підвищити зчеплення, але за перевищення цього рівня корозія призводить до розтріскування бетону та різкої деградації міцності зчеплення. Вплив високих температур (вогню) спричиняє значне зниження міцності зчеплення (до 54%), тоді як зниження температури (криогенні рівні) може підвищити зчеплення до певного рівня. Динамічні впливи (висока швидкість навантаження) збільшують міцність зчеплення, причому динамічний фактор збільшення може сягати близько 1,5.

Таким чином, для вдосконалення аналітичних та чисельних моделей зчеплення необхідний мультифакторний підхід, що враховує складну взаємодію між властивостями матеріалів, умовами обмеження та динамічними/корозійними впливами, а деталізовані дані, отримані за допомогою DFOS та DIC, є ключовими для механістично обґрунтованого визначення параметрів залежності τ_{bond} – δ .

ПОДЯКИ

Автори висловлюють глибоку вдячність Міністерству освіти і науки України за підтримку даної роботи, яка була виконана в рамках проекту науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених № 0125U000766 «Зчеплення арматури з бетоном у конструкціях захисних споруд з урахуванням нових ефектів опору».

ЛІТЕРАТУРА

[1] Дмитренко Є.А., Бакай Т.В. Залежності зчеплення арматури з бетоном за різних видів руйнування зони їх контакту. *Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання»*. Київ : НУБіП України, 2025. С. 524–527.

[2] Дмитренко Є.А., Денисенко Д.О. Зміна параметрів зчеплення арматури з бетоном за дії довготривалих навантажень. *Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання»*. Київ : НУБіП України, 2025. С. 527–530.

[3] Ромашко О.В., Журавський В.М., Ромашко О.Д. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2019. Вип. 37. С. 214–221. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILA=&S21STR=rmkbs_2019_37_28

[4] Філіпчук С., Поляновська О. Дослідження опору витягання арматурних стержнів із бетонів різних класів. *Сучасні технології та методи розрахунків у*

будівництві. 2019. Вип. 11. С. 132–139. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1\(11\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1(11)-16).

[5] Філіпчук С.В., Поляновська О.Є. Порівняльний аналіз досліджень зчеплення арматури з бетоном різними методами випробування. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. Вип. 41. С. 253–257. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.028>.

[6] Яковенко І.А., Дмитренко Є.А. Класифікація параметрів та пошук аналітичних залежностей зчеплення арматури з бетоном у залізобетонних конструкціях будівель та споруд. *Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання»*. Київ : НУБіП України, 2025. С. 533–536.

[7] ASTM. Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens. A944-10. USA: ASTM, 2015. 4 p. DOI: <http://doi.org/10.1520/A0944-10R15>.

[8] Bado M.F., Casas J.R., Kaklauskas G. Distributed Sensing (DOFS) in Reinforced Concrete Members for Reinforcement Strain Monitoring, Crack Detection and Bond-Slip Calculation. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. No. 111385. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111385>.

[9] Corres E., Muttoni A. Bond of Steel Reinforcement Based on Detailed Measurements: Results and Interpretations. *Structural Concrete*. 2023. Vol. 24. P. 7173–7204. DOI: <http://doi.org/10.1002/suco.202300324>.

[10] Corres E., Muttoni A. Local Bond-Slip Model Based on Mechanical Considerations. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 314. No. 1181190. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118190>.

[11] Dmytrenko Y., Usenko M., Yakovenko I. Collisions of Strength Determination Modeling for Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Constructions with Small Eccentricities by Normal Sections in Lira-FEM Software. In: Blikharskyi Z., Zhelykh V. (Eds.). *Proceedings of EcoComfort 2024*. EcoComfort 2024. Lecture Notes in Civil Engineering. Cham: Springer, 2024. P. 50–63. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_5.

[12] Fan C., Zheng Y., Wen Y., Sun M. Classification and Prediction of Deformed Steel and Concrete Bond-Slip Failure Modes Based on SSA-ELM Model. *Structures*. 2023. Vol. 57. No. 105131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105131>.

[13] Galkovski T., Mata-Falcón J., Kaufmann W. Experimental Investigation of Bond and Crack Behaviour of Reinforced Concrete Ties Using Distributed Fibre Optical Sensing and Digital Image Correlation. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 292. No. 116467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116467>.

[14] Kang S.-B., Wang S., Long X., Wang D.-D., Wang C.-Y. Investigation of Dynamic Bond-Slip Behaviour of Reinforcing Bars in Concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. No. 120824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120824>.

[15] Khaksefidi S., Ghalehnovi M., Brito J. Bond Behaviour of High-Strength Steel Rebars in Normal (NSC) and Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Journal of*

Building Engineering. 2021. Vol. 33. No. 101592. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101592>.

[16] Long X., Wang C.-Y., Zhao P.-Z., Kang S.-B. Bond Strength of Steel Reinforcement under Different Loading Rates. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 238. No. 117749. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117749>.

[17] Lv X., Yu Z., Shan Z. Bond Stress-Slip Model for Rebar-Concrete Interface Under Monotonic and Cyclic Loading. *Structures*. 2021. Vol. 34. P. 498–506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.093>.

[18] Mak W.T.M., Lees J.M. Bond Strength and Confinement in Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 355. No. 129012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129012>.

[19] Mazumder M.H., Gilbert R.I. Finite Element Modelling of Bond-Slip at Anchorages of Reinforced Concrete Members Subjected to Bending. *SN Applied Science*. 2019. Vol. 1. No. 1332. DOI: <http://doi.org/10.1007/s42452-019-1368-5>.

[20] Metelli G., Cairns J., Plizzari G. A New fib Model Code Proposal for a Beam-End Type Bond Test. *Structural Concrete*. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 4446–4463. DOI: <http://doi.org/10.1002/suco.202300124>.

[21] RILEM TC. RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. In: RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. 1983. P. 218–220. URL: https://www.rilem.net/publication/publication/4?id_papier=4020

[22] Vembu P.R.S., Ammasi A.K. A Comprehensive Review on the Factors Affecting Bond Strength in Concrete. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 3. No. 577. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13030577>.

[23] Yakovenko I., Dmytrenko Y., Bakulina V. Construction of Analytical Coupling Model in Reinforced Concrete Structures in the Presence of Discrete Cracks. In: Bieliatynskyi A., Breskich V. (Eds.). *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer, 2023. P. 107–120. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_10.

[24] Yakovenko I.A., Dmytrenko Ye.A. Influence of Reinforcement Parameters on the Width of Crack Opening in Reinforced Concrete Structures. *Achievements of Ukraine and EU Countries in Technological Innovations and Invention*: coll. mon. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2022. P. 510–536. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-18>.

[25] Zheng Y., Fan C., Ma J., Wang S. Review of Research on Bond-Slip of Reinforced Concrete Structures. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 385. No. 131437. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131437>.

REFERENCES

[1] Dmytrenko, Ye.A. (2025). Zalezhnosti zcheplennia armatury z betonom pry riznykh vydakh ruinovannia zony ikh kontaktu [Dependence of Reinforcement Bonding with Concrete under Various Types of Destruction of their Contact Zone]. In: *Zbirnyk tez dopovidei XII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Kramarovski chytannia» – Collection of Abstracts of the XII International Scientific and Technical Conference*

«Kramarov Readings» (pp. 524–527). Kyiv: NULES of Ukraine [in Ukrainian].

[2] Dmytrenko, Ye.A., & Denysenko, D.O. (2025). Zmina parametriv zchepлення armatury z betonom pry dii dovyhotryvalykh navantazhen [Change in the Parameters of Reinforcement Bonding with Concrete under Long-Term Loads]. In: *Zbirnyk tez dopovidei XII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Kramarovski chytannia» – Collection of Abstracts of the XII International Scientific and Technical Conference «Kramarov Readings»* (pp. 527–530). Kyiv: NULES of Ukraine [in Ukrainian].

[3] Romashko, O.V., Zhuravskiy, V.M., & Romashko, O.D. (2019). Uzahalnena model zchepлення armatury z betonom [Generalised Model of Reinforcement Bonding with Concrete]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy – Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Structures*, 37, 214–221. Retrieved from: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILA=&S21STR=rmkbs_2019_37_28 [in Ukrainian].

[4] Filipchuk, S.V., & Polianovska, O.Ye. (2019). Doslidzhennia oporu vytiahannia armaturnykh sterzhniv z betoniv riznykh klasiv [Research of the Resistance of Pulling out Steel Bars from Concretes of Different Classes]. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi – Modern Technologies and Methods of Calculations in Construction*, 11, 132–139. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1\(11\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1(11)-16) [in Ukrainian].

[5] Filipchuk, S.V., & Polianovska, O.Ye. (2022). Porivniialnyi analiz doslidzhen zchepлення armatury z betonom riznymi metodamy vyprobuvan [Comparative Analysis of Research of Adhesion of Reinforcement with Concrete by Different Test Methods]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy – Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Structures*, 41, 253–257. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.028> [in Ukrainian].

[6] Yakovenko, I.A., & Dmytrenko, Ye.A. (2025). Klasyfikatsiia parametriv ta poshuk analitychnykh zalezhnostej zchepлення armatury z betonom u zalizobetonnykh konstrukciakh budivel ta sporud [Classification of Parameters and Search for Analytical Dependencies of Reinforcement Bonding with Concrete in Reinforced Concrete Structures of Buildings and Structures]. In: *Zbirnyk tez dopovidei XII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Kramarovski chytannia» – Collection of Abstracts of the XII International Scientific and Technical Conference «Kramarov Readings»* (pp. 533–536). Kyiv: NULES of Ukraine [in Ukrainian].

[7] ASTM (2105). *Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens*. A944-10. USA: ASTM. <http://doi.org/10.1520/A0944-10R15> [in English].

[8] Bado, M.F., Casas, J.R., & Kaklauskas, G. (2021). Distributed Sensing (DOFS) in Reinforced Concrete Members for Reinforcement Strain Monitoring, Crack Detection and Bond-Slip Calculation. *Engineering*

Structures, 226, article number 111385. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111385> [in English].

[9] Corres, E., & Muttoni, A. (2023). Bond of Steel Reinforcement Based on Detailed Measurements: Results and Interpretations. *Structural Concrete*, 24, 7173–7204. <http://doi.org/10.1002/suco.202300324> [in English].

[10] Corres, E., & Muttoni, A. (2024). Local Bond-Slip Model Based on Mechanical Considerations. *Engineering Structures*, 314, article number 1181190. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.1181190> [in English].

[11] Dmytrenko, Y., Usenko, M., & Yakovenko, I. (2024). Collisions of Strength Determination Modeling for Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Constructions with Small Eccentricities by Normal Sections in Lira-FEM Software. In: Z. Blikharskyi & V. Zhelykh (Eds.), *Proceedings of EcoComfort 2024. EcoComfort 2024. Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 50–63). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_5 [in English].

[12] Fan, C., Zheng, Y., Wen, Y., & Sun, M. (2023). Classification and Prediction of Deformed Steel and Concrete Bond-Slip Failure Modes Based on SSA-ELM Model. *Structures*, 57, article number 105131. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105131> [in English].

[13] Galkovski, T., Mata-Falcón, J., & Kaufmann, W. (2023). Experimental Investigation of Bond and Crack Behaviour of Reinforced Concrete Ties Using Distributed Fibre Optical Sensing and Digital Image Correlation. *Engineering Structures*, 292, article number 116467. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116467> [in English].

[14] Kang, S.-B., Wang, S., Long, X., Wang, D.-D., & Wang, C.-Y. (2020). Investigation of Dynamic Bond-Slip Behaviour of Reinforcing Bars in Concrete. *Construction and Building Materials*, 262, article number 120824. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120824> [in English].

[15] Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M., & Brito, J. (2021). Bond Behaviour of High-Strength Steel Rebars in Normal (NSC) and Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Journal of Building Engineering*, 33, article number 101592. <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101592> [in English].

[16] Long, X., Wang, C.-Y., Zhao, P.-Z., & Kang, S.-B. (2020). Bond Strength of Steel Reinforcement under Different Loading Rates. *Construction and Building Materials*, 238, article number 117749. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117749> [in English].

[17] Lv, X., Yu, Z., & Shan, Z. (2021). Bond Stress-Slip Model for Rebar-Concrete Interface Under Monotonic and Cyclic Loading. *Structures*, 34, 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.093> [in English].

[18] Mak, W.T.M., & Lees, J.M. (2022). Bond Strength and Confinement in Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 355, article number 129012. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129012> [in English].

[19] Mazumder, M.H., & Gilbert, R.I. (2019). Finite Element Modelling of Bond-Slip at Anchorages of Reinforced Concrete Members Subjected to Bending. *SN Applied Science*, 1, article number 1332. <http://doi.org/10.1007/s42452-019-1368-5> [in English].

[20] Metelli, G., Cairns, J., & Plizzari, G. (2023). A New fib Model Code Proposal for a Beam-End Type Bond Test. *Structural Concrete*, 24(4), 4446–4463. <http://doi.org/10.1002/suco.202300124> [in English].

[21] RILEM TC. (1983). RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. In: *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials* (pp. 218–220). Retrieved from: https://www.rilem.net/publication/publication/4?id_papier=4020 [in English].

[22] Vembu, P.R.S., & Ammasi, A.K. (2023). A Comprehensive Review on the Factors Affecting Bond Strength in Concrete. *Buildings*, 13(3), article number 577. <https://doi.org/10.3390/buildings13030577> [in English].

[23] Yakovenko, I., Dmytrenko, Y., & Bakulina, V. (2023). Construction of Analytical Coupling Model in Reinforced Concrete Structures in the Presence

of Discrete Cracks. In: A. Bieliatynskiy & V. Breskich (Eds.), *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 107–120). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_10 [in English].

[24] Yakovenko, I.A., & Dmytrenko, Ye.A. (2022). Influence of Reinforcement Parameters on the Width of Crack Opening in Reinforced Concrete Structures. In: *Achievements of Ukraine and EU Countries in Technological Innovations and Invention* (pp. 510–536). Riga: Izdevniecība «Baltija Publishing». <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-18> [in English].

[25] Zheng, Y., Fan, C., Ma, J., & Wang, S. (2023). Review of Research on Bond-Slip of Reinforced Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, 385, article number 131437. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131437> [in English].

ABSTRACT

Dmytrenko Ye., Usenko M., Pylypaka O., Bakay T., Yakovenko I. Critical Analysis of Experimental Research Methods and Factors Affecting the Bond Between Reinforcement and Concrete

Purpose. The purpose of this study is to conduct a systematic critical analysis of existing experimental methods (pull-out and beam tests) for studying the bond of reinforcement with concrete, systematization of numerous determining factors (including the properties of concrete and reinforcement, environmental conditions, geometric and dynamic parameters) on the strength and nature of bond failure, as well as justifying the need to use modern monitoring techniques (DFOS and DIC) to improve the reliability of the bond-slip model under conditions of varying types of rebar confinement in the concrete matrix.

Methodology. The study is based on a critical analysis and comparison of traditional experimental methods (pull-out/push-in tests and beam tests/beam end tests), which are fundamental for determining average and local bond stresses. The influence of material factors (concrete class, reinforcement diameter), geometric factors (anchorage length, concrete cover, confinement, casting conditions), and environmental/dynamic factors (corrosion, temperature, loading rate) has been systematized. The key methodological approach is to analyze the potential of the latest monitoring techniques: distributed fiber optic sensing (DFOS) and digital image correlation (DIC).

Results. It has been found that pull-out tests create an unrepresentative stress-strain state (concrete compression) and often give overestimated bond strength values, especially in specimens without a bond-free zone. In contrast, beam tests (in particular, the fib Model Code 2020 modification) better reflect the behavior of reinforcement in the tension zone of elements. DFOS and DIC allow accurate calculation of local parameters τ_{bond} and δ , providing external validation of data and control of fracture kinematics. It has been established that increasing the anchorage length (e.g., from 5 $\varnothing$ to 10 $\varnothing$) leads to a decrease in the average bond strength (up to 32%). Well-confinement of rebar in concrete prevents brittle splitting, promoting plastic pull-out failure, which is better described by the $\tau_{\text{bond}} - \delta$ analytical models recommended by current building codes. Corrosion (over 6%) and high temperatures significantly reduce bond strength, while high loading rates (dynamic effects) can increase it (dynamic factor of increase DIF ≈ 1.5).

Scientific novelty. The scientific novelty lies in the systematic critical synthesis of the multifactorial problem of bond, which highlights the limitations of traditional

experimental databases and justifies the synergistic use of DFOS and DIC as a key tool for obtaining detailed local data. These data are necessary for mechanistically justified refinement of the parameters of the bond – slip model under conditions that correspond to operational ones (taking into account the influence of confinement, technological, dynamic, and corrosion effects).

Practical relevance. A critical analysis of existing traditional testing methods allows the development of new, more advanced methods for experimental studies of the bond between reinforcement and concrete. The conclusions regarding the feasibility of testing methods and influencing factors create a reliable experimental basis for the development of improved numerical and analytical models of bond, which will ultimately increase the reliability of calculations of crack width, anchoring, and develop sound recommendations for the renovation and reinforcement of buildings and structures.

Keywords: reinforced concrete, bond between reinforcement and concrete, bond-slip model, average bond stress, pull-out test, beam-end test, distributed fiber optic sensing (DFOS) method, digital image correlation (DIC) method.

AUTHOR`S NOTE:

Dmytrenko Yevhen, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: zdmitrenko26@gmail.com, orcid: 0000-0001-9737-943X.

Usenko Mykola, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: usenko.m@nubip.edu.ua, orcid: 0009-0001-1969-1265.

Pylypaka Olexander, Candidate of Technical Sciences, Reseachrer, State Enterprise «Scientific Research Institute of Construction Production» named after V. S. Balytskyi, Kyiv, Ukraine, e-mail: pylypaka@ukr.net, orcid: 0009-0003-3009-9179

Bakay Timofii, Postgraduate Student at the Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: t.bakay@nubip.edu.ua, orcid: 0009-0007-1160-7333.

Yakovenko Ihor, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Construction Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: i2103@ukr.net, orcid: 0000-0003-4256-9855.

Стаття подана до редакції: 26.10.2025

Стаття прийнята до опублікування: 12.11.2025.

Стаття опублікована: 20.11.2025.