

ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

УДК 691.32:624.012.45

МЕХАНІЗМИ ВЗАЄМОДІЇ АРМАТУРИ Й БЕТОНУ: СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ І ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ

MECHANISMS OF INTERACTION BETWEEN REINFORCEMENT AND CONCRETE: CURRENT RESEARCH STATUS AND TECHNICAL ASPECTS

Баранович Л.Р., аспірант, <https://orcid.org/0000-0002-4521-311X>; Баранович А.М., магістр будівництва, <https://orcid.org/0000-0001-5783-7897> (Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, м. Львів),

Baranovich L., graduate student, <https://orcid.org/0000-0002-4521-311X>; Baranovich A., master of civil engineering <https://orcid.org/0000-0001-5783-7897> (Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv),

У статті отримано систематизовану класифікацію типів зчеплення арматури з бетоном, що охоплює три основні механізми: адгезійний, фрикційний та механічний. Показано, що найбільший внесок у загальну міцність зчеплення — до 75% — забезпечує механічне зчеплення, обумовлене виступами арматури, які взаємодіють з бетоном через сили змінання і зрізу.

The article presents a systematized classification of the types of bond between reinforcement and concrete, covering three main mechanisms: adhesive, frictional, and mechanical. It is shown that the greatest contribution to the total bond strength—up to 75%—is provided by mechanical interlock, caused by the ribs on the reinforcement interacting with the concrete through compression and shear forces. This supports the conclusion that using deformed bars without additional anchorage is a technically justified solution. The study reviews the findings of numerous national and international researchers, allowing the identification of key factors influencing bond parameters: concrete class and composition, type and diameter of reinforcement, anchorage length, curing conditions, type of aggregate, use of coatings, and methods of compaction. The comparative analysis demonstrates that increasing the strength of concrete up to a certain level leads to a linear rise in bond strength, while further increases result in diminishing returns. Research has shown that

reducing the reinforcement diameter, using finer aggregates, and applying modifying admixtures can enhance bond strength, especially in lightweight concrete mixtures. Experimental results from other researchers confirm the effectiveness of epoxy, sand, and cement coatings for plain bars, which significantly improve their performance, bringing them closer to that of ribbed bars. It is noted that increasing the anchorage length does not always lead to improved bond strength, due to the uneven distribution of stresses along the embedded length. The conducted analysis confirms the necessity of a comprehensive approach to the study of bond behavior, taking into account the physicochemical and structural interactions. The obtained results have practical significance for improving the durability and crack resistance of reinforced concrete structures, particularly when using lightweight and modified concretes.

Ключові слова: арматура, зчеплення, адгезія, тертя, анкерування, бетон, седиментація, покриття.

reinforcement, linkage, adhesion, friction, anchoring, concrete, sedimentation, coating.

Вступ. На сьогодні залізобетон є одним із найбільш використовуваних будівельних матеріалів через свої будівельно-конструктивні властивості. Залізобетон як композитний будівельний матеріал, є результатом поєднання монолітного сполучення бетону та сталевої арматури. Для отримання сталої і міцної конструкції, яка б витримувала і могла чинити опір зовнішнім навантаженням, необхідно щоб арматура і навколоїшній бетон мали між собою достатнє зчеплення [1, 2]. Зчеплення визначає як несучу здатність, так і жорсткість та тріщиностійкість залізобетону. Воно залежить від великої кількості факторів. Зокрема це: міцність бетону, вид та діаметр арматури, довжини заробляння стержнів у бетон, товщини захисного шару бетону, характер навантаження, тривалість процесів, гранулометричний склад суміші, природа наповнювачів, умови твердіння, розташування стержнів при бетонуванні тощо [1-11]. Головними факторами, які забезпечують надійне щеплення арматури і бетону є: опір бетону зусиллям змінання і зрізування, які обумовлені виступами і іншими нерівностями на поверхні арматури (механічне зчеплення); сили тертя, що виникають між поверхнями арматури та бетону внаслідок обтискання арматурних стрижнів бетоном у процесі його осідання; склеювання (адгезія) поверхні арматури з бетоном унаслідок в'язкості колоїдної маси цементного тіста [12-14].

Аналіз останніх досліджень. Дослідженням зчеплення арматури і бетону займалося багато вчених, зокрема українських Ромашко В.М., Ромашко О.В [15-17], Філіпчук С.В., Поляновська О.Є. [8; 9; 11], Бабич Є.М [7-9], Андрух С.Л., Маслій І.В. [18], Болотов М.Г. [13] тощо. Серед іноземних вчених це

питання розвивали Rafal Ahmed, Shad M. Abed [19], John Newman, Ban Seng Choo [12] тощо.

Постановка мети і задач досліджень. Метою даного дослідження є комплексний аналіз факторів, що впливають на зчленення арматури з бетоном різного складу, зокрема у звичайному, легкому та високоефективному бетонах, а також визначення закономірностей змін механізму зчленення залежно від характеристик арматури, типу заповнювача, класу бетону та умов анкерування. Для цього було проаналізовано сучасні підходи до теоретичного та експериментального вивчення зчленення; виявлено ключові параметри, що визначають ефективність взаємодії арматури з різними типами бетону; визначено вплив діаметра, профілю та покриття арматурних стрижнів на міцність зчленення; оцінено ефективність використання легких заповнювачів; узагальнено результати досліджень щодо анкерування арматури.

Методика досліджень. Дослідження базується на аналізі експериментальних даних щодо зчленення арматури з бетоном різного класу та складу. Вивчались впливи діаметра стрижня, довжини анкерування, типу профілю арматури, класу бетону та виду заповнювача. Застосовано порівняльний аналіз граничних напружень зчленення, а також вивчено ефективність покріттів та вплив адгезійних і механічних чинників на міцність з'єднання.

Результати дослідження. Аналіз праць вчених показав, що на сьогодні дослідження зчленення можна поділити за такими напрямами: виявлення основних параметрів (впливають на міцність зчленення арматури з бетоном найбільше); вивчення питання особливостей взаємних змін бетону і арматури, та визначення закономірностей їх поведінки; опрацювання технічної теорії зчленення арматури з бетоном; використання числових методів для моделювання зчленення арматури з бетоном [14; 17].

Як було зазначено у праці [18], усі відомі гіпотези про зчленення арматури із бетоном залежно від підходу до висновку теоретичних залежностей, можна поділити на три основні групи:

- у першій групі зчленення розглядається як взаємодія арматури і бетону під час тертя. Ці аналітичні залежності базуються на фізичній стороні явища і враховують механічні та фізичні властивості матеріалів;
- друга група описує характер зчленення як змінну, що визначається величиною і розподілом взаємних зсувів $q(x)$ і $\tau(x)$ в арматурі вздовж її закладання, і визначається шляхом диференціювання експериментальних даних кривої зсуву.
- до третьої групи відносять графіки розподілу поздовжніх напружень в арматурі $\sigma(x)$, які отримані із експерименту, вони використовуються для аналізу зчленення [18].

У випадку відсутності зчленення і утворення першої тріщини спричиняється збільшення подовжень по всій довжині розтягнутої арматури, що у свою чергу призводить до різкого розкриття тріщини, яка

утворилася, скорочення висоти стиснутої зони, зменшення згинальної жорсткості й заниження несучої здатності залізобетонної конструкції [12; 14; 20].

Найбільше на зчеплення арматури з бетоном впливає механічне зчеплення, обумовлене виступами і іншими нерівностями на поверхні арматури, що створює міцний зв'язок між арматурою та бетоном завдяки зусиллям опору змінання і зрізування бетону. Ця протидія висмикуванню арматури з бетону складає приблизно 75% загальної величини зчеплення. Завдяки дослідам визначено, що зчеплення стрижневий арматури періодичного профілю із бетоном у 2...3 рази вище за зчеплення гладкої арматури. Через цю особливість арматуру періодичного профілю використовують без спеціальних анкерних пристрій на кінцях [12; 14].

Важливим фактором, що впливає на зчеплення арматури з бетоном є седиментація твердих частинок і вичавлювання води під час твердіння бетонної суміші. Наслідком, у цьому випадку, може бути неоднакове зчеплення арматури з бетоном в нижній або у верхній частинах виробу. Періодичний профіль арматури значно послаблює негативний вплив седиментації [12; 14; 21]. Неприпустимо допускати зменшення щільності бетону в зоні його контакту з арматурою, адже під час висмикування арматури з нього, напруга у самому бетоні може бути в 5...7 разів більшою за кубикову міцність бетону [12; 14].

Фактор впливу адгезійних властивостей арматури і бетону є менш значним, але, тим не менше, він є першою протидією висмикування стрижня арматури з тіла бетону, і при припиненні його впливу починає діяти фактор механічного зчеплення та тертя. Адгезію забезпечують міжмолекулярна взаємодія та сили головних хімічних валентностей арматури і бетону. Під час контакту двох поверхонь починають розвиватися процеси, що характеризуються збільшенням розмірів істинної поверхні контакту, дифузією і виникненням адгезійних зв'язків [13].

Руйнування зчеплення, при якому виникає відмова конструкції через недостатню довжину закладення арматури, може відбуватися і при низьких розтягуючих напругах, внаслідок чого, в бетоні може відбуватися достатній зсув арматури, що є наслідком руйнування адгезії між ними, залишаючи лише силу тертя, яка протидіє руху стержня відносно навколошнього бетону по довжині зсуву. Усадка бетону також може викликати тертєвий опір по відношенню до стрижнів.

Для того, щоб забезпечити надійне зчеплення арматури з бетоном необхідно врахувати такі особливості:

- напруга зчеплення збільшується із зменшенням діаметра арматури. Це визначається збільшенням питомої поверхні зчеплення арматури з бетоном. Для збільшення площи контакту арматури з бетоном слід обмежувати діаметр розтягнутих стрижнів;

- напруга зчеплення зростає при збільшенні швидкості передачі повздовжніх зусиль з арматури на бетон;
- висмикувальна сила зі стрижня на бетон передається лише на певній ділянці закладення стрижня;
- закладення стрижня на велику глибину не впливає на зміну форми епюри напружень зчеплення арматури з бетоном;
- із збільшенням міцності і діаметру арматури збільшується і довжина зони анкерування її у бетоні. Збільшення зчеплення арматури з бетоном призводить до зменшення довжини зони анкерування;
- на збільшення зчеплення арматури з бетоном впливають: підвищення класу бетону, збільшення вмісту цементу, зменшення водоцементного відношення, збільшення щільності бетону за допомогою вібрації, центрифугування, пресування або вакуумування;
- зчеплення арматури під час висмикування значно менше, ніж під час її вдавлювання, внаслідок стиснення арматурного стрижня його поперечний переріз збільшується, і, як наслідок, збільшується зчеплення стрижня з бетоном, і він починає опиратися поперечному розширенню. У середньому зчеплення під час дії стиснення більше на 40% ніж під час розтягування арматури. Необхідно обмежувати використання діаметрів стиснутих стрижнів, хоча і менше ніж розтягнутих [12; 14; 20; 21].

Залежно від класу бетону, використовуваного наповнювача, кількості доданого цементу, водоцементного відношення бетону, включення різних додатків чи пластифікаторів, використання гладкої арматури чи із змінним профілем, показники зчеплення будуть варіюватися. Так якщо взяти звичайний бетон класу С16/20, С20/25, С23/30 та С60/70 із кубовою міцністю (28 день) відповідно $f_{cm,cube} = 24,6; 29,7; 34,7$ та $70,4$ MPa; та арматури класу А500С діаметром 12, 16 та 20 mm; і заанкерити стрижні у масив бетону на глибину $l_b = 10d$, то граничне напруження зчеплення у бетоні класів з С16/20 до С35/40 при використанні стрижнів діаметром 12 mm збільшилось з $f_b = 4,61$ MPa до $f_b = 10,43$ MPa, тобто 2,26 рази, а у бетоні класу С16/20 в 2,86 рази, в порівнянні із бетоном класу С16/20 і склали $f_b = 12,17$ MPa.

Приблизно така ж залежність спостерігається і при використанні стержнів діаметром 16 і 18 mm, але для стержнів діаметром 20 mm і більше збільшення f_b є значно меншим [10; 11; 21-27].

Цей випадок наочно демонструє тезу, що зі збільшенням класу бетону спостерігається збільшення зчеплення, але з меншим приростом ніж для менших класів бетону.

Дослідження зчеплення високоефективного самоущільнювального бетону класу С80/95 із гладкою сталевою арматурою показало, що при кубиковій міцності бетону 87 MPa та діаметру арматури 16 mm, при довжині занурення арматури 40, 80 та 120 mm, що відповідає 2.5d, 5d, 7.5d, отримані результати були такими: максимальне зусилля зчеплення для $f_{cm} = 87$ MPa становило $f_{b,max} \approx 12.2$ MPa; залишкове зусилля після ковзання мало показники $f_{b,res} \approx 0.08 \cdot f_{cm}$

(при $s = 10$ mm); а адгезійне (початкове) зусилля - $f_{b,a} \approx 0.06 \cdot f_{cm}$ для $f_{cm} = 87$ MPa становило ≈ 5.2 MPa. Зі зростанням довжини занурення вага максимальної міцності зчеплення зменшується через нерівномірний розподіл напружень. Адгезійна ж міцність зчеплення підвищується з довжиною анкерування [28].

Випробування високоміцного бетону із кубовою міцністю **від 52,6 до 62,6** MPa (вік зразків 1, 3, 7, 14, 28 діб) із використанням арматури змінного профілю діаметром 16 mm показало, що при довжині анкерування 80 mm ($\sim 5d$) міцність зчеплення збільшувалась із ростом міцності бетону [4; 23; 29; 30].

Зчеплення арматури змінного профілю діаметром 8-20 mm у фібробетоні з об'ємом волокон до 70 kg/m³ і з міцністю на стиск **30–50** MPa при **використанні захисного шару товщиною від 30** mm до $5 \cdot d$ покращується з **ростом міцності бетону** (до 50 MPa) та **діаметра арматури**; **обсяг волокон** має слабший, але всі ж таки **позитивний вплив** на максимальну міцність зчеплення [6; 20; 31].

Дослідження зчеплення арматури з бетоном на легких заповнювачах в залежності від їхнього походження, показало досить різні результати. Так при заміні звичайного щебеню керамзитовим сланцем у бетоні з класом міцності (39,4 MPa, 48,7 MPa, 62,7 MPa, 83,2 MPa) і арматурою з рифленням діаметром (12, 16, 20 mm) та довжиною 50, 80 mm, було виявлено, що легкий бетон має кращу міцність зчеплення ніж звичайний бетон [5; 19].

При використанні у бетоні керамзиту як заповнювача, міцність якого складала 70,4 MPa, та арматури діаметром стрижня 12 mm, міцність зчеплення при використанні методу висмикування була меншою ніж у стандартному бетоні і становила 32,8 MPa, за умови, що довжина анкерування складала 150 mm. При зміні умов, із використанням того ж самого бетону, але із міцністю 61,1 MPa, стрижнів діаметром 12 mm та довжиною закладення стрижня 100 mm, міцність зчеплення становила 19,8 – 22,1 MPa, що було вищим за міцність зчеплення звичайного бетону.

Іще одне дослідження, яке характеризує поведінку зчеплення у легкому бетоні, було проведено у 2014 році. У легкому бетоні з густиноро 1840 kg/m³ було замінено звичайний пісок на керамзит. Результати проведених експериментів показали зменшення міцності зчеплення на 33%. При високому рівні заміщення дрібного заповнювача на керамзит більш ніж на 50% при густині бетону 1153,2 kg/m³, було встановлено, що зниження міцності зчеплення перевищило 30% [3; 5; 19].

Експериментальні дослідження зчеплення у пінобетоні марки D800 і D1200 з арматурою періодичного профілю діаметром 8 та 10 mm марки А-ІІІ, показали, що при збільшенні зони анкерування на 50% (з 160 mm до 240 mm) необхідна сила для висмикування стержня з пінобетону збільшується на 15%; а для марки D1200 за тих же умов (збільшення зони анкерування з 200 mm до 300 mm) – на 20%; при збільшенні діаметра стрижнів з 8 до 10 mm середнє значення сили, необхідної для висмикування, є трохи нижчими, це пов'язано із

значним зниженням напружень зчеплення при збільшенні поперечного перерізу арматури [5; 32; 33].

Також відзначається вплив типу арматурних стрижнів на зчеплення. Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що використання арматури періодичного профілю забезпечує більшу міцність зчеплення у порівнянні із гладкою арматурою. Це пояснюється наявністю ребер, які покращують як фрикційне так і механічне зчеплення між бетоном і арматурою. Ця відмінність і підвищує міцність зчеплення (Рис. 1.) [2].

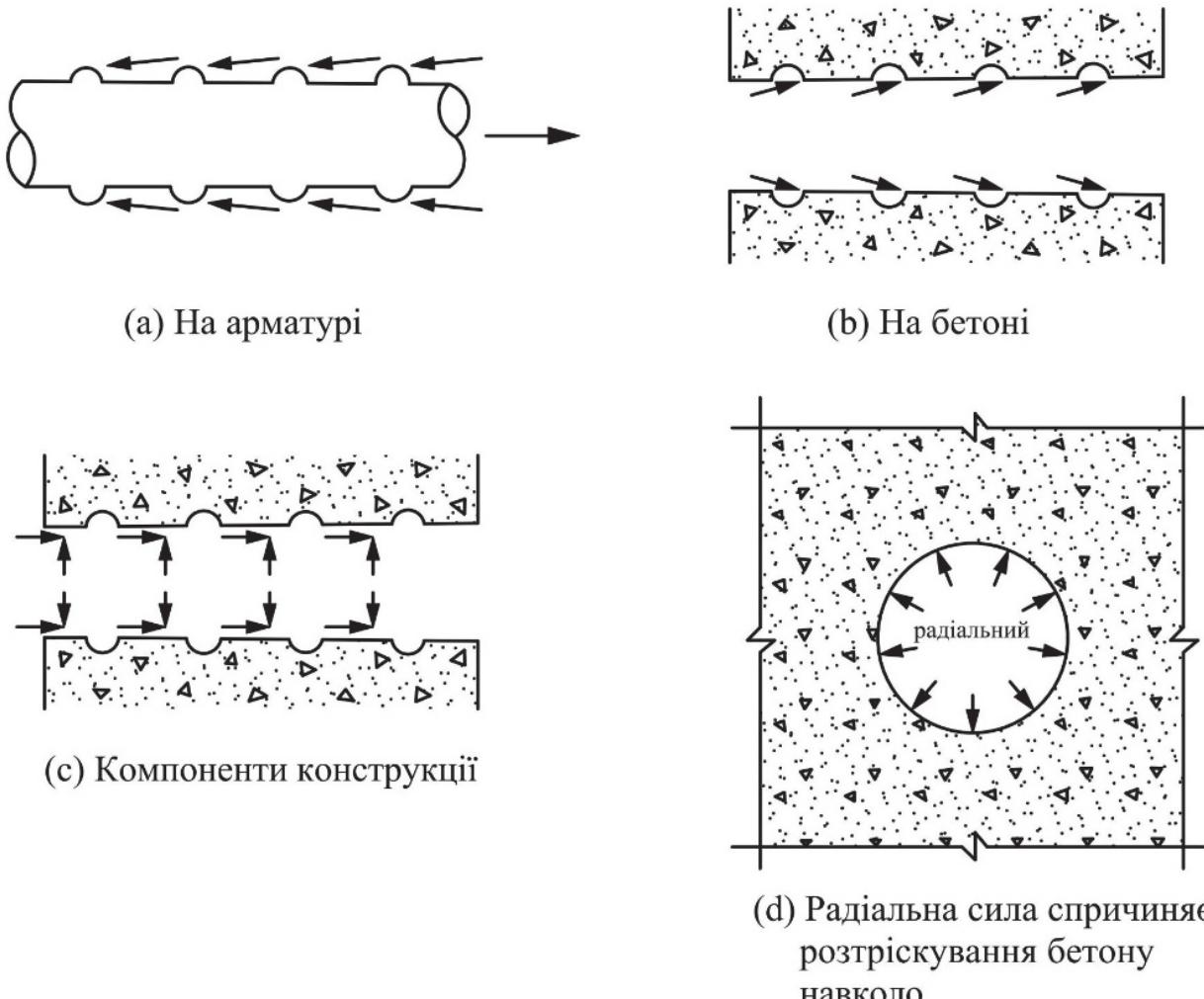


Рис. 1. Сили між арматурним стрижнем і навколошнім бетоном.

При досліджені зчеплення вчені використовували різні види арматури: квадратні кручениі сталеві стрижні, бамбукові стрижні, гладкі та рифлені стрижні з склопластику (FRP), гладка сталь, еліптичні гладкі склопластикові стрижні, металеві гладкі і змінного профілю стрижні тощо.

Для підвищення міцності зчеплення арматури з легким бетоном також використовують різні покриття для арматури: епоксидна смола, пісок, цинк [19], цементне тісто [11] тощо.

При досліджені впливу покриття арматури на міцність зчеплення було проведено ряд експериментів із легким бетоном з керамзитовим заповнювачем

та двома типами арматурних сталевих стрижнів – гладкими та з періодичним профілем. Як покривний шар для поверхні арматури використовувалась епоксидна смола. Покриття арматури здійснювалося трьома методами: безпосередньо перед заливанням бетону; покриття, обкачування в піску та сушіння перед заливанням бетону; покриття та обкачування в піску без сушіння в печі перед заливанням бетону. Було встановлено, що при використанні гладкої арматури зчеплення покращують за умови застосування всіх трьох методів. При використанні арматури періодичного профілю найкращим був результат при використанні лише третього методу [3; 5; 19].

З даного дослідження можна зробити висновок, що покриття поверхні гладких арматурних стрижнів суттєво покращує міцність зчеплення в порівнянні з арматурою періодичного профілю.

Значний вплив на характер міцності зчеплення арматури у легкому бетоні має і діаметр арматурних стрижнів. Так 80% дослідників зафіксували чітке зменшення міцності зчеплення в межах від 7% до 43% при використанні арматури великого діаметра. У дослідах використовувались діаметри арматур в діапазоні від 8 до 25 mm [3; 5; 19; 23; 32].

Щодо впливу на зчеплення довжин анкерування стрижнів, то, при використанні довжин зчеплення в межах від 25 mm до 175 mm, було зроблено висновок що зі збільшенням довжини зчеплення опір зменшується приблизно на 26...29% [3; 5; 7; 11; 19; 23].

Висновки та рекомендації. 1. Зчеплення арматури з бетоном є ключовим чинником, що забезпечує цілісну роботу залізобетонних конструкцій. Воно визначає не лише несучу здатність, а й деформативність, тріщиностійкість та довговічність елементів.

2. **Механізм зчеплення** є комплексним і включає три основні компоненти: механічне зчеплення, силу тертя та адгезію. Найважомішою роль відіграє механічне зчеплення, особливо при використанні арматури періодичного профілю.

3. **Вплив численних факторів** на зчеплення (клас і склад бетону, діаметр та тип арматури, довжина анкерування, умови твердиння тощо) є суттєвим, що зумовлює необхідність їх врахування при проектуванні.

4. **Експериментальні дослідження** доводять, що зчеплення арматури з бетоном зростає зі збільшенням міцності бетону, однак цей ріст не завжди є пропорційним, особливо при великих діаметрах арматури або довжині анкерування.

5. **Легкі та спеціалізовані бетони** (керамзитобетон, пінобетон, самоущільнювальний бетон) потребують окремого підходу до забезпечення зчеплення, зокрема через седиментаційні явища та іншу структуру заповнювача.

6. **Тип і обробка арматури** (рифлення, покриття епоксидною смолою, піском тощо) мають суттєвий вплив на зчеплення. Відомо, що правильне

поєднання профілю стрижня та покриття дозволяє компенсувати недоліки бетону нижчої щільності.

7. **Моделювання процесів зчеплення**, зокрема числовими методами, дозволяє оптимізувати проектні рішення та передбачити поведінку конструкцій у різних умовах експлуатації.

8. **Практичні рекомендації** щодо анкерування арматури мають враховувати тип навантаження (роздяг чи стиск), геометричні характеристики арматури, характеристики бетону, спосіб ущільнення суміші та умови твердиння.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що зчеплення арматури з бетоном — це не лише проблема контакту матеріалів, а комплексна інженерна задача, що охоплює матеріалознавство, будівельну механіку та проєктування. Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути спрямовані на вдосконалення моделей зчеплення, розробку інноваційних матеріалів та уточнення нормативних підходів для підвищення надійності сучасних залізобетонних конструкцій.

1. Nazzal L.A., Darwin D., O'Reilly M. *Anchorage of High Strength Reinforcing Bars in Concrete*. – Lawrence, KS : The University of Kansas Center for Research, 2014. – 324 p. – (SM Report No. 108). – [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://iri.ku.edu/sites/iri/files/files/pdfs/SM%20Report%20No.%20150n.pdf> (Дата звернення 14.06.2025).

2. Wang C.-K., Salmon C.G., Pincheira J.A. *Reinforced Concrete Design*. – 7th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 967 p. – ISBN 978-0-471-26286-2.

3. Bogas J. A., Gomes M. G., Real S. Bonding of steel reinforcement in structural expanded clay lightweight aggregate concrete: The influence of failure mechanism and concrete composition // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 65. – P. 350–359. – DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2014.04](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04).

4. Li K. F., Yang C. Q., Zhao Y. B., Pan Y., Wang Y., Xu F. Study on local bond behaviors between steel bars and high-strength concrete exposed to early disturbances // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 76. – Article No. 106953. – DOI: [10.1016/j.jobe.2023.106953](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106953).

5. Mo K. H., Alengaram U. J., Visintin P., Goh S. H., Jumaat M. Z. Influence of lightweight aggregate on the bond properties of concrete with various strength grades // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 84. – P. 377–386. – DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.03.040](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.040).

6. Zhang H., Li H., Lin T., Shen Z., Feng Q. Experimental investigation on influence of embedment length, bar diameter and concrete cover on bond between reinforced bars and steel fiber reinforced concrete (SFRC) // *Case Studies in Construction Materials*. – 2024. – Vol. 21. – Article No. e03742. – DOI: [10.1016/j.cscm.2024.e03742](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03742).

7. **Бабич Є. М., Бабич В. Є., Поляновська О. Є.** Зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю та її анкерування в згинальних залізобетонних елементах : монографія / Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. – Рівне : Волин. обереги, 2017. – 158 с. : рис., табл. – Бібліогр.: с. 131–143. – 100 прим. – ISBN 978-966-416-499-0.

Babych Ye. M., Babych V. Ye., Polianovska O. Ye. *Zcheplennia z betonom armatury serpopodibnoho profiliu ta yii ankeruvannia v hynnalnykh zalizobetonnykh elementakh : monohrafiia* / Nats. un-t vod. hosp-va ta pryrodokorystuvannia. – Rivne : Volyn. oberehy, 2017. – 158 s. : rys., tabl. – Bibliogr.: s. 131–143. – ISBN 978-966-416-499-0.

8. Бабич Є. М., Кочкарьов Д. В., Філіпчук С. В. Математична модель зчеплення арматури з високоміцним бетоном // *Будівельні конструкції: теорія і практика*. – 2018. – Вип. 2. – С. 154–161. – [Електронний ресурс] Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/budktp_2018_2_21 (Дата звернення 12.06.2025).

Babych Ye. M., Kochkarov D. V., Filipchuk S. V. Matematichna model zcheplennia armatury z vysokomitsnym betonom // *Budivelni konstruktsii: teoriia i praktyka*. – 2018. – Vyp. 2. – S. 154–161. – [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/budktp_2018_2_21 (Data zvernennia: 12.06.2025).

9. Бабич Є. М., Філіпчук С. В. Дослідження зчеплення арматури з високоміцним бетоном // *Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів (Тернопіль, 16–17 листопада 2017 р.)* / Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пуллюя. – Тернопіль : ТНТУ, 2017. – С. 52–53. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/22825/2/CAZST_2017vI_Babych_Y_M-The_research_of_armature_52-53.pdf (Дата звернення 09.06.2025)

Babych Ye. M., Filipchuk S. V. Doslidzhennia zcheplennia armatury z vysokomitsnym betonom // *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii : zb. tez dopovidei mizhnar. nauk.-tekhn. konf. molodykh uchenykh ta studentiv (Ternopil, 16–17 lystopada 2017 r.)* / Ternop. nats. tekhn. un-t im. I. Puliua. – Ternopil : TNTU, 2017. – S. 52–53. – [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/22825/2/CAZST_2017vI_Babych_Y_M-The_research_of_armature_52-53.pdf (Data zvernennia: 09.06.2025).

10. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном // *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. – 2018. – Вип. 179. – С. 92–99. – DOI: [10.18664/1994-7852.179.2018.147756](https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147756).

Romashko O. V., Romashko V. M. Shchodo otsiniuvannia zcheplennia armatury z betonom // *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*. – 2018. – Vyp. 179. – S. 92–99. – DOI: 10.18664/1994-7852.179.2018.147756.

11. Філіпчук С. В., Поляновська О. Є. Дослідження опору витягання арматурних стержнів з 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)

Filipchuk S. V., Polianovska O. Ye. Doslidzhennia oporu vytiahannia armaturnykh sterzhniv z betoniv riznykh klasiv // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. – 2019. – Vyp. 11. – S. 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).

12. Newman J., Choo B.S. *Advanced Concrete Technology. Volume 1: Constituent Materials*. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2003. – 280 p. – ISBN 0-7506-5103-2.

13. Шарий О. М., Болотов М. Г. Визначення адгезійних властивостей арматури залізобетону // *Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 18–19 березня 2021 р.)* – Чернігів : ЧНТУ, 2021. – С. 38–39. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/24314> (Дата звернення 08.06.2025)

Sharii O. M., Bolotov M. H. Vyznachennia adheziynykh vlastyvostei armatury zalizobetonu // Novitni tekhnolohii u naukovii diialnosti i navchalmomu protsesi: Vseukraainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh (Chernihiv, 18–19 bereznia 2021 r.) – Chernihiv: ChNTU, 2021. – S. 38–39. [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/24314> (Data zvernennia: 08.06.2025).

14. Якименко О. В. Бетонні роботи : монографія / О. В. Якименко, О. В. Кондращенко, А. О. Атинян ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 275 с ISBN 978-966-695-440-7 [Електронний ресурс] Режим доступу: https://eprints.kname.edu.ua/50234/1/2016_ПЕЧ_1МН_Готовое%2018%21%21%21%20Я.pdf (Дата звернення 01.06.2025)

Yakymenko O. V., Kondrashchenko O. V., Atynian A. O. *Betonni roboti: monohrafia* / Kharkivskyi natsionalnyi universytet miskoho hospodarstva im. O. M. Beketova. – Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova, 2017. – 275 s. ISBN 978-966-695-440-7. [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: https://eprints.kname.edu.ua/50234/1/2016_ПЕЧ_1МН_Hotovoe18_Ya.pdf (Data zvernennia: 01.06.2025).

15. Romashko O., Romashko V. Evaluation of bond between reinforcement and concrete // *MATEC Web of Conferences* : 7th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2018), 10–12 жовтня 2018 р. – 2018. – Vol. 230. – DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20182300207>.

16. Ромашко В. М., Ромашко-Майструк О. В. Основи розрахунку зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. – 2021. – Вип. 39. – С. 112–120. – [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/362667266_OSNovi_ROZRAHUNKU_ZCEPL_ENNA_ARMATURI_Z_BETONOM_V_ZALIZOBETONNIH_ELEMENTAH (Дата звернення 10.06.2025)

Romashko V. M., Romashko-Maistruk O. V. Osnovy rozrakhunku zcheplennia armatury z betonom v zalizobetonnykh elementakh // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. – 2021. – Vyp. 39. – S. 112–120. [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: https://www.researchgate.net/publication/362667266_OSNovi_ROZRAHUNKU_ZCEPL_ENNA_ARMATURI_Z_BETONOM_V_ZALIZOBETONNIH_ELEMENTAH (Data zvernennia: 10.06.2025).

17. Ромашко В. О., Ромашко В. М., Журавський О. Д. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. – 2019. – Вип. 37. – С. 214–221. [Електронний ресурс] Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2019_37_28 (Дата звернення 11.06.2025)

Romashko V. O., Romashko V. M., Zhuravskyi O. D. Uzahalnena model zcheplennia armatury z betonom // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. – 2019. – Vyp. 37. – S. 214–221. [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2019_37_28 (Data zvernennia: 11.06.2025).

18. Андрух С. Л., Маслій І. В., Галушка С. А., Теліченко Н. А. Оцінка міцності зчеплення стрижневої арматури з бетоном // *Science Review*. – 2019. – Т. 3, № 20. – С. 9–11. – DOI: [10.31435/rsglobal_sr/31032019/6380](https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/31032019/6380).

Andrukh S. L., Maslii I. V., Halushka S. A., Telichenko N. A. Otsinka mitsnosti zcheplennia stryzhnevoi armatury z betonom // *Science Review*. – 2019. – T. 3, № 20. – S. 9–11. DOI: 10.31435/rsglobal_sr/31032019/6380.

19. Ahmed R., Abed S.M. Bonding Performance for Lightweight Concrete: A Review // *Diyala Journal of Engineering Sciences*. – 2020. – Vol. 13, № 4. – C. 58–70. – DOI:10.24237/djes.2020.13408

20. Garcia-Taengua E., Martí-Vargas J. R., Serna P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 105. – P. 275–284. – DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.12.044](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.044).

21. Reis E. D., de Azevedo R. C., Christoforo A. L., Poggiali F. S. J., Bezerra A. C. S. Bonding of steel bars in concrete: A systematic review of the literature // *Structures*. – 2023. – Vol. 49. – P. 508–519. – DOI: [10.1016/j.istruc.2023.01.141](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.141).

22. Li X., Qin Z., Wu Z., Zheng D., Yuan Y., Wang Y., Li P., Zhu L. Cyclic bond deterioration of deformed steel bar in well-confined concrete // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 372. – Article No. 130648. – DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.130648](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130648).

23. Liu Y., Zhang J., Zhao D., Tao X., Zhang M. Bond-slip response of ultrahigh-strength steel bars with spiral grooves embedded in reinforced concrete // *Structures*. – 2024. – Vol. 70. – Article No. 107646. – DOI: [10.1016/j.istruc.2024.107646](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107646).

24. Zheng Y., Kang X., Zhang Z., Li Y., Feng Z., Li J. Study on bond-slip behavior of ribbed steel bars in engineered cementitious composites concrete: Experimental analysis, constitutive model and refined finite element model // *Construction and Building Materials*. – 2025. – Vol. 463. – Article No. 140100. – DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2025.140100](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140100).

25. Бабич В. Є., Поляновська О. Є., Демчук П. В. Дослідження зчеплення арматури з бетоном залежно від товщини захисного шару // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. – 2014. – Вип. 28. – С. 104–110. – [Електронний ресурс] Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2014_28_17 (Дата звернення 14.06.2025).

Babych V. Ye., Polianovska O. Ye., Demchuk P. V. Doslidzhennia zcheplennia armatury z betonom zalezhno vid tovshchyny zakhsnoho sharu // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. – 2014. – Vyp. 28. – S. 104–110. – [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2014_28_17 (Data zvernennia: 14.06.2025).

26. Ромашко-Майструк О. В. Моделювання зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах // *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. – 2020. – Вип. 190. – С. 37–45. – DOI: [10.18664/1994-7852.190.2020.213925](https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213925).

Romashko-Maistruk O. V. Modeliuvannia zcheplennia armatury z betonom v zalizobetonnykh elementakh // Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT. – 2020. – Vyp. 190. – S. 37–45. – DOI: 10.18664/1994-7852.190.2020.213925.

27. Чапюк О. С., Пахолюк О. А., Кислюк Д. Я., Задорожнікова І. В., Гришкова А. В. Зчеплення металевої арматури класу А500С з бетоном при повторних навантаженнях // *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. – 2020. – Вип. 14. – С. 169–175. – DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2020-4(14)-17.

Chapiuk O. S., Pakholiuk O. A., Kysliuk D. Ya., Zadorozhnikova I. V., Hryshkova A. V. Zcheplennia metalevoi armatury klasu A500S z betonom pry povtornykh navantazhenniakh // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. – 2020. – Vyp. 14. – S. 169–175. – DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2020-4(14)-17.

28. Dyba M. Experimental study of bond-slip relationships in high-performance self-consolidating concrete with plain steel bars // *Engineering Structures*. – 2024. – Vol. 319. – Article No. 118854. – DOI: [10.1016/j.engstruct.2024.118854](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118854).

29. Hu A., Du J. Theoretical analysis of bond characteristics between steel bars and ultra-high-performance concrete // *Magazine of Concrete Research*. – 2023. – Vol. 75, Issue 19. – P. 984–996. – DOI: [10.1680/jmacr.22.00291](https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00291).

30. Shen D., Shi X., Zhang H., Duan X., Jiang G. Experimental study of early-age bond behavior between high strength concrete and steel bars using a pull-out test // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 113. – P. 653–663. – DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.03.094](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.094).

31. Андрійчук О. В., Швець І. В. Методика експериментального дослідження зчеплення арматури з фібробетоном // *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. – 2019. – Вип. 12. – С. 13–20. – DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-02.

Andriichuk O. V., Shvets I. V. Metodyka eksperimentalnoho doslidzhennia zcheplennia armatury z fibrobetonom // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. – 2019. – Vyp. 12. – S. 13–20. – DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-02.

32. Верба В. Б., Демчина Б. Г. Контакт пінобетону з арматурою: вивчення явища, його моделювання та стадійність роботи в зоні зчеплення // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. – 2008. – № 627. – С. 22–27. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://vlp.com.ua/files/06_45.pdf (Дата звернення 10.06.2025)

Verba V. B., Demchyna B. H. Kontakt pinobetonu z armaturou: vyvchennia yavyshcha, yoho modeliuvannia ta stadiinist roboty v zoni zcheplennia // Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Teoriia i praktyka budivnytstva. – 2008. – № 627. – S. 22–27. – [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: https://vlp.com.ua/files/06_45.pdf (Data zvernennia: 10.06.2025)

33. Демчина Б. Г. Експериментальні дослідження зчеплення арматури з пінобетоном / Б. Г. Демчина, В. Б. Верба, Х. Б. Демчина // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. — Львів : Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. — № 545 : Теорія і практика будівництва. — С. 41–45. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/47307> (Дата звернення 11.06.2025)

Demchyna B. H., Verba V. B., Demchyna Kh. B. Eksperimentalni doslidzhennia zcheplennia armatury z pinobetonom // Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". – Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika", 2005. – № 545 : Teoriia i praktyka budivnytstva. – S. 41–45. – [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/47307> (Data zvernennia: 11.06.2025)